



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

**3D spausdintų gaminių savybių gerinimo impregnuojant  
tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Arminas Žaliamas**  
Projekto autorius

**Doc. Dr. Marius Rimašauskas**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2019**



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

# **3D spausdintų gaminių savybių gerinimo impregnuojant tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Gamybos inžinerija (6211EX015)

---

**Arminas Žaliauskas**  
Projekto autorius

**Doc. Dr. Marius Rimašauskas**  
Vadovas

**Doc. Dr. Paulius Griškevičius**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2019**



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

## **3D spausdintų gaminių savybių gerinimo impregnuojant tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Armino Žaliausko, baigiamasis projektas tema „3D spausdintų bandinių savybių gerinimo impregnuojant tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

# MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

## Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa Gamybos inžinerija (6211EX015)

### Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) Arminui, Žaliauskui

1. Baigiamojo projekto tema: 3D spausdintų gaminių savybių gerinimo impregnuojant tyrimas  
The Research of 3D Printed Parts Properties Improvement by Impregnation.  
Patvirtinta 2018 m. lapkričio 29 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-11-14
2. Projekto tikslas ir uždaviniai:
  - 1) Pagaminti bandinius, kurie bus impregnuojami dervose.
  - 2) Juos impregnuoti skirtingo stingimo laiko dervoje su kietikliais.
  - 3) Pateikti konkrečius matavimų duomenis, kaip bandiniai pasikeičia po impregnavimo dervoje su kietikliais.
  - 4) Pateikti grafiškai matomus skirtumus, tarp impregnuotų ir neimpregnuotų bandinių mechaninių savybių pasikeitimo.
3. Pradiniai projekto duomenys:

Projekte naudoti ABS ir PLA medžiagų 3D spausdintus bandinius. Impregnavimui naudoti epoksidinę dervą „Epoxy Resin L“ ir kietiklius „L“ ir „EPH500“ iš gamintojo „R&G“
4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos:

Atlikti impregnuotų bandinių lenkimo bandymus pagal standartą ISO 178.
5. Projekto aprašomosios dalies struktūra:
  - 1) Įvadas
  - 2) Literatūros analizė
  - 3) Eksperimentinis tyrimas
  - 4) Tyrimo apibendrinimas
  - 5) Išvados
  - 6) Literatūros sąrašas
  - 7) Priedai
6. Grafinės projekto dalies sudėtis:
7. Projekto konsultantai:

Studentas

\_\_\_\_\_ (vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas

Doc. Dr. Marius Rimašauskas

\_\_\_\_\_ (vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas

Doc. Regita Bendikienė

\_\_\_\_\_ (vardas, pavardė, parašas, data)

## Turinys

<b>Įvadas</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Literatūros analizė</b> .....	<b>8</b>
1.1. Spausdinimui naudojamos medžiagos .....	12
1.2. ABS medžiagos savybės .....	12
1.3. PLA medžiagos savybės .....	13
1.4. Mechaninių savybių tyrimai.....	14
1.4.1. Gaminių sutvirtinimas epoksidine derva ir stiklopluoštu .....	14
1.4.2. Spausdinimo medžiagos stiprumo bandymas .....	14
1.4.3. Mechaninių savybių tikrinimas, spausdinant 3D detales atvirojo tipo spausdintuvu .....	15
1.5. Tarptautiniai standartai.....	16
1.5.1. ASTM D790 standartas .....	17
1.5.2. ISO 178 standartas .....	17
<b>2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS</b> .....	<b>21</b>
2.1. Gamybai naudojamos medžiagos.....	21
2.2. Spausdinimo parametrų pasirinkimas .....	23
Lenkimo bandymui trijuose taškuose pasirinkti spausdinimo parametrai.....	23
Slėgio tikrinimo bandymui pasirinkti spausdinimo parametrai.....	24
2.3. Įmpregnavimas vakuminėje kameroje, matavimai ir eksperimentų metodika.....	24
<b>3. TYRIMO APIBENDRINIMAS</b> .....	<b>27</b>
3.1. Spausdintų bandinių matavimai .....	27
3.2. Spausdintų bandinių lenkimo eksperimento rezultatai .....	28
3.2.1. Lenkimo rezultatai bandinių spausdintų ABS plastiko .....	29
3.2.2. Lenkimo rezultatai bandinių spausdintų iš PLA plastiko .....	34
3.3. Slėgio tyrimo rezultatai .....	38
3.3.1. ABS dangtelio bandymo rezultatai .....	40
3.3.2. PLA dangtelio bandymo rezultatai .....	40
3.4. Ekonominė dalis.....	41
<b>4. Išvados</b> .....	<b>44</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>46</b>
<b>Priedai</b> .....	<b>48</b>

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Lazerinio sukepinimo schema.....	10
2 pav. Lydžios masės nusodinimo schema.....	10
3 pav. Stereolitografijos schem.....	11
4 pav. Lenkimo bandymo staklės trijų taskų .....	17
5 pav. Lenkimo įtempių ir deformacijų diagrama.....	19
6 pav. Spausdinimo sluoksnių išdėstymas pagal bazavimo plokštumą.....	21
7 pav. Spausdinimo galvutės judėjimo trajektorija.....	22
8. pav. Bandiniai iš ABS ir PLA paruošti impregnavimui.....	24
9 pav. ABS bandiniai, kurių spausdinimo parametrai 0,254 mm, 75%.....	29
10 pav. Bandinių atspalvio palyginimas.....	29
11 pav. Bandiniuose įsigėrusios dervos kiekis.....	30
12 pav. ABS bandiniai 0,254 mm sluoksnio storis,75%.....	30
13 pav. ABS bandiniai 0,3 mm sluoksnio storis,75%.....	31
14 pav. ABS bandiniai 0,3 mm sluoksnio storis,75%.....	32
15 pav. PLA bandiniai 0.254 mm sluoksnio storis 75%.....	33
16 pav. PLA bandiniai 0.3 mm sluoksnio storis 75%.....	34
17 pav. PLA bandiniai 0.3 mm sluoksnio storis 75%.....	34
18 pav. PLA bandiniai 0.3 mm sluoksnio storis 50%.....	35
19 Pav. PLA bandiniai 0.3 mm sluoksnio storis 50%.....	36
20 pav. Slėgio indo schema.....	37
21 pav. Slėginis indas.....	38
22 pav. ABS ir PLA dangteliai po įmerkimo.....	39

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. ABS termoplastiko mechaninės savybės.....	12
2 lentelė. PLA mechaninės savybės .....	13
3 lentelė. Bandymo parametrai.....	14
4 lentelė. Eksperimento duomenys.....	14
5 lentelė. Pateikiamos spausdinimo galimybės.....	15
6 lentelė. Kuris spausdintuvas, kokią medžiagą naudojo.....	16
7 lentelė. ABS bandinių bazuotų plačiaja briauna matavimai.....	26
8 lentelė. ABS bandinių bazuotų plonąja briauna matavimai.....	26
9 lentelė. PLA bandiniai bazuojami plačiaja briauna.....	27
10 lentelė. PLA bandiniai bazuoti plonąja briauna.....	27
11 lentelė. ABS bandinių lenkimo rezultatai.....	27
12 lentelė. PLA bandinių lenkimo rezultatai.....	28
13 lentelė. Dangtelių matavimai prieš ir po lenkimo.....	37
14 lentelė. Slėgio ir laiko priklausomybės lentelė.....	39

Žaliauskas, Arminas. 3D spausdintų gaminių savybių gerinimo impregnuojant tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Marius Rimašauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: 3D, spausdinimas, impregnavimas, ABS, PLA.

Kaunas, 2019. 79 p.

## **Santrauka**

Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra išsiaiškinti, kokią įtaką impregnavimas derivoje su kietikliais turi 3D spausdintiems gaminiams. Eksperimento metu naudojami bandiniai bus gaminami iš ABS ir PLA plastikų. Šie bandiniai toliau bus impregnuojami naudojant dervą ir du skirtingus kietiklius L ir EPH 500.

Po impregnavimo ir vakuumavimo šie bandiniai bus tikrinami naudojant 3 taškų lenkimo bandymą. Dar vienas bandymas, kuris bus atliekamas šio tyrimo metu, yra slėgio testas. Jo metu bus mėginama išsiaiškinti, kaip gerai bandinius užsandarina įmirkymas derivoje ir impregnavimas.

Atlikus visus minėtus bandymus ir eksperimentus, surinkus visą gautą informaciją ir duomenis, siekiama pagaminti 3D spausdintas detales greičiau ir pigiau, kol visos šių gaminių savybės išliktų nepasikeitusios, o gal ir geresnės. Tai tikimasi pasiekti naudojant 50-70% užpildymą spausdinimo metu, taip paliekant tuščių oro tarpų, kuriuos galėtų užpildyti derva su kietikliais, taip pagaminant detales su tokiomis pat savybėmis, kaip spausdinant pilnu užpildymu, bet tuo pat metu sutaupant laiko ir piniginių išteklių.



Žalčiauskas, Arminas. The Research of 3D Printed Parts Properties Improvement by Impregnation. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Marius Rimašauskas; 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: 3D, printing, impregnation, ABS, PLA.

Kaunas, 2019. 79 pages.

## **Summary**

Main objective of this research is to determine what kind of influence impregnation has on 3D printed parts. Parts that will be impregnated are going to be made from ABS and PLA plastics. These parts using resin and two different hardeners L and EPH 500.

After impregnation and vacuuming the parts will be faced with stress experiment using 3 point bending test. Another experiment that will be carried out during this research is determining how airtight these parts can be after impregnation.

After carrying out all these tests and obtaining all the result data, expected result is to create 3D printed parts faster and cheaper, while all of the properties would stay the same or even become better. This could be achieved using only 50-70% filling while printing. Leaving empty areas in the part we fill them with resin and hardeners, this way creating parts with the same technical characteristics, saving time and money resources.

## Ivadas

Spausdinimas 3D spausdintuvais, tai procesas, kurio metu kompiuterinis modelis tampa realiu objektu. Tai galima atlikti keliomis skirtingomis 3D spausdinimo technologijomis ir medžiagomis, tačiau spausdinimo principas išlieka toks pats: kompiuterinis modelis paverčiamas į kietą, realų kūną, pridodant medžiagą sluoksnis po sluoksnio.

3D spausdinimas yra laikomas ateities technologija, tačiau ši technologija žinoma daugiau nei 30 metų. Jos pradininku laikomas Chuck Hull, kuris 1983m. sukūrė 3D spausdinimo procesą vadinamą „Stereolitografija“. Jo apibūdinimu, stereolitografija – metodas, kurio metu aparatas, gaminantis kietus kūnus, sėkmingai spausdina vieną sluoksnį po kito. Šia idėja buvo spausdinama medžiaga, kuri kietėjo paveikta ultravioletine spinduliuote. Per pastaruosius metus 3D spausdinimo įrenginiai, tapo dar populiareni, kai tapo prienami platesnei vartotojų grupei. Tai nutiko, kai 3D spausdinimo įrenginiai, tapo mažesni, lengvesni ir pritaikyti naudojimui namuose.

Tačiau kaip žinoma, atspausdintų gaminių savybės nėra pačios tinkamiausios praktiniam panaudojimui. 3D spausdinimo technologija pagaminti gaminiai yra trapūs, dažnai jų mechaninėms savybėms įtakos gali turėti šiluma ar saulės spinduliuotė. Todėl ir ieškoma įvairiausių būdų, kurie padėtų detales pagaminti tvirtesnes ir atsparesnes išoriniam poveikiui. Šiam tikslui pasiekti naudojami įvairūs spausdinimo būdai:

- Detalių spausdinimas visiškai užpildant tuščias ertmes pagalbine medžiaga;
- Spausdinimas pastovioje temperatūroje, kai spausdinimo operacija atliekama uždaroje kameroje, kurioje palaikoma pastovi šiluma;
- Spausdinimas naudojant skirtingas medžiagas ar jų derinius.

Vienas iš mažiausiai tyrinėtų būdų detalių mechaninėms savybėms pagerinti, tai 3D spausdintuvais spausdintų gaminių impregnavimas dervose su kietikliais. Būtent tai ir siekiama iširti šio darbo metu.

Darbo tikslas – išanalizuoti, kaip pasikeis 3D spausdintų gaminių savybės po impregnavimo dervoje su skirtingais kietikliais.

Darbo uždaviniai:

1. Suprojektuoti ir pagaminti skirtingo užpildymo ABS ir PLA medžiagų bandinius.
2. Atlikti bandinių impregnavimą skirtingo stingimo laiko dervose.
3. Atlikti impregnuotų bandinių matmenų ir masės matavimus, palyginti su pradinėmis charakteristikomis.
4. Atlikti lenkimo bandymus ir nustatyti impregnuotų bandinių stiprumo ribą lenkiant.

## 1. Literatūros analizė

Gamyba sluoksniais ir 3D spausdinimas tobulėja labai sparčiai ir visomis kryptimis, siekiant pagerinti kokybę ir sunaudojamos užpildymo medžiagos kiekį spausdinant visą modelį atskiromis dalimis [1]. Taip pat siekiama išplėsti spausdinimo galimybes, kad jų neribotų spausdinimo įrenginio gabaritai, toks spausdinimas naudoja roboto ranką su pritaisyta spausdinimo galvute, kuira išpurškiama medžiaga [2]. Dar viena kryptis kurioje 3D spausdinimas tampa nepralenkiamas yra egzoskeletų neįgaliesiems gamyba. Nuskenavus žmogaus kūną pagaminamas, būtent jam pritaikomas egzoskeletas, kuris leidžia paralyžuotiems ir kojų nejudinantiems žmonėms vėl judėti [3]. Susidomėjimas šia technologija yra kaip niekada didelis, kai mokslininkai, investuotojai, kompanijos ir net valstybinės agentūros mėgina nuspėti kur visa tai juda. Spėjama, kad ši technologija taps populiariausia ir labiausiai taikoma pasaulinėje pramonėje ir ne tik. Jau šiuo metu yra eiliniam vartotojui prieinamų 3D spausdinimo įrenginių naudojamų kasdieninėje buityje, gaminant paprastus modelius ir gaminius.

Tačiau didžiausias susidomėjimas yra aukščiausios klasės įmonių, kurios sunkiai dirba mėgindamos atrinkti tinkamiausiais mašinas ir medžiagas tiesioginei detalių gamybai, siekdamos šios technologijos panaudojimą išplėsti iki galutinių gaminių gamybos. Aeronautikos kompanijos, tokios kaip: „Aerosud“, „Airbus“, „Boeing“ ir „Honeywell Aerospace“, atlieka atrankas AM (additive manufacturing) procesams ir medžiagoms. „GE Aviation“ paskelbė apie degalų purkštukus, kuriuos jų naujos kartos „LEAP“ lėktuvo varikliui. Jie bus gaminami būtent 3D spausdinimo technologija. Planuojama gaminti po 19 purkštukų varikliui, apytiksliai 1700 variklių per metus. Kompanijos tikslas pagaminti daugiau nei 32 000 sudėtingos sandaros ir formos metalinių detalių naudojant būtent 3D spausdinimo technologiją.

Kai kalbama apie 3D spausdinimo technologiją ir jos privalumus, projektavimas ir perprojektavimas yra labai svarbūs. Naudojant sparčią prototipų gamybą yra įmanoma sujungti kelias atskiras dalis (20 ir daugiau) į vieną sudėtingą junginį. Būtent tai „GE Aviation“ ir pritaikė savo gamyboje. Toks projektavimo kelias leido atsisakyti didelio detalių skaičiaus, papildomų įrankių, surinkimo operacijos ir patikrinimo bei kontrolės operacijų, o tai turi teigiamos įtakos laiko sąnaudoms gamyboje.

Atsiranda galimybė 3D spausdinimu kurti detales su labai plonomis sienelėmis, tokias kaip vidiniai tinkleliai ar grotelės, todėl panaudojant tokį principą nebereikia naudoti atskirų detalių, o tai lemia medžiagų, masės ir laiko sąnaudų sumažėjimą. Taip pat, galima perprojektuoti detales naudojant topologijos optimizaciją – metodą, kuris leidžia nuspręsti, kur padėti medžiagą siekiant optimizuoti

stiprumo ir masės santykį [4]. Naudojantis šia technika kai kuriais atvejais medžiagos kiekis ir masė buvo sumažinta daugiau nei 70 % [5].

Tačiau kaip ir visos technologijos 3D spausdinimas taip pat susiduria su iššūkiais tokiais kaip sistemos patikimumas ir proceso pakartojamumas. Šios technologijos sistemų gamintojai sprendžia šias problemas su realaus laiko stebėjimu ir programinėmis valdymo įrangomis, tačiau dar reikia įdėti daug pastangų visoms klaidoms ir nesutapimams pašalinti. Taip pat susiduriama su gamybos greičio ir gaminamų detalių dydžio problema, kadangi gamybos laikas ilgas, o gaminamos detalės turi ribotą gabaritinį dydį.

Didelę įtaką šiai technologijai daro žiniasklaida. Jos įtaka lėmė tai, kad atsirado tikinčių jog 3D spausdinimo technologija yra nepralenkiama tik dėl to, kad tai nauja ir turi visiškai kitokią principą nei esamos gamybos technologijos, tačiau tai nėra tiesa. Sparčiųjų prototipų gamyba, kai kuriais atvejais, yra puiki alternatyva, bet nevisoms esamoms technologijoms. Visos galimybės gaminti panaudojant AM arba tradicinėmis technologijomis privalo būti įvertintos kiekvienu atveju atskirai. Taip žiniasklaida pateikia labai klaidingą supratimą, lyginant pramoninius spausdintuvus su namų naudojimo spausdintuvais. Taip pat 3D spausdinimas yra palyginti lėtas gamybos būdas ir ekonominiu požiūriu, ne visada yra pats ekonomiškiausias. Taip pat neįvertinama tai, jog šis gamybos būdas reikalauja ne tik daug darbo iki modelio gaminimo, bet ir papildomo apdirbimo po gamybos proceso. Įvertinant visuos šiuos aspektus 3D spausdinimas išlieka technologija galinti ne tik sumažinti gamybos kaštus, bet taip pat CO<sub>2</sub> emisiją ir energijos sunaudojimą apytikriai 5 % iki 2025 metų [6].

Sunku nuspėti kuriai gamybos sričiai 3D spausdinimas turės didžiausią įtaką, nors artimiausioje ateityje labiausiai tikėtina, kad šią technologiją perims tokios sritys ir įmonės, kurios gamina mažais kiekiais brangias ir labai sudėtingas detales. Tokios kaip aeronautika, medicina ir dantų technikos sritys. Tačiau didieji sistemos darbo greičiui, įrangos ir medžiagų kainoms mažėjant ir turint didesnę medžiagų pasirinkimą, naujos gaminimo galimybės tikrai atsiras ir kitose gamybos srityse.

Niekada anksčiau nebuvo pasiekiami tiek ir tokių gamybos galimybių. Per 25 metus 3D spausdinimo technologija buvo pritaikyta projektavimui ir gamybai. Toliau siekiama pritaikyti 3D spausdinimą gamybai, kai norime gauti jau galutinį produktą iškart po spausdinimo operacijos. Tai yra dalis, kurioje glūdi pačios didžiausios galimybės ir kur bus pritraukta daugiausiai investicijų ateityje [7].

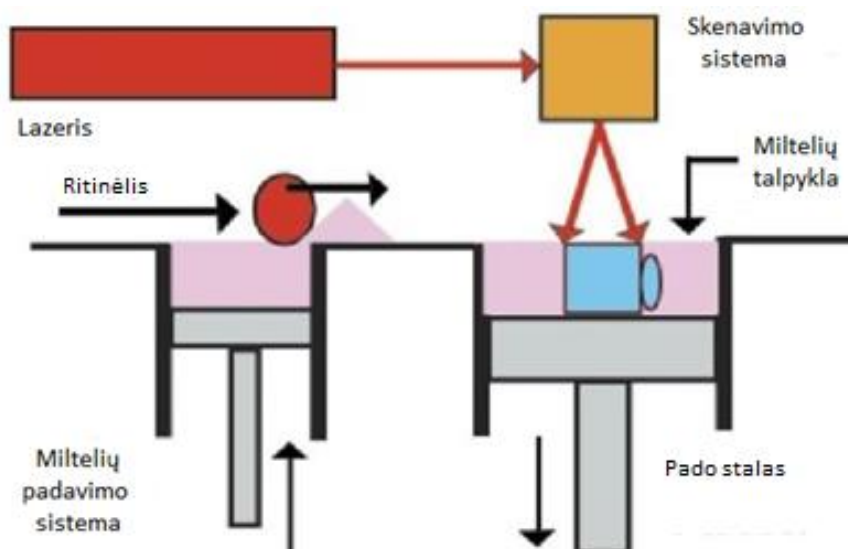
### **Pagrindiniai spausdinimo būdai ir jų technologija**

Praktikoje sutinkami keli skirtingai 3D spausdinimo būdai. Pagrindinis skirtumas tarp jų yra sluoksnio sukūrimas gamybos metu, kai siekiama gauti išbaigtą gaminį.

Plačiausiai naudojami būdai:

- SLS (selective laser syntering) – selektyvinis sukepinimas lazeriu
- FDM (fused deposition modeling) – lydytos medžiagos nusodinimas
- SLA (stereolithography) – stereolitografija.

Lazerinio sukepinimo metu (SLS), ant paruošto pagrindo užnešamas vis naujas miltelių sluoksnis, kuris sukepinamas lazeriu, kol sukepinamas paskutinis medžiagos sluoksnis ir pagaminamas norimas gaminy [8].

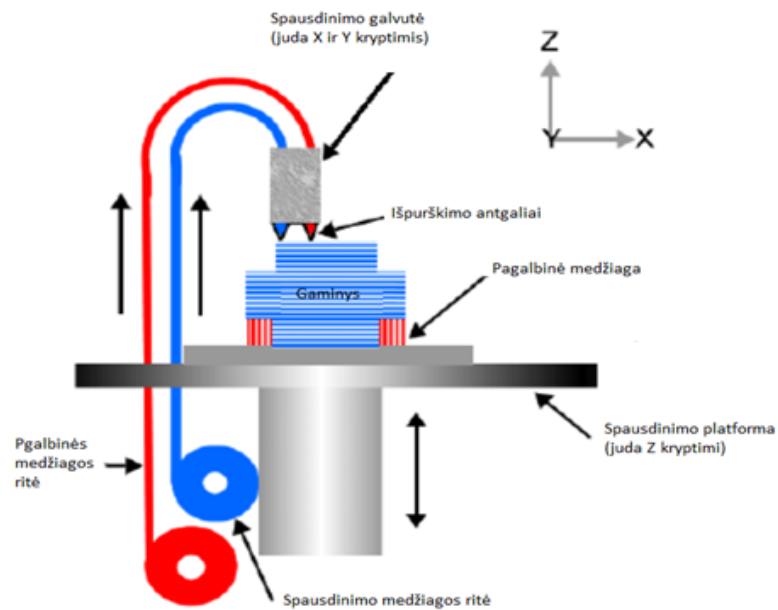


1 pav. Lazerinio sukepinimo schema [9]

1 paveiksle pavaizduota schema, kaip vyksta gamyba lazerinio sukepinimo metu. Stūmokliu milteliai tiekiami į spausdinimo kamerą, ritinėlis juos išstumia į spausdinimo zoną. Lazerio spindulys sukepiną gaminio kontūrą, gamybinis stūmoklis slenka žemyn ir vėl kartojamas šis procesas, kol pagaminamas galutinis gaminy.

Gamybos metu naudojami poliamido milteliai. Po gamybos proceso nepanaudoti milteliai yra pakartotinai panaudojami kitų gaminių spausdinimui.

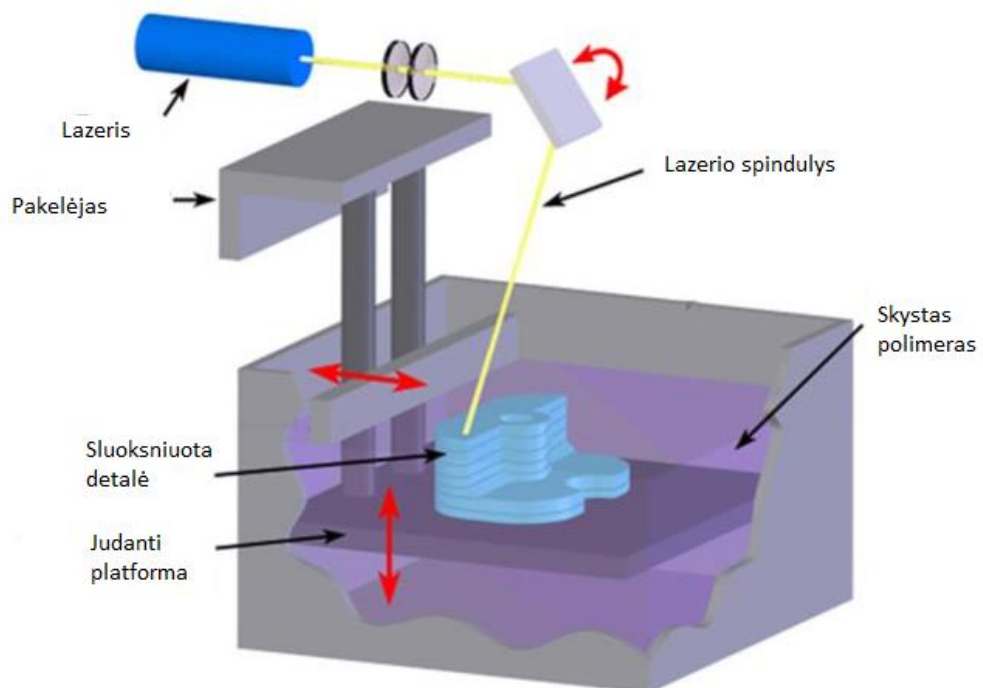
Lydzios medžiagos nusodinimas (FDM), tai procesas kurio metu gaminy formuojamas išpurškiant medžiagą, dažniausiai termoplastiką, pro spausdinimo galvutės antgalį, judantį X ir Y kryptimis sukuriant kiekvieną dvimatį sluoksnį. Kiekviename sluoksnyje du atskiri antgaliai išpurškia pagrindinę ir pagalbinę medžiagas [10].



2 pav. Lydžios masės nusodinimo schema [11]

2 paveiksle matoma schema, kaip veikia lydžios masės nusodinimas, spausdinimo metu. Į spausdinimo galvutę tiekama spausdinimo ir pagalbinė medžiagos. Galvutėje išlydyta medžiaga, jai judant X ir Y kryptimis išpurškiama, aukštis reguliuojamas spausdinimo platformai judant Z ašies kryptimi.

Stereolitografija (SLA), veikia labai artimu principu kaip ir lazerinis sukietinimas. Šiuo atveju lazeris sukietina ne miltelius, kurie yra sluoksnis po sluoksnio tiekiami į darbo zoną, o skystą fotopolimerą. Po kiekvieno sluoksnio sukietinimo gaminys slenka vis žemyn, kol pagaminamas visas gaminys ar modelis [12].



3 pav. Stereolitografijos schema [13]

3 paveiksle vaizduojama schema, kaip stereolitografijos gamybos proceso metu yra lazerio pagalba kietinamas skysto polimero sluoksnis. Sluoksnis po sluoksnio judanti platforma leidžiasi žemyn ir formuoja norimą gaminį.

### 1.1. Spausdinimui naudojamos medžiagos

Vienas iš svarbiausių komponentų 3D spausdinime yra tinkamų medžiagų panaudojimas. Norint pasirinkti tinkamiausią spausdinimo medžiagą būtina įvertinti jos - stiprumą, lankstumą, tikslumą ir specialias sąlygas, kurios būtinos, kad medžiaga būtų atspausdinama tinkamai ir tiksliai. ABS (akrilonitrilo butadienio stirenas) ir PLA (polilaktinė rūgštis) yra dvi medžiagų rūšys, kurias vartotojai dažnai renkasi pritaikymui praktikoje. Skirtumas tarp šių medžiagų nėra toks akivaizdus, kad būtų galima teigti, kuri yra geresnė. Labai abstrakčiai vertinant, ABS ir PLA yra termoplastikai. Termoplastikai tampa lankstūs ir tšūs kai yra šildomi ir įkaitinami, o tai leidžia juos formuoti į norimas formas iki atvėsimo. Be to, galima pakartoti procesą be jokios įtakos medžiagos vientisumui [14]. Nors abi medžiagos naudojamos spausdinimo operacijoje, ABS ir PLA skiriasi tam tikrais bruožais, todėl kai kurie spausdintuvai naudoja tik ABS, o kiti – PLA medžiagą. Pagrindis bruožas kuriuo šios dvi medžiagos išsiskiria yra jų lydymosi temperatūra. PLA plastikui ji siekia 180-230 °C, o ABS 210-260 °C. Toliau kiekviena medžiaga analizuojama atskirai.

### 1.2. ABS medžiagos savybės

ABS – tai dažnai naudojamas termoplastikas, kuris gaminamas polimerizuojant stireną ir akrilonitrilą polibutadieno aplinkoje. Tai stipri ir tvirta medžiaga, kuri pramonėje dažnai naudojama plastikinėms automobilių dalims, muzikos instrumentams gaminti. Labai žinoma injekcinio liejimo pramonėje, LEGO ir elektroninių detalių korpusų gamyboje. ABS turi aukštą lydymosi temperatūrą ir gali deformuotis atvėsimo po spausdinimo metu, todėl gaminiai gaminami iš ABS privalo būti spausdinami ant šildomo paviršiaus, o tai nėra funkcija, kurią turi visi namų sąlygomis naudojami spausdintuvai. Taip pat, spausdinant ABS reikalinga gera ventiliacija, kadangi spausdinimo metu susidarantys garai gali būti nemalonaus kvapo. Anksčiau išvardinti faktoriai lemia tai, kad ABS apsunkina paprastą spausdinimą savo malonumui namuose, tačiau tai yra labiau tinkanti medžiaga spausdinant profesionaliai [13, 14]. ABS termoplastiko mechaninės savybės pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. ABS termoplastiko mechaninės savybės.

Spalva	Balta
Lydymosi temperatūra	210 – 260 °C
Tempimas	30,3 MPa

Pailgėjimas	6%
Lenkimas	41 MPa
Tankumas	1,0 – 1,4 g/cm <sup>3</sup>
Biologiškai skaidomas	Ne
Stiklėjimo temperatūra	104°C
Gaminami gaminiai	LEGO, elektroninių detalių korpusai.

Lentelėje 1 pateikiami tik svarbiausi duomenys apie ABS medžiagą, platesnė techninė šios medžiagos informacija, charakteristikos ir mechaninės savybės pateikiamos priede 1.

### 1.3. PLA medžiagos savybės

PLA – tai biologiškai skaidoma medžiaga. Šis termoplastikas gaminamas iš atsinaujinančių išteklių, tokių kaip kukurūzų krakmolos ar cukranendrės, todėl šią medžiagą yra paprasčiau ir saugiau naudoti. Taip pat, ši medžiaga turi malonesnę kvapą nei ABS. Nors iš pirmo žvilgsnio PLA ir atrodo tinkamesnis pasirinkimas spausdinimui, tačiau ji turi daug mažesnę lydimosi temperatūrą, o tai reiškia, kad naudojant gaminius atspausdintus iš PLA rizikuojama juos deformuoti ar ištirpdyti, jeigu atspausdinti gaminiai naudojami mechaninėms operacijoms atlikti ar tiesiog laikomi aukšta temperatūra pasižyminčiose vietose. Tai vienas labiausiai žinomų bioplastikų, naudojamas daugelyje sričių, nuo plastikinių puodelių iki medicininių implantų, o taip pat su PLA pasiekiamas didesnis tikslumas ir susiduriama su mažesniu klaidų kiekiu spausdinimo eigoje [1].

Darbo metu naudojama ICE firmos PLA termoplastikas, skirtas aukštos kokybės detalių spausdinimui. Jis tvirtesnis ir mažiau trapus nei kiti PLA. Būtent šios rūšies tamsiai mėlyna PLA medžiaga gali būti spausdinama mažose temperatūrose, taip pat šios firmos PLA medžiaga mažai deformuojasi [15]. PLA mechaninės savybės pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė. PLA mechaninės savybės.

Spalva	Tamsiai mėlynas
Medžiagos tipas	Polilaktinė rūgštis
Ritės masė	750g.
Spausdinimo temperatūra	180-210°C
Lydimosi temperatūra	210°C (± 10°C)
Spausdinimo greitis	25mm/sec - 250mm/sec
Rekomenduojama spausdinimo pagrindo temperatūra	± 35 - 60 °C



Tempimo jėga	110-145 MPa
Tempimo modulis	33100 MPa
Atsparumas smūgiams	7,5 KJ/m <sup>2</sup>
Gaminami gaminiai	Puodeliai, plastikiniai maišai, vienkartiniai įrankiai.

Lentelėje 2 pateikiami tik svarbiausi duomenys ir fragmentai apie PLA medžiagą, platesnė techninė šios medžiagos informacija, charakteristikos ir mechaninės savybės pateikiamos priede 2.

#### 1.4. Mechaninių savybių tyrimai

##### 1.4.1. Gaminų sutvirtinimas epoksidine derva ir stiklopluoštu

Bandymo tikslas - pagaminti 3D spausdintą detalę ir sutvirtinti jos vidų derva su stiklo pluoštu. Proceso metu stiklo pluoštas karpomas mažais gabalėliais ir tiesiamas detalės viduje kaip pagrindas. Tada derva maišoma ir po truputį pilama ant stiklo pluošto esančio detalės viduje. Toks gamybos procesas imlus laikui, nes reikia užpildyti gaminio vidų derva ir stiklo pluoštu, taip pat būtina leisti dervai sukietėti. Galutinis rezultatas atskleidė, kad sukietėjusi derva tapo kieta ir pagaminta detalė pasižymi didesniu stiprumu, nei tik 3D spausdintuvu pagaminta detalė [16].

Dervai sukietėjus, 3D modelio išorinis paviršius buvo lengvai pašalintas, nors eksperimento eigoje, tai nebuvo planuota, tačiau tai neturėjo jokios neigiamos įtakos eksperimento rezultatams, išskyrus tai, kad pasikeitė detalės matmenys. Nuėmus išorinį 3D spausdintą paviršių, gaminio matmenys sumažėjo. Darbo pabaigoje rekomenduojama palikti skylių ir griovelių modelyje, kurie nebūtų užpildyti epoksidine derva, tokiu būdu gaminys pagaminamas mažesnės masės ir sutaupoma gamybai reikalingų medžiagų.

##### 1.4.2. Spausdinimo medžiagos stiprumo bandymas

Bandymo metu buvo spausdinamas karabinas, kurio dydis buvo lyginamas su tokio paties tipo karabinu pagamintu iš aliuminio. Norint panaikinti kuo daugiau kintamųjų spausdinimo metu, naudojamas tas pats Rostock Max by SeeMeCNC spausdintuvas, su tokiais pat spausdinimo parametrais. Bandymo parametrai pateikiami 3 lentelėje.

3 lentelė. Bandymo parametrai.

Galvutės diametras	0,4 mm
Sluoksnio aukštis	0,25 mm
Užpildymas	50%

Stiprumas matuojamas kiekvieną karabiną pritvirtinant prie skriemulio, kuriuo buvo tempiama kol karabinas neatlaikydavo ir lūždavo. Eksperimento duomenys pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. Eksperimento duomenys.

Filamentas(medžiaga)	Didžiausia jėga, N	Žemiausia jėga, N	Vidurkis, kg
MATTERHACKERS PETG	101,019	72,933	82,446
MATTERHACKERS PLA	83,352	53,907	69,762
MATTERHACKERS PRO ABS	128,652	94,677	101,019
MATTERHACKERS NYLONX	184,824	127,293	164,892
PLYCARBONATE	187,995	175,764	185,277
TAULMAN NYLON 645	72,48	53,454	58,437
WET TAULMAN NYLON 645	51,189	-	-
MARKFORGED NYLON W/FIBERGLASS	168,516	74,745	121,404
MARKFORGED NYLON W/CF	160,815	155,379	158,097
COLORFABB XT CF	120,498	91,959	116,421

Taulmman 645 medžiaga buvo vienintelė kuri nesulūžo, tačiau deformavosi ties pačia mažiausia jėgos riba, lyginant su visais kitais bandiniais. PETG neatlaikė vėliau nei PLA ir yra lengviau spausdinama nei ABS, todėl PETG yra labai gera bendros paskirties medžiaga spausdinimui. Galutinai nuspręsta, kad geriausiai tokio tipo spausdinimui tinka NylonX medžiaga. Ji tvirta, lengvai spausdinama, atlaiko pakankamas apkrovas ir turi puikų paviršiaus išbaigimą po spausdinimo [18].

#### 1.4.3. Mechaninių savybių tikrinimas, spausdinant 3D detales atvirojo tipo spausdintuvu

Mechaninių savybių nustatymui spausdinant PLA ir ABS medžiagomis naudojamas tas pats STL failas, tačiau pasirenkami kiti spausdinimo parametrai ir kiti spausdinimo įrenginiai. Įrenginiai pasirinkti atvirojo tipo. STL failas buvo patalpintas svetainėje, iš kurios bet kas galėjo atspausdinti bandinius ir juos atsiųsti tyrėjams. Buvo surinkta 10 bandinių, kurių parametrai skyrėsi, pagal 5 lentelėje pateikiamus duomenis.

5 lentelė. Pateikiamos spausdinimo galimybės.

Modelio struktūros orientavimas °	0/90, +45/-45
Sluoksnio aukštis	0,4; 0,3; 0,2;
Užpildymas	100%

Šiais parametrais buvo spausdinama skirtingais atvirojo tipo spausdintuvais: originaliu Mendel RepRap, Prusa Mendel RepRap, Luzbot Prusa RepRap, MOST RepRap. 6 lentelėje pateikiami duomenys, kuriuose nurodoma kokių spausdinimo įrenginių buvo spausdinama pasirinkta medžiaga.

6 lentelė. Spausdintuvų naudotos medžiagos.

Nr.	Tipas	Filamentai (medžiagos)
1	MOST RepRap	Natūralus ABS, skaidrus PLA
2	Luzbot Prusa Mendel RepRap	Natūralus ABS, violetinis PLA, baltas PLA
3	Prusa Mendel RepRap	Juodas PLA
4	Original Mendel RepRap	Natūralus PLA

Bandymai buvo atliekami Instron 4468 mašina tikrinant bandinių stiprumą. Dauguma bandinių neatlaikė tempimo didesnio pailgėjimo ribose nei matuoklio rodmenys, todėl kad buvo naudojamas tik 2 colių pailgėjimo matuoklis. Todėl tikslūs duomenys buvo surinkti tik apie maksimalų stiprumą.

Mechaninės ABS ir PLA komponentų savybės, naudojant atvirojo tipo RepRap spausdintuvus, buvo charakterizuojamos standartiniu stiprumo bandymu. Bandymai parodė, kad vidutinė tempimo jėga, gaminius spausdinant RepRap spausdintuvu, yra 28,5MPa ABS medžiagai ir 56,6MPa PLA. Vidutinis tamprumo modulis ABS medžiagai siekia 1807MPa, o PLA 3368MPa. Šie rezultatai leidžia teigti, kad gaminiai, spausdinti su įrenginiu RepRap, yra stiprumu ir tamprumo modulių lyginami su 3D gaminiais, spausdintais komerciniais 3D spausdintuvais, nors būtina atsižvelgti į individualaus spausdintuvo nustatymus, tarnavimo laiką ir medžiagos kokybę. Didelio stiprumo gaminiai gali būti gaminami atvirojo tipo 3D spausdintuvais neperžengiant jų mechaninių savybių ribos [20].

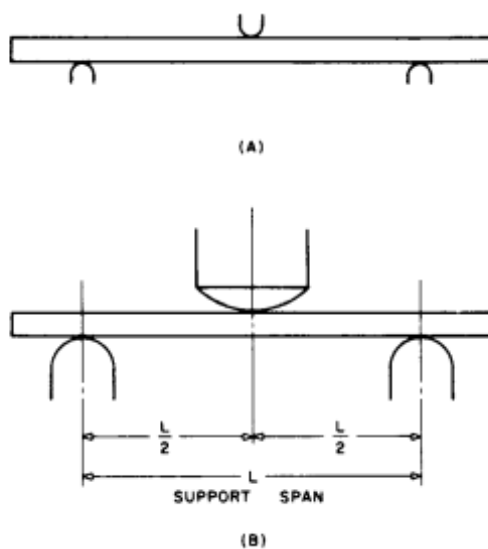
### 1.5. Tarptautiniai standartai

Lenkimo bandymo metu išmatuojama jėga, reikalinga perlaužti strypui (bandiniui), trijų taškų lenkimo sąlygomis. Šie duomenys naudojami medžiagų pasirinkimui, iš kurių pagaminti bandiniai atlaikytų tam tikras apkrovas nesusilenkę. Lenkimo modulis naudojamas kaip indikatorius, norint išsiaiškinti (ištirti) medžiagos standumą lenkimo metu. Kadangi daugumos medžiagų fizinės savybės (ypatingai termoplastikų) gali varijuoti (skirtis) ir priklausyti nuo aplinkos sąlygų, kartais yra naudinga tirti medžiagas tokioje temperatūroje, kokioje jos bus eksploatuojamos po pagaminimo.

### 1.5.1. ASTM D790 standartas

ASTM grupė pateikia detalų paaiškinimą, kaip atlikti lenkimo bandymą, kurio metu stačiakampio profilio gaminys pastatomas ant dviejų atramų ir iš viršaus apkraunamas jėga vidurinėje gaminio dalyje tarp atraminių taškų. Bandinys yra lenkiamas ir deformuojamas, kol pasiekama 5% deformacijos riba, įlinkis [17].

Lenkimo bandymas atliekamas trijuose taškuose, tačiau skirtingais būdais. Pirmuoju atveju lenkimas vykdomas trimis vienodo spindulio taškais, o antruoju atveju lenkiamas dviem vienodais taškais atraminėje gaminio pusėje ir vienu dvigubai didesniu spindulio tašku priešingoje gaminio pusėje (4 pav. ).



4 pav. Trijų taškų lenkimo bandymo staklės. A – kai visi trys taškai vienodo spindulio, B – kai du taškai vienodi, o trečias dvigubai didesnis [17].

Praktikoje įprasta naudoti tokį būdą, kai bandinys yra paguldytas ant atramų, o apkrova iš kitos pusės spaudžia bandinį jo centre, tokiu būdu sukuriama trijų taškų lenkimas nurodytu greičiu. Pagrindiniai parametrai eksperimento atlikimui: ilgis tarp atramų; apkrovimo jėga; greitis; maksimalus įlinkis, nuokrypis. Šie parametrai priklauso nuo bandinio, jo storio ir yra skirtingai apibūdinami ASTM ir ISO. ASTM D790 standartas stačiakampį bandinį apibūdina matmenimis: 3,2 mm x 12,7 mm x 125 mm. ISO 178 bandinį apibūdina matmenimis: 10 mm x 4 mm x 80 mm [12]. Bandymui sėkmingai atlikti pagal standartuose nurodytus kriterijus, reikia turėti 5 vienetus bandinių, kad atliekami tyrimai būtų pakankamai tikslūs, o gauti rezultatai patikimi.

### 1.5.2. ISO 178 standartas

ISO tai tarptautinė organizacija atsakinga už nacionalinius standartus. Darbas atliekamas ruošiant šiuos tarptautinius standartus dažniausiai atliekamas ISO techninio komiteto. Kiekvienas

organizacijos narys yra atsakingas už tam tikros srities standartų pateikimą ir užtikrinimą tinkamiausių rezultatų pasiekimui. ISO 178 standartas tiksliai apibrėžia metodą skirtą nustatyti standaus (kieto, nelankstaus) arba pusiau standaus plastiko savybes apibrėžtomis sąlygomis. Standartinis bandinys yra apibrėžiamas šiuose standartuose, taip pat pateikiami parametrai, alternatyvaus bandinio matmenims, kuris naudojamas tam tikromis sąlygomis. Kartu su visomis sąlygomis pateikiamas ir bandymo greičių diapazonas.

Metodas tinkamas taikyti, su išvardintomis medžiagomis:

- Termoplastikais;
- Termoreaktingomis liejimo medžiagomis;
- Sutarimu tarp ISO 10350-1 ir ISO350-2 tarptautiniai standartai tinka ir pluoštais sustiprintiems junginiams, kurių pluošto ilgis  $\leq 7,5\text{mm}$ , prieš apdirbimą. Ilgais pluoštais sustiprintiems bandiniams (laminatams), kurių pluošto ilgis  $> 7,5\text{ mm}$ .

Bandymo metu geriausia naudoti numatytų matmenų bandinius. Tyrimas, kurio metu naudojami kitokių matmenų bandiniai arba bandiniai, kurie yra visiškai identiški, gali sugeneruoti rezultatus, kurie tarpusavyje negali būti palyginami. Kiti svarbūs veiksniai, kaip bandymo greitis ir bandymų sąlygos, taip pat gali turėti įtakos galutiniams rezultatams. Ypatingai pusiau kristaliniai polimerai, orientuoto sluoksnio storis, kuris priklauso nuo liejimo sąlygų ir storio, turi įtakos lenkimo savybėms. Dėl tos priežasties, kai reikalingi duomenys, kurie bus naudojami palyginimui, visi anksčiau išvardinti faktoriai turi būti atsakingai ir atidžiai kontroliuojami ir sekami.

Lenkimo savybės gali būti naudojamos tik inžinerinio dizaino tikslais, siekiant ištirti medžiagų su tiesinio spaudimo ar deformacijų pokyčiais. Netiesinei elgsenai lenkimo savybės yra tik nominalios. Lenkimo bandymas turėtų pirmenybę skirti trapioms medžiagoms, kurioms sudėtinga atlikti tempimo bandymus.

Tarptautinio standarto tikslui, toliau apibrėžiami terminai ir sąlygos reikalingos eksperimento atlikimui.

$v$  – eksperimento atlikimo greitis, atitinkamo judesio norma tarp suporto ir apkrovimo briaunos, matuojama mm/min.

$\sigma_f$  – nominalus išorinio paviršiaus įtempis viduriniame taške. Matuojamas *MPa*.

$\sigma_{fb}$  – lenkimo įtempis ties bandinio lūžio riba. Matuojamas *MPa*.

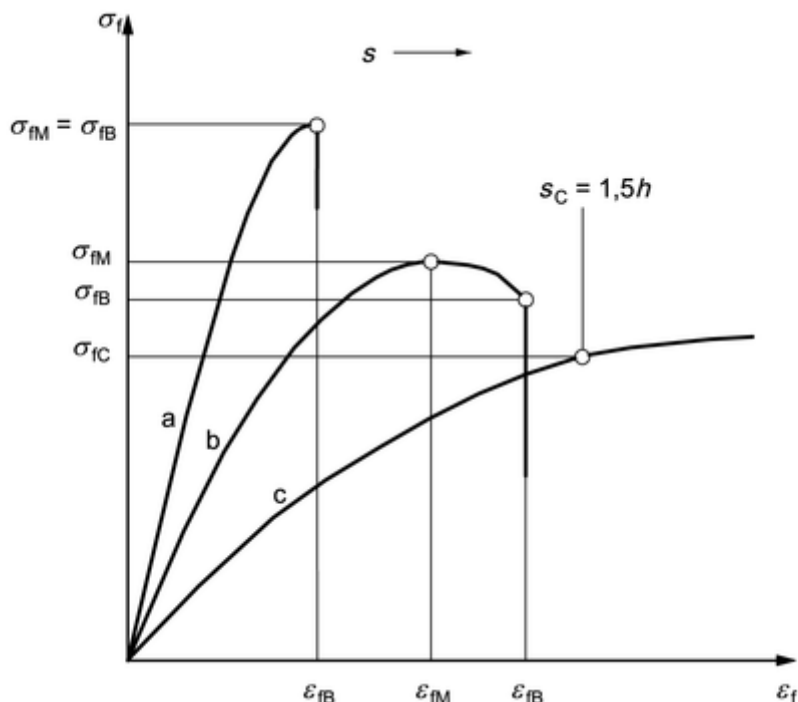
$\sigma_{fm}$  – maksimalus lenkimo įtempis atlaikomas bandinio eksperimento metu. Matuojamas *MPa*.

$\sigma_{fc}$  – lenkimo įtempis įprastinės deformacijos metu. Matuojamas *MPa*.

$s$  – poslinkis, per kurį bandinio viršus arba apačia viduriniame taške nukrypsta iš savo pradinės pozicijos lenkimo metu. Matuojamas *mm*.

$s_c$  – įlinkis, kurio dydis 1,5 karto didesnis už bandinio storį  $h$ . Matuojamas  $mm$ .

Suporto atramų atstumas  $L$  yra lygus  $64\text{ mm}$ , įprastinė deformacija atitinka lenkimo apkrovą  $3,5\%$ .



5 pav. Lenkimo įtempių  $\sigma_f$  ir lenkimo įtampimų  $\varepsilon_f$  bei deformacijų grafikas.

5 pav. skirtingose dalyse vaizduojami skirtingi rezultatai pasiekiami lenkimo bandymo metu. a) Bandinys, kuris lūžta nepasiekęs maksimalių įtempių (trapus). b) Bandinys, kuris pasiekia maksimalią ribą ir lūžta nepasiekias 1,5 karto didesnio įlinkio nei storis (pusiau lankstus); c) Bandinys, kuris nepasiekia maksimalių reikšmių ir nelūžta kol nepasiekia 1,5 karto didesnio įlinkio, nei bandinio storis (lankstus) [16].

Pagrindinis skirtumas tarp ISO 178 ir ASTM D790 yra tai, kad eksperimento metu, skiriasi naudojamų bandinių matmenys:

- ASTM –  $3,2\text{ mm} \times 12,7\text{ mm} \times 125\text{ mm}$
- ISO –  $10\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ .

Taip pat remiantis ISO 178 standartais bandinys yra lenkiamas kol sulūžta, bandiniui nelūžus tyrimas tęsiamas tiek kiek įmanoma ir jėga ties  $3,5\%$  (standartinio įlinkio) yra pažymima (užregistruojama). ASTM D790 eksperimentas tęsiamas tol kol pasiekiamas  $5\%$  įlinkis.

## 1.6 Epoksidinė derva

Epoksidinė derva tai skystoje formoje esantysjos komponentai arba sukietėjęs galutinis produktas. Epoksidinė derva dar kitaip žinoma, kaip polioksidas. Tai klasė reaktyvių prepolimerų ir polimerų,

kuriuose yra epoksidinių grupių. Epoksidinės dervos gali reaguoti tarpusavyje katalizinės homopolimerizacijos metu. Arba su plačiu kiekiu bendrų reagentų tokių, kaip polifunkciniai aminai, rūgštys, fenoliai, alkoholiai ir tioliai. Tioliai priklauso organinių junginių grupei, prie anglies atomo jie turi –SH grupę, todėl dažnai įvardinami, kaip merkaptanai. Ši organinių junginių grupė dažnai pritaikoma biomedicinoje, lygų gydymo metu [21, 22].

## **2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS**

Bandymai, susiję su sparčiųjų prototipų gamyba arba 3D spausdinimu, didžiąją laiko dalimi siejami su jų anizotropinių savybių analize ir įvertinimu, o bandymų tikrinančių jų lenkimo ir slėgio savybes yra atlikta nedaug, tačiau šios savybės taip pat yra nemažiau svarbios gaminiui.

Atliktais tyrimais bus siekiama išsiaiškinti, kokią įtaką spausdintiems gaminiams turi vakuumavimas dervose, naudojant skirtingus kietiklius. Vakuumavimu siekiama sustiprinti vidinę gaminio struktūrą užpildant viduje esančius oro tarpelius epoksidine derva su kietikliais. Kadangi impregnavimo metu paveikiama ne tik vidinė, bet ir išorinė gaminio dalis, todėl pagerėtų gaminio lenkiamasis atsparumas.

Tyrimais bus siekiama įvertinti ir 3D spausdintų gaminių įmirkytų dervoje pralaidumą slėgiui, todėl būtent tam tikslui suprojektuoti, gaminiai po įmirkymo dervoje, bus naudojami kaip slėginio indo dangteliai, kur bus nustatoma ar užpildžius oro ertmes epoksidine derva su kietikliu gaminys gali atlaikyti slėgio įtaką, ypač dėl to, kad impregnavimo metu visas gaminys yra panardinamas dervoje, o tokiu būdu ne tik užpildomi vidiniai oro tarpeliai, bet ir visas gaminys yra sandarinamas iš vidaus ir išorės.

Epoksidinė derva, būdama skysta, turi patekti į visus oro tarpelius, esančius gaminyje, nes po tam tikro laiko ji sukietėja, todėl derva sutvirtintų spausdinimo sluoksnius ir gijas, tai turėtų įtakos stipriui lenkimo bandymo metu. Užpildžiusi gaminio sluoksnius derva ne tik suteikia tvirtumo, bet užpildo visas kiaurymes ir suteikia gaminiui sandarumo.

Pagrįsti šioms hipotezėms 3D spausdintuvais buvo pagaminti eksperimentiniai bandiniai. Dalis bandinių skirti lenkimo bandymams, o kita dalis slėgio pralaidumui įvertinti. Visi minėti gaminiai impregnuoti dervoje, naudojant skirtingus kietiklius, pasinaudojant vakuumavimo kamera.

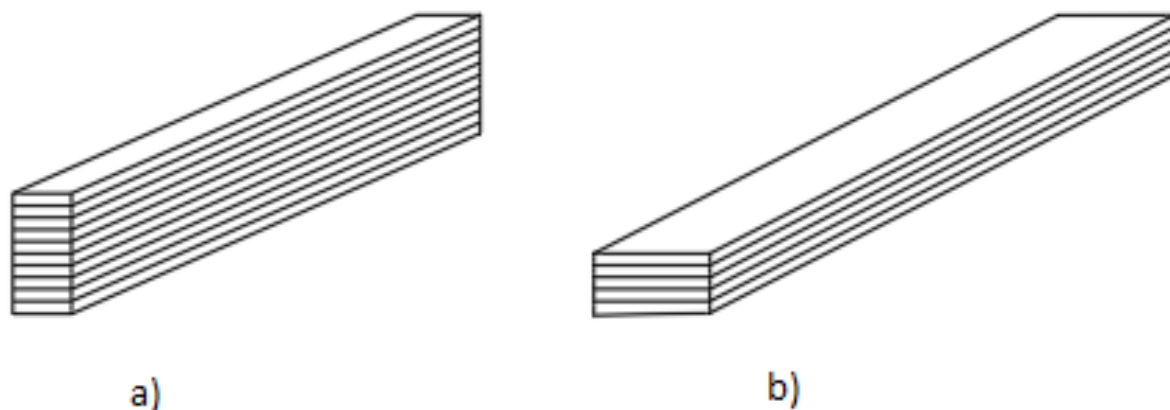
### **2.1. Gamybai naudojamos medžiagos**

Bandiniai, kurių gabaritiniai matmenys yra 80 mm x 10 mm x 4 mm, atspausdinti dviem spausdinimo įrenginiais „Dimension BST 768“ ir „Ultimaker<sup>2</sup>“. Naudojamos bandinių spausdinimo medžiagos yra ABS ir PLA, prieduose 1 ir 2 pateikiamos šiu medžiagų mechaninės savybės.

Tyrimo metu naudojama po 6 vnt. bandinių, kurie spausdinami skirtingais spausdinimo būdais. Vadinasi, dalis bandinių spausdinami pastatymui naudojant plačiąją briauną, o dalis naudojant plonąją briauną (3 pav.). Pastatymui naudojant pačią siauriausią briauną, bandiniai nebuvo spausdinami, atsižvelgiant į tai, kad jų mechaninės savybės tokiu spausdinimo būdu yra pačios



prasčiausios, o toks spausdinimo būdas praktikoje yra vengiamas. Taip pat, spausdinant tokiu metodu, beveik nelieka kiaurymių, todėl nėra oro tarpų, kuriuos galėtų užpildyti derva.



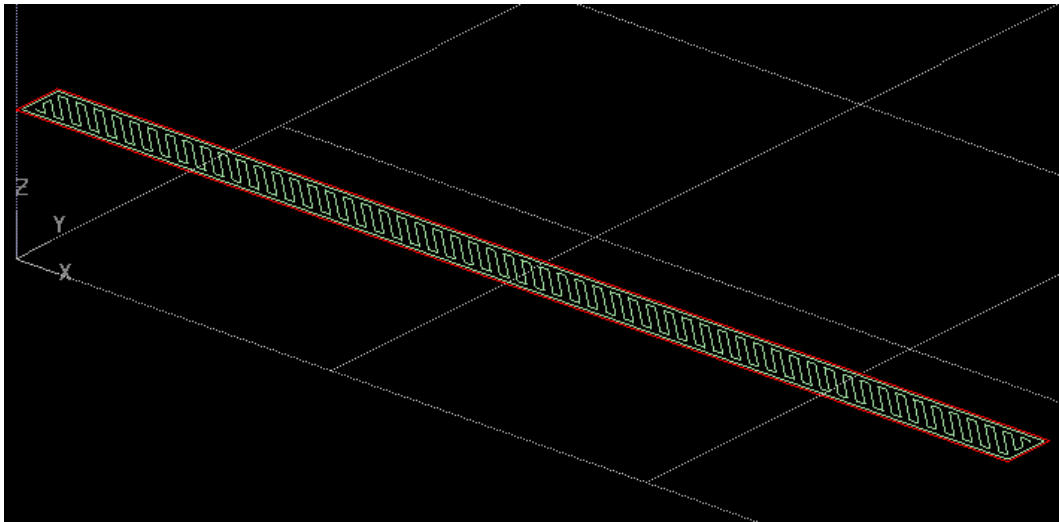
6 pav. Spausdinimo sluoksnių išsidėstymas pagal pastatymo plokštumą. a) pastatymui naudojama siauroji briauna; b) pastatymui naudojam plačioji briauna.

6 pav. pateikiama grafinė schema, kurioje vaizduojamas sluoksnių išdėstymas spausdinimo metu. 6 pav. a) dalyje vaizduojamas pastatymas siaurąja bandinio briauna, o b) dalyje pastatymas plačiąja bandinio briauna. Bandiniai po spausdinimo operacijos ir duomenų lentelėse atskirti prie jų skaičiaus pažymint ženklą, apibūdinantį bandinio spausdinimo būdą:

- Siaurąja briauna pastatyti bandiniai žymimi „+“
- Plačiąja briauna pastatyti bandiniai žymimi „|“

Bandinių spausdinimas varijuoja ne tik dėl jų spausdinimo būdo skirtumo, bet ir dėl spausdinimo parametrų, todėl dalis bandinių buvo spausdinami naudojant sluoksnio storį 0,3 mm 0,254 mm ir 75 % bei 50 % užpildymą (PLA bandiniamas) ir naudojant 0.3 mm 0.254 mm sluoksnio storį, kartu su užpildymu „Sparse“ pasirenkant, kad tai yra  $\approx 75\%$  (ABS bandiniams).

Spausdinimo metu galima matyti, kaip spausdinimo galvutė judės viso gamybos proceso metu rikiuodama sloksnius ir jų išsidėstymą. Priklausomai nuo to galima atlikti pakeitimus ir pakeisti modelio struktūrą jo viduje, padidinti sluoksnio storį ar pakeisti užpildymą. Taip pat priklausomai nuo modelio pastatymo ant spausdinimo stalo skiriasi ir sluoksnių išdėliojimas. Sugeneruotas modelio vaizdas pateikiamas 7 pav.



7 pav. Spausdinimo galvutės judėjimo trajektorija

7 paveiksle matome „Dymension BST 768“ spausdintuvo programinės įrangos sugeneruotą modelio vaizdą. Paveiksle vaizduojamas spausdinimo galvutės kelias ir trajektorija. Spausdinimo metu sluoksniai kryžiuojami tarp vieno ir kito sluoksnio vijų sudaromas  $90^\circ$  laipsnių kampas. Užpildymui naudojant „Sparse“ pasirinkimą sunaudojamas mažesnis medžiagos kiekis gaminio gamybai, sutrumpėja gamybos laikas ir tokiu būdu tarp formuojant sluoksnius atsiranda oro tarpeliai, kuriuos gali užpildyti skysta derva.

Bandiniai įmirkymo metu yra vakuumuojami, taip siekiama pagerinti įsigėrusios dervos kiekį, kuris užpildytų tuščius oro tarpelius bandinyje. Impregnavimui naudojama epoksidinė derva „Epoxy Reisin L UN 3082“ kartu su dviem skirtingais kietikliais „Hardener L UN 2735 L“ ir „Hardener EPH 500“. Techninės medžiagų charakteristikos pateiktos prieduose 3, 4, 5.

Dangtelių gamyba priklauso nuo turimo slėginio indo, šiuo atveju naudojamas metalinis indas pagamintas iš juodo plieno DC01 3 mm storio. Prie vamzdžio privirinamas dugnas, apatinėje jo dalyje, ir tvirtinimo rėmelis - viršutinėje jo dalyje. Kadangi virinimo operacija užtikrina sandarumą, pagal gautus indo matmenis pagaminama atitinkama guminė tarpinė ir dangtelis iš minėtų plastikų ABS ir PLA.

## 2.2. Spausdinimo parametrų pasirinkimas

Spausdinant skirtingas medžiagas ir skirtingais spausdinimo įrenginiais, buvo pasirinkti skirtingi spausdinimo parametrai.

### Lenkimo bandymui trijuose taškuose pasirinkti spausdinimo parametrai

Parametrai parenkami spausdinant ABS medžiagą:

- 1) spausdinimo sluoksnio storis – 0,254 mm, modelio užpildymas – „Sparse“ ( $\approx 75\%$ );

- 2) spausdinimo sluoksnio storis – 0,3302 mm, modelio užpildymas – „Sparse“ (  $\approx 75\%$  ).

Parametrai parenkami spausdinant PLA medžiagą:

- 1) spausdinimo sluoksnio storis – 0,246 mm, modelio užpildymas 75 %;
- 2) spausdinimo sluoksnio storis – 0,3 mm, modelio užpildymas 50 %.

Spausdinimo būdas, kurio metu modelis visiškai užpildomas pagalbine medžiaga, nebuvo taikomas, nes tokio spausdinimo metu nebelieka bandinio viduje tuščių ertmių, kurias galėtų užpildyti epoksidinė derva, tokiu atveju derva tik padengtų išorinį bandinio paviršių, ir neturėtų jokios įtakos bandinių mechaninėms savybėms. Tam tikrais atvejais, net spausdinant pastatymui naudojant plonąją briauną, kilo sunkumų dervai įsigerti į tuščius oro tarpelius, nes jų tiesiog nebuvo.

### **Slėgio tikrinimo bandymui pasirinkti spausdinimo parametrai**

- 1) ABS plastiko dangteliui pasirenkamas

Spausdinimo sluoksnio storis – 0,3302 mm, modelio užpildymas – „Sparse“ (  $\approx 75\%$  );

- 2) PLA plastiko dangteliui pasirenkamas

Spausdinimo sluoksnio storis – 0,3 mm, modelio užpildymas 50 %.

### **2.3. Įmpregnavimas vakuminėje kameroje, matavimai ir eksperimentų metodika**

Eksperimento metu naudojama skystos būsenos derva „UN 3082“, jos technines charakteristikose rašoma, kad geriausias pasiekiamas sukietėjusios dervos rezultatas po impregnavimo, kai derva po sukietėjimo nėra papildomai kaitinama. Tai gali tik sumažinti dervos pasiekiamą stiprumo ribą. Dervos kietėjimo duomenys su naudojamais kietiklaisi „EPH500“ ir „L“ pateikiami 6 priede.

Eksperimento metu, siekiant kuo didesnio dervos įsigėrimo, bandiniai, paruošus dervą su kietikliu, buvo joje panardinami. Po įmerkimo į dervą iš karto buvo dedami į vakuuminę kamerą. Vienu metu buvo merkiama po 24 vnt. bandinių. Tokiu tikslu siekiama, kad derva kuo tolygiau įsigertų ir būtų sunaudojama kuo mažiau medžiagų, reikalingų merkimo procesui atlikti. Vakuuminėje kameroje bandiniai buvo laikomi 30 hPa slėgio aplinkoje. Vakuumavimo laikas priklausė nuo kietiklio savybių. Jei stingimo laikas 40 min, tai vakuumavimas truko trumpiau, atsižvelgiant į tai, kad bandinius privaloma nuvalyti ir išimti iš dervos, kol jie visiškai nesukietėjo. Pagal pasirinktus kietiklius vakuumavimas truko 35 ir 55 min, kietiklio EPH 500 stingimo laikas yra 60 min, o kietiklio L – 40 min. Po vakuumavimo bandiniai buvo nuvalomi, kad būtų pašalintas dervos perteklius ir sudėliojami iš eilės, kad būtų lengva juos atskirti, pagal sužymėjimą, ir paliekami džiūti. Bandiniai visiškai sukietėjo ir išdžiūvo per tolimesnes 24 valandas po vakuumavimo proceso.



8 pav. Bandiniai iš ABS ir PLA medžiagų paruošti impregnavimui

8 paveiksle, parodyta, kaip bandiniai buvo sudėti indelyje prieš impregnavimą. Kairėje paveikslo pusėje a) pavaizduoti bandiniai jau sudėti į impregnavimo indą, o b) – prieš impregnavimą sudėti į laikiklius, kurie buvo suprojektuoti impregnavimo operacijai atlikti. Vienu metu buvo merkami ABS ir PLA medžiagų bandiniai. Kaip galima matyti iš pateikto paveikslo, dalis bandinių yra indo viršutinėje dalyje, o dalis apatinėje. Taip pat buvo suprojektuoti ir pagaminti laikikliai, kurie paliktų pakankamus tarpus, tarp bandinių, kad derva, su skietikliu, impregnavimo metu galėtų įsigerti.

Matavimas, tai viena iš svarbiausių eksperimento dalių. Bandinių matavimas buvo atliekamas ne vieną kartą. Po spausdinimo kiekviena detalė buvo matuojama individualiai, suteikiant jai išskirtinį žymėjimą, kad matavimo rezultatus būtų galima palyginti kiekvienam bandiniui individualiai, todėl iškart po spausdinimo buvo matuojamas kiekvieno bandinio ilgis, plotis, storis ir masė. Atlikus merkimą, kiekvienas bandinys vėl buvo išmatuojamas, siekiant įvertinti kiek pakito gabaritų matmenys bei masė. Bandinių ilgis, plotis ir storis, buvo matuojami slankmačiu „Tengtools“  $\pm 0,05$  mm, masė buvo matuojama svarstyklėmis „JS-100xV“  $\pm 0,01$  g. Lenkimo bandymo metu matavimai buvo atliekami naudojant lenkimo mašiną „Tinius Olsen“ H25TK. Naudotas jėgos keitiklis, kurio galingumas 1000 N, S/N 1883746. Taip pat, naudota kompiuterinė programa „Horizon“ lenkimo nustatymams pasirinkti ir galutiniams duomenims apdoroti.

Slėgio bandymas buvo atliekamas naudojant „Metabo“ Basic 250-24 W OF oro kompresorių, sugeneruoti slėgiui indo viduje, ir mechaniniu monometru „Oficine Rigamonti OR EN 837-1“, įvertinti slėgio kiekiui ir jo kitimui. Matuojant dangtelių masę, buvo naudojamos svarstyklės „KERN FCB 30K1“  $\pm 0,5$  g.

## Trijų taškų lenkimo bandymas

Atspausdinti bandiniai, kurių matmenys 80 mm x 10 mm x 4 mm. Kiekvienas bandinys išmatuojamas individualiai ir pasveriamas. Po kiekvieno matavimo bandinys yra pažymimas, pagal spausdinimo būdą ir eilės numerį, toliau bandiniai merkami į dervą su skirtingais kietikliais L arba EPH 500. Lenkimo bandymo metu, siekiama patikrinti įmirkytų bandinių atsparumą lenkimui. ABS plastiko lenkimo stiprio riba, pagal mechanines savybes, yra 41 MPa, kietiklio L stiprio riba siekia 111 MPa. Po merkimo dervoje ir lenkimo tikimasi pasiekti  $\approx 80$  MPa stiprumo ribą. Iš ABS plastiko dervoje su kietikliu EPH 500 įmirkytiems bandiniams tikimasi pasiekti  $\approx 140$  MPa ribą, nes EPH 500 kietiklio stiprumo riba lenkiant yra 240 MPa.

PLA plastiko stiprio riba 103 MPa, tačiau tokia riba pasiekama naudojant bandinius, kurių užpildymas yra 100 %, tai leidžia manyti, kad siekiama stiprumo riba esant 75 % užpildymui yra apytiksliai lygi  $\approx 77$  MPa, todėl atsižvelgiant į jau paminėtas kietiklių L ir EPH 500 stiprio ribas, tikimasi pasiekti stiprumą su kietikliu L 90 MPa, su kietikliu EPH 500 150 MPa. Po įmirkymo dervoje bandiniai nuvalomi ir paliekami džiuoti ir visiškai sukietėti 24 valandoms. Toliau bandiniai yra lenkami, kiekvieno bandinio lenkimo rezultatai yra fiksuojami ir suvedami. Žemiau pateikiama formulė, kurios pagalba suskaičiuojama stiprumo riba lenkiant.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$\sigma$  – išorinio sluoksnio jėga viduriniame taške, MPa

P – jėga duotajame taške, N.

L – atstumas tarp atramų, mm.

b – tiriamo bandinio skerspjūvio plotis, mm.

d – tiriamo bandinio aukštis, mm.

## Slėgio tyrimas

Atsižvelgiant į tai, kad derva su kietikliu užpildo vidinius bandinių sluoksnius ir padengia bandinį dervos sluoksniu iš išorės, galima manyti, kad toks gaminys yra sandarus. Tokiai hipotezei ištirti, bus atliekamas slėgio tyrimas. Pagal pagamintą slėginį indą suprojektuojami ir pagaminami dangteliai, jam uždengti ir užsandarinti. Tyrimo metu dangteliai merkami į dervą su kietikliu ir paliekami visiškai išdžiūti. Merkimo metu tikimasi, kad kartu vakuumuojant derva bus užpildytas visas dangtelių vidus ir tai sukurs pakankamai sandarų gaminį. Atlikus merkimą dangteliai varžtais, veržlėmis ir poveržlėmis bus pritvirtinami prie slėginio indo, tada prie šone esančio monometro su kranu pritvirtinamas slėgio padavimo siurblys. Numatytas slėgis, suteikiamas indui, yra 4 atm. Suteikus indui slėgį, nuimamas laikas ir stebimi monometro duomenys.

### 3. TYRIMO APIBENDRINIMAS

#### 3.1. Spausdintų bandinių matavimai

Po spausdinimo operacijos bandiniai buvo sužymimi ir išmatuojama jų masė, ilgis, plotis ir storis. Atlikus impregnavimą dervoje, naudojant kietiklius ir vakuumavimo kamerą, bandiniai po visiško išdžiūvimo ir sukietėjimo buvo pakartotinai matuojami. Matavimų rezultatai prieš ir po pateikiami 7 – 10 lentelėse. Pateikiamos lentelės yra tik fragmentas, likę lentelių 7 – 10 duomenys pateikiami prieduose 7 - 10.

7 lentelė ABS bandinių plačiaja briauna matavimai

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Spausdinti bazuojant plačiaja briauna   ABS (balti)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	2,23	80,01	10,08	4,1	1	2,64	80	10,24	4,18
2	2,22	80,08	10,07	4,08	2	2,41	80,15	10,18	4,17
3	2,22	80,08	10,06	4,1	3	2,48	80,11	10,15	4,19
4	2,21	80,07	10,08	4,1	4	2,48	80,29	10,1	4,2
5	2,22	80,02	10,03	4,08	5	2,45	80,08	10,21	4,22
6	2,22	80,02	10,05	4,03	6	2,35	80,09	10,2	4,26
1	2,22	80,09	10,09	4,09	1	2,46	80,16	10,24	4,28
2	2,23	80	10,06	4,08	2	2,41	80,05	10,22	4,21
3	2,21	80,02	10,08	4,11	3	2,34	80,08	10,24	4,22
4	2,23	80,08	10,08	4,06	4	2,36	80,21	10,2	4,23
5	2,22	80	10,1	4,1	5	2,48	80,04	10,23	4,21
6	2,21	80,06	10,05	4,08	6	2,34	80,17	10,18	4,2

7 lentelėje pateikiami bandinių, spausdintų iš ABS plastiko, bazuojant juos plačiaja briauna, matavimų duomenys. Lentelėje pateikiamas masės, ilgio, pločio ir storio pokytis prieš ir po įmirkymo tam tikroje dervoje.

8 lentelė ABS bandinių matavimai, plonąja briauna

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Spausdinti bazuojant plonąja briauna + ABS (balti)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	3,16	80,07	10,1	4,06	1	3,39	80,2	10,27	4,17
2	3,19	80,06	10,04	4,06	2	3,43	80,09	10,34	4,18
3	3,18	80,06	10,04	4,02	3	3,36	80,1	10,28	4,08
4	3,2	80,09	10,09	4,12	4	3,44	80,18	10,37	4,22
5	3,19	80,06	10,1	4	5	3,34	80,09	10,25	4,09
6	3,18	80,11	10	4,09	6	3,37	80,08	10,35	4,15

8 lentelėje pateikiami bandinių, spausdintų iš ABS plastiko, tačiau juos bazuojant plonąja briauna, matavimų duomenys.

9 lentelė PLA bandinių matavimai, plačiaja briauna

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Spausdinti bazuojant plačiaja briauna   PLA (mėlyni)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	3,58	79,81	10,37	4,16	1	3,71	78,86	10,36	4,18
2	3,61	79,95	10,34	4,17	2	3,75	79,97	10,34	4,18
3	3,56	79,89	10,2	4,11	3	3,69	79,9	10,32	4,13
4	3,61	80,06	10,14	4,07	4	3,7	80,07	10,18	4,07
5	3,6	79,75	10,33	4,23	5	3,71	79,75	10,42	4,26
6	3,59	79,98	10,19	4,16	6	3,68	79,99	10,19	4,09

9 lentelėje pateikiami, bandinių, kurie spausdinti iš PLA plastiko bazuojant juos plačiaja briauna, matavimų duomenys. Matavimai atlikti prieš ir po impregnavimo derivoje.

10 lentelė PLA bandinių matavimai, plonąja briauna

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Spausdinti bazuojant plonąja briauna + PLA (mėlyni)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	3,38	79,44	10,14	4,31	1	3,45	79,81	10,17	4,33
2	3,38	79,82	10,17	4,32	2	3,45	79,83	10,17	4,32
3	3,38	79,29	10,15	4,3	3	3,45	79,86	10,15	4,36
4	3,37	79,39	10,1	4,34	4	3,45	79,98	10,18	4,36
5	3,39	79,75	10,1	4,31	5	3,47	79,96	10,2	4,31
6	3,4	79,88	10,14	4,23	6	3,47	79,92	10,15	4,23

10 lentelėje pateikti matavimų rezultatai bandinių, kurie buvo spausdinami iš PLA plastiko ir bazuoti plonąja bandinio briauna. Iš lentelių 7 – 10 pateiktų duomenų matyti, kad didžiausią pokytis prieš ir po merkimo yra masės padidėjime. Taip pat pasikeitė ir gabaritiniai bandinių matmenys, nes derva su kietikliu padengė bandinių išorę, tačiau padidėjimas nebuvo labai didelis.

### 3.2. Spausdintų bandinių lenkimo eksperimento rezultatai

Bandiniai, iš ABS ir PLA plastikų po merkimo derivoje su kietikliais ir galutinio matavimo, buvo tiriami lenkimo mašinoje „Tinius Olsen H5KT“. Pagal standartą pasirenkant 2mm/min greitį ir bandinius pastatant ant dviejų atramų vienoje pusėje, o kitoje pusėje apkraunant jėga bandinio centre. Gauti rezultatai pateikti 3.5 – 3.6 lentelėse, toliau matomi tik lentelių fragmentai, lenkimo bandinių iš ABS ir PLA plastiko rezultatai pateikti prieduose 11, 12.

11 lentelė ABS bandinių lenkimo rezultatai

Spusdinimo kriterijai	ABS 0,254 75%		
	I1 (L)	I2 (EPH500)	I3 Be dervos
MAX	67,833	63	55,6
MIN	60,700	59,833	52,767
AVG	64,560	60,899	53,745

11 lentelėje pateikiami lenkimo bandymo rezultatai bandinių, kurie buvo spausdinti iš ABS plastiko bazuojant plačiąja ir siaurąja briaunomis, tačiau skirtingais spausdinimo parametrais.

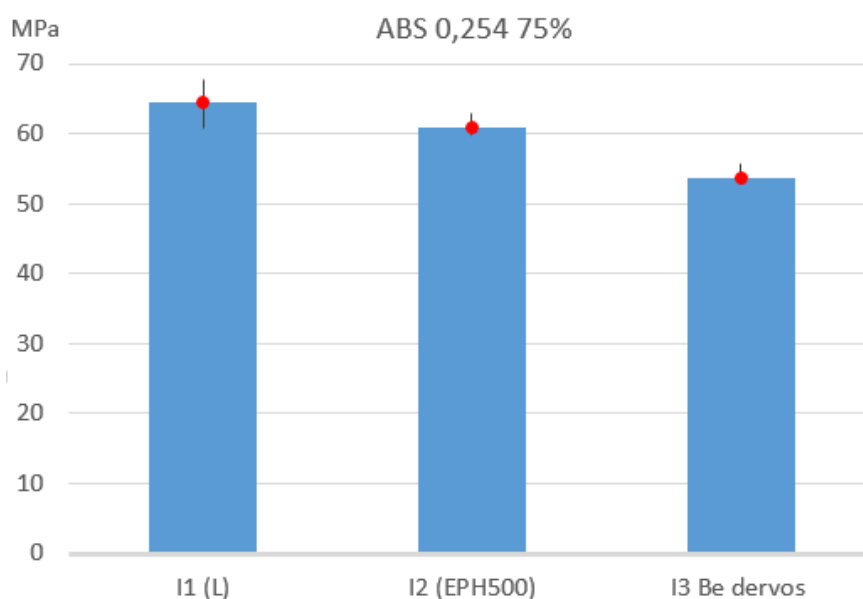
12 lentelė PLA bandinių lenkimo rezultatai

Spausdinimo kriterijai	PLA 0,254 75%		
	I1 (L)	I2 (EPH500)	I3 Be dervos
MAX	149,67	145,43	127,59
MIN	136,67	132,07	125,1
AVG	145,315	141,378	126,007

12 lentelėje pateikiami lenkimo rezultatai, gauti lenkiant bandinius spausdintus iš PLA plastiko, kai buvo spausdinama bazuojant ir siaurąja, ir plačiąja briaunomis. Pateiktų bandinių spausdinimo parametrai buvo skirtingi, nes skyrėsi jų sluoksnio storis arba užpildymas, šie duomenys nurodyti pavadinimuose. Visos rezultatų lentelės, kai jėgos išraiškos vienetai yra N ir MPa, pateiktos prieduose 17 – 20

Duomenys pateikti 11 ir 12 lentelėse, toliau atvaizduojami grafiškai. Grafike vaizduojamas konkrečios medžiagos spausdinimo būdas, spausdinimo parametrai ir derva kurioje buvo įmirkyti bandiniai. Trys atskiri duomenų stulpeliai rodo bandinių mirkytų dervose su kietikliais EPH 500 ir L, lenkimo bandymo metu pasiektas jėgos reikšmės nuo mažiausios iki didžiausios, o taškas ir stulpelis žymi gautą rezultatų vidurkį. Lenkimo bandymų grafikai pateikiami 13-16 prieduose.

### 3.2.1. Lenkimo rezultatai bandinių spausdintų ABS plastiko



9 pav. Bandinių spausdintų iš ABS plastiko, kai sluoksnio storis 0,254 mm, o užpildymas 75 %, pastatymui naudojant plačiąją briauną, lenkimo rezultatų grafikinė išraiška



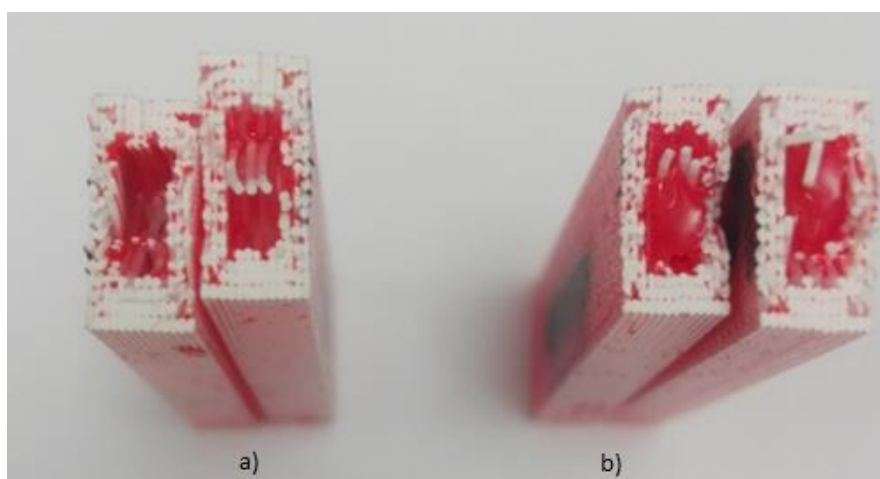
Iš grafinių duomenų (9 pav.) matyti, kad įmirkymas dervoje, bandiniams turėjo teigiamą poveikį. Bandiniai impregnuoti dervoje su kietikliu L parodė geriausias mechanines savybes lenkiant, 12,283 MPa viršijo didžiausią pasiektą stiprumo ribą, bandinių nepaveiktų epoksidine derva. Bandiniai merkti EPH dervoje, neįmirkytų bandinių ribą viršijo 7,4 MPa. Pirmosios bandinių grupės maksimali ir minimali reikšmė turi plačiausią pasiskirstymą lyginant su kitom dviem bandinių grupėm, tai priklauso nuo dervos įsigėrimo kiekio į bandinius. Bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu L sklaida priklauso nuo masės po impregnavimo, didžiausias masės skirtumas siekia 0,29g. Bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu EPH sklaida yra mažesnė, nes bandinių masės skirtumas po impregnavimo mažesnis, jis siekia tik 0,14g.

Pastebėtas dėsningumas eksperimento eigoje buvo toks, kad impregnavimo metu viršuje esantys bandiniai įsigėrė mažesniu kiekiu dervos nei tie bandiniai, kurie buvo impregnavimo indo apačioje.



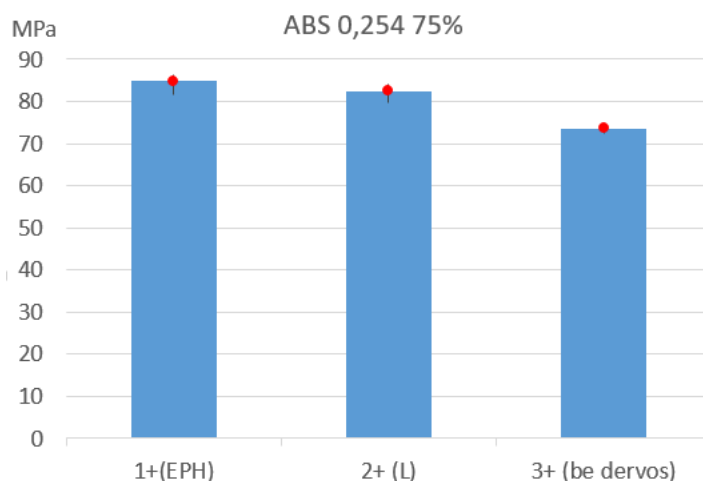
10 Pav. Bandinių atspalvis, kuris priklauso nuo įsigėrusios dervos kiekio.

Paveiksle 10 matome, kad to paties spausdinimo būdo ir impregnavimo bandiniai turi truputį skirtingą atspalvį, tai priklauso nuo bandinių bazavimo merkimo metu. Bandinys numeris 6 impregnavimo metu buvo viršutinėje indo dalyje. Jo raudonos spalvos atspalvis yra mažiau ryškus lyginant su bandinio numeris 1 atspalviu, kuris impregnavimo metu buvo indo apačioje. Tai įtakoja vakuumavimo procesas, visas oras ištraukiamas iš dervos kilo į viršų, todėl indo pačioje dervos kiekis įsigėrė greičiau į bandinių vidų nei indo viršuje.



11 Pav. Bandinio viduje regimas įsigėrusios dervos kiekis

11 paveiksle pateiktas vaizdas, kaip atrodo bandiniai kurie dervos įsigėrimo metu buvo apačioje indo ir kurie buvo viršuje. Kairėje paveikslo pusėje a) pavaizduoti bandiniai kurie buvo indo viršuje, o b) – tie kurie buvo indo apačioje. Kaip galime matyti, bandiniai, kurie buvo indo apačioje, dervos įsigėrė daugiau lyginant su tais, kurie buvo viršuje, nes galime įžiūrėti oro tarpus. Įsigėrusios dervos kiekis matomas ir matavimų metu, kai bandiniai matuojami prieš ir po impregnavimo. Visų bandinių masė po impregnavimo padidėjo.

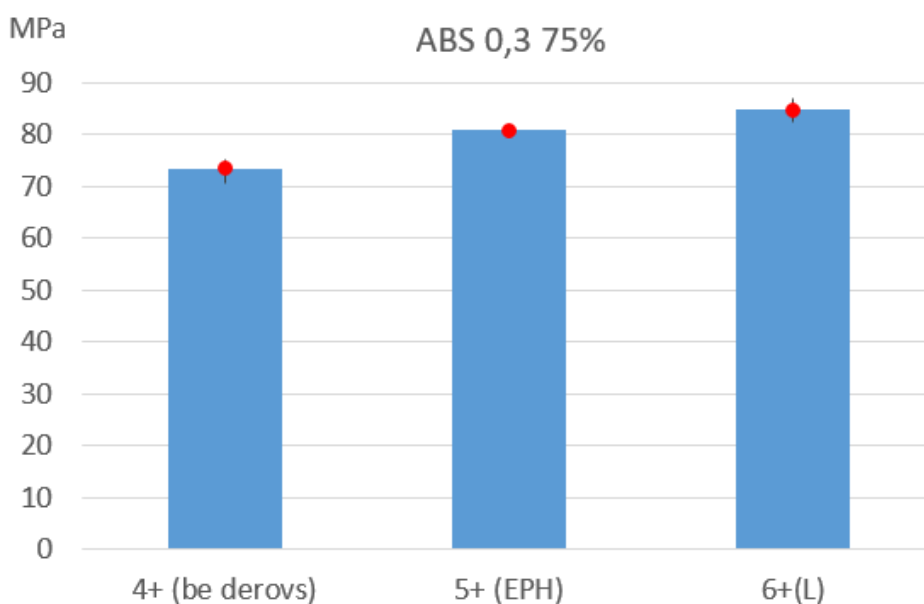


12 Pav. Bandinių spausdintų iš ABS plastiko, kai sluoksnio storis 0,254 mm, o užpildymas 75%, pastatymui naudojant plonąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Kaip pateikta 12 pav. matome iš grafinių duomenų, bandiniai impregnuoti dervoje, turi geresnes mechanines savybes lenkiant, nei tie kurie derva nebuvo apdirbti. Geriausius rezultatus matome bandinių, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu EPH 500, jie geriausiai neimpregnuotų bandinių rezultatą viršija 11,766 MPa, o impregnuoti – dervoje su kietikliu L 2,2 MPa.

Bandinių sklaidos laukas, lenkimo trijuose taškuose bandymo metu, varijuoja dėl įsigėrusios dervos masės kiekio. Net tais atvejais, kai masės vienodos prieš ir po impregnavimo gauti rezultatai buvo skirtingi. Tai priklauso nuo dervos įsigėrimo pasiskirstymo, nes derva galėjo įsigerti skirtingose plokštelių vietose, o tai lėmė didelį sklaidos lauką.

Didžiausią įtaką sklaidos pasiskirstymui 12 pav. grafike turėjo būtent masės skirtumas po impregnavimo. Bandiniams, kurie buvo sumerkti į dervą su kietikliu L, masių skirtumas siekė 0,12 g, o bandinių, kurie buvo merkti dervoje su kietikliu EPH, 0,08 g.

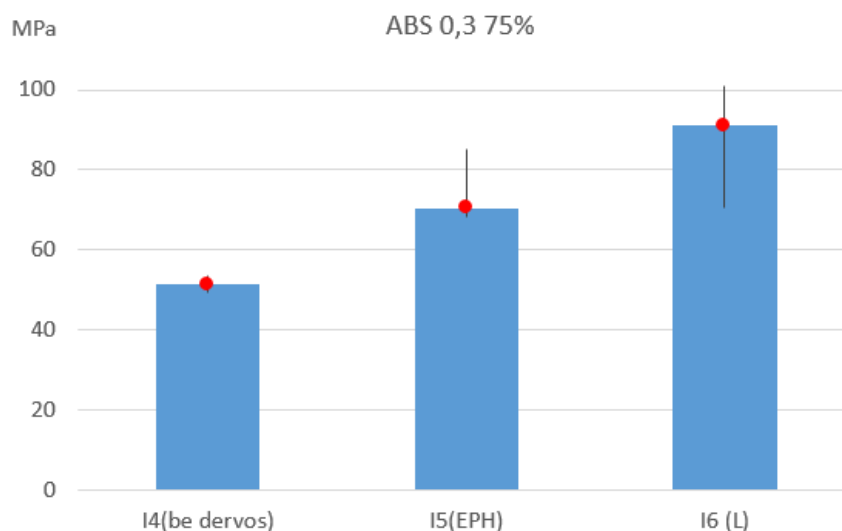


13 Pav. Bandinių spausdintų iš ABS plastiko, kai sluoksnio storis 0,3 mm, o užpildymas 75 %, pastatymui naudojant plonąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Paveiksle 13 matome, kad geriausias rezultatas matomas bandinių, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu L. Didžiausia pasiekta riba lenkimo metu buvo 87 MPa. 11,875 MPa viršija geriausią pademonstruotą jėgą bandinių be dervos. Dervoje su kietikliu EPH 500, bandinių mechaninės savybės taip pat pagerėjo, didžiausia pasiekta riba lenkiant 6,461 MPa. viršijo neimpregnuotų bandinių didžiausią pasiektą ribą.

Dervoje su kietikliu EPH 500 impregnuotų bandinių sklaidos laukas yra labai ribotas, o tai byloja apie tinkamų rezultatų pasiekimą. Taip pat, masės skirtumai po impregnavimo buvo lygūs 0 g. Bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu L, sklaidos laukas palyginti didesnis, tai įtakojo padidėjusi masė po impregnavimo, tačiau masių skirtumas po impregnavimo siekė tik 0,02 g. Sklaidos laukas šiuo atveju priklauso labiau ne nuo įsigėrusios dervos masės, o nuo jos pasiskirstymo bandinio viduje. Bandiniai neimpregnuoti dervoje, taip pat turi pakankamai platų sklaidos lauką, tai lėmė spausdinimo gijų išsidėliojimas spausdinimo metu, kadangi galima spręsti jog toks pats gijų išsidėliojimas buvo ir bandiniuose impregnuotuose dervoje su kietikliu EPH 500, galima teigti, kad derva šiuose bandiniuose pasiskirstė tolygiai, todėl rezultatų sklaida ir buvo ženkliai mažesnė nei kitų.

Bendras rezultatų vaizdas pateiktas 13 pav. yra toks dėl tiriamų bandinių kiekio. Bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu L skaičius yra 2 vnt. su kietikliu EPH 500 2 vnt. ir nepaveiktų derva 3 vnt, tai lemia pakankamai tikslų duomenų pasiskirstymą.



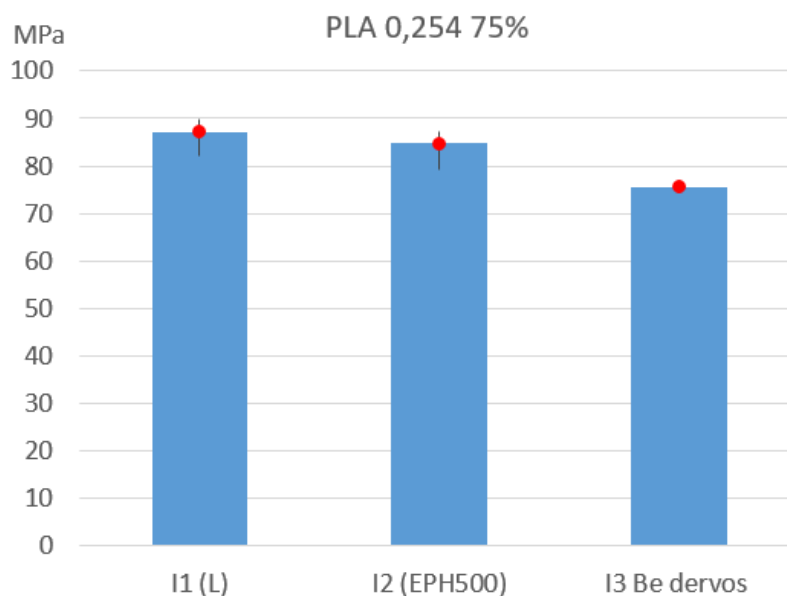
14 pav. Bandinių spausdintų iš ABS plastiko, kai sluoksnio storis 0,3 mm, o užpildymas 75 %, pastatymui naudojant plačiąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Kaip galime matyti iš grafinių duomenų pateiktų 14 pav., dervoje neimpregnuoti bandiniai mechaninėmis savybėmis atsilieka. Didžiausias mechaninių savybių pagerėjimas matomas bandinių, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu L. Didžiausia pasiekta riba lenkimo metu buvo 101 MPa, tai 15,733 MPa geriau už maksimalią pasiektą ribą bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu EPH 500 ir 47,4 MPa geriau už bandinių, kurie nebuvo apdirbti derva. Maksimali bandinių, impregnuotų dervoje su EPH 500 kietikliu, riba lenkiant bandinius, neapdirbtus derva, jų maksimalią ribą viršijo 31,667 MPa.

Didelis bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu L sklaidos pasiskirstymas priklauso nuo bandinių išdėliojimo impregnavimo metu. Apatinėje indo dalyje esantys bandiniai įsigėrė didesniu kiekiu dervos, negu tie, kurie buvo viršutinėje dalyje, tai galima pagrįsti atsižvelgus į masės parametrus. Bandinio I6-1 masė po impregnavimo buvo 2,88 g, o bandinio I6 - 6 masė po impregnavimo buvo 3,65 g. Bandinys I6-1 impregnavimo ir vakuumavimo metu buvo indo viršutinėje dalyje, kai tuo pat metu bandinys I6 - 6 buvo apatinėje indo dalyje, tai lemia ne tik masės skirtumą, bet turi įtakos dervos įsigėrimo kiekiui ir lenkimo savybių rezultatams.

Bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu EPH 500 sklaidos laukas yra didesnis, nei bandinių, kurie nebuvo impregnuoti dervoje. Tai lemia ne vienodas masių pasiekimas po impregnavimo, kuris siekia 1,04 g. Taip pat, įtakos tokiems rezultatams turi dervos pasiskirstymas bandinio viduje. Derva galėjo įsigerti vienodu kiekiu, bet užimti skirtingas bandinio vidines dalis, jei visą įsigėrusi masė susitelkė viename šone, lenkimo bandymo metu, tai turėjo mažai įtakos padidinti lenkimo jėgos atsparumą.

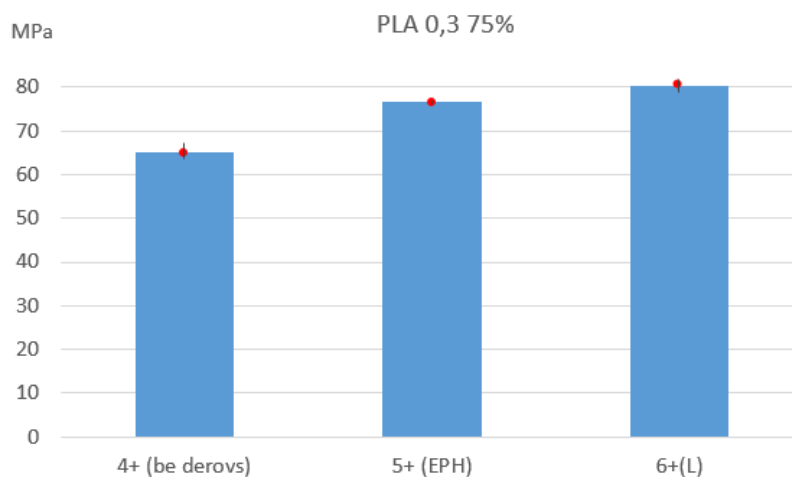
### 3.2.2. Lenkimo rezultatai bandinių spausdintų iš PLA plastiko



15pav. Bandinių spausdintų iš PLA plastiko, kai sluoksnio storis 0,254 mm, o užpildymas 75 %, pastatymui naudojant plačiąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Iš pateiktų grafinių duomenų paveiksle 15 matome, kad geriausius lenkimo rezultatus demonstruoja bandiniai, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu L. Maksimali stiprumo riba lenkiant siekia 89,802 MPa., tai 14,198 MPa daugiau nei bandinių neimpregnuotų dervoje. Dervoje su kietikliu EPH 500 impregnuotų bandinių mechaninės savybės taip pat pagerėjo, jų pasiekta maksimali stiprumo riba lenkiant neimpregnuotų bandinių ribą viršijo 11,654 MPa.

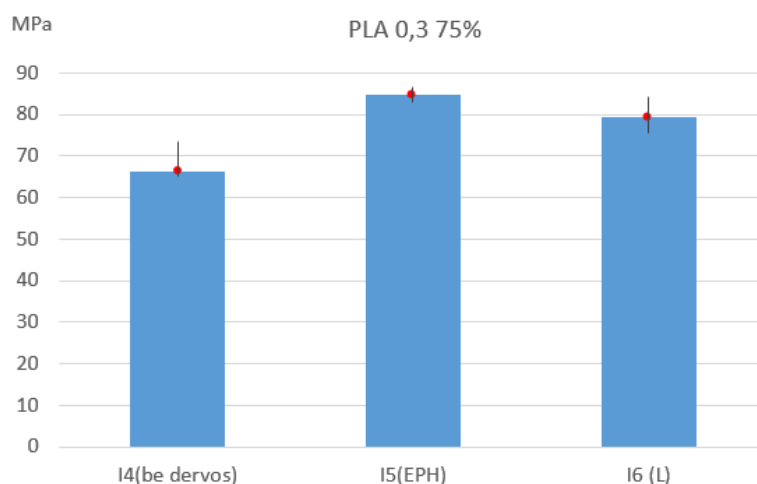
Rezultatų sklaida matoma 15 pav., yra plati (didelė) ir vyrauja bandiniuose, kurie buvo impregnuoti dervose su kietikliais. Dervoje su kietikliu L rezultatų sklaida priklauso nuo masės skirtumo impregnuotuose bandiniuose, kuri siekia 0,07 g. Dervoje su kietikliu EPH 500 impregnuotų bandinių masės skirtumas siekė 0,05 g. Nors masės skirtumai palyginti nėra labai žymūs, tačiau jie turi pakankamai didelį poveikį matavimų rezultatams. Tai gali priklausyti ne tik nuo įsigėrusios masės kiekio, bet ir nuo to, kaip derva įsigėrė bandinio viduje.



16 pav. Bandinių spausdintų iš PLA plastiko, kai sluoksnio storis 0,3 mm, o užpildymas 75 %, pastatymui naudojant plonąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Iš grafike (16 pav.) matyti kad didžiausią stiprumo ribą lenkiant pasiekė bandiniai impregnuoti dervoje su kietikliu L. Maksimali pasiekta riba 5,414 MPa viršija bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu EPH 500 ir 11,875 MPa viršija maksimalią ribą, kurią pasiekė bandiniai neimpregnuoti jokioje dervoje.

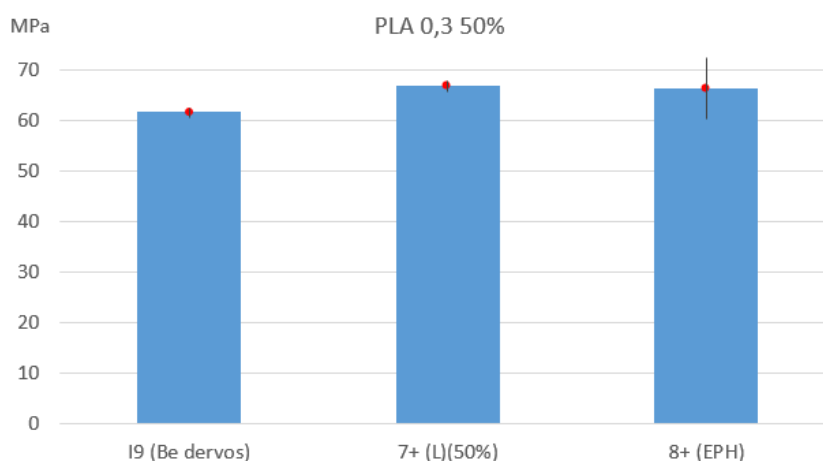
Kaip matome iš pateiktų grafinių duomenų, sklaidos laukas duotiesiems bandiniams beveik visais atvejais yra palyginti nedidelis, tam įtakos turi bandinių skaičius, kuris siekia tik po 2vnt. Ypatingai mažas sklaidos laukas pastebimas bandinių, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu EPH 500, tai priklauso nuo masės skirtumo po impregnavimo, kuris siekia 0 g. Dervoje su kietikliu L masių skirtumas siekia 0,02 g, todėl ir sklaidos laukas yra didesnis, o taip pat tokį sklaidos lauką gali lemti ir netolygus dervos įsigėrimas ir pasiskirstymas bandinio viduje. Didžiausias sklaidos laukas yra bandinių, kurie nebuvo impregnuoti dervose, tai labai priklauso nuo spausdinimo gijų išsidėstymo gaminių viduje ir dėl mažo bandinių skaičiaus.



17 pav. Bandinių spausdintų iš PLA plastiko, kai sluoksnio storis 0,3 mm, o užpildymas 75 %, pastatymui naudojant plačiąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Grafike (17 pav.) matyti, kad geriausias rezultatas ir ryškiausias mechaninių savybių pagerėjimas buvo bandinių impregnuotų dervoje EPH 500, maksimali pasiekta stiprumo riba lenkiant buvo 86,598 MPa, tai 2,46 MPa daugiau už maksimalią pasiektą ribą bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu L ir 13,26 MPa geriau už dervoje neimpregnuotų bandinių maksimalią ribą.

Sklandos laukas dervoje su kietikliu L yra palyginti platus dėl įsigėrusios masės kiekio į bandinius, po impregnavimo bandinių masė skirtumas siekė 0,23 g. Sklandos lauko dydis taip priklauso nuo to kaip masė įsigėrė į bandinius ir kaip pasiskirstė jų viduje. Tolygiai pasiskirsčius masei, gautų rezultatų sklaidos laukas būtų mažesnis, todėl priimame išvadą, kad įsigėrusi derva pasiskirstė netolygiai. Dervoje su kietikliu EPH 500 impregnuotų bandinių sklaidos laukas yra ženkliai mažesnis už tuos, kurie impregnuoti dervoje su kietikliu L. Tai taip pat priklauso nuo įsigėrusios dervos kiekio. Masių skirtumas šių bandinių po impregnavimo siekė 0,11 g. Masių skirtumas kartu su sklaidos lauko pasiskirstymu byloja apie tolygesnį dervos pasiskirstymą bandinių viduje.



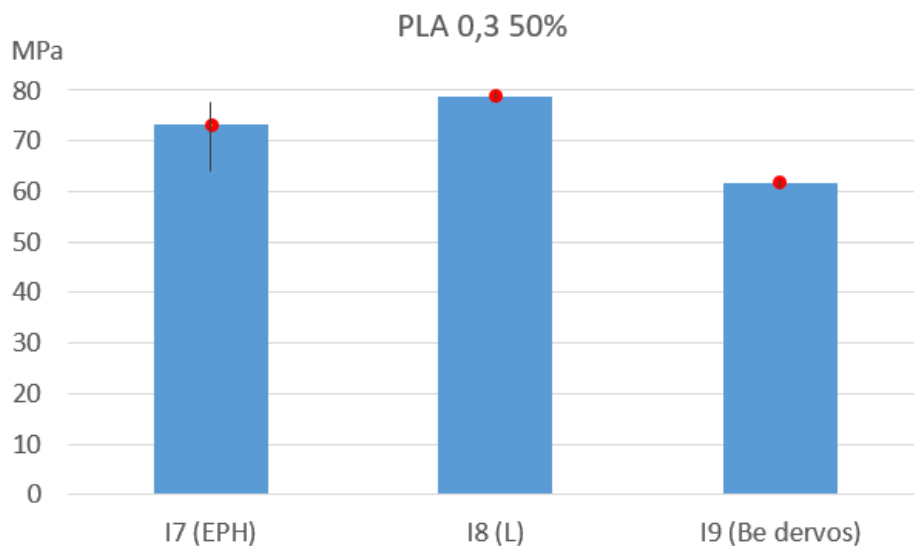
18 pav. Bandinių spausdintų iš PLA plastiko, kai sluoksnio storis 0,3 mm, o užpildymas 50 %, pastatymui naudojant plačiąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška.

18 pav. pateikiami duomenys, kai užpildymas yra 50 %, tačiau palyginimui naudojamas ne tokio paties tipo bandiniai. Spausdinimo metu dalis bandinių buvo spausdinami iš PLA plastiko, tačiau kitokios jo rūšies. Kaip galime matyti, net panaudojus kitokios rūšies PLA gaunami rezultatai, kurie yra geresni apdirbus bandinius derva nei tie, kurie dervoje nebuvo impregnuoti.

Geriausią rezultatą pademonstravo bandiniai, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu EPH 500, maksimali stiprumo riba lenkiant siekė 72,438 MPa, tai 4,38 MPa viršijo geriausią pasiektą ribą bandinių impregnuotų dervoje su kietikliu L ir 9,882 MPa viršijo neimpregnuotų bandinių didžiausią stiprumo ribą lenkiant.

Didelį sklaidos lauką bandinių, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu EPH 500, lemia įsigėrusios dervos masės kiekis. Po impregnavimo bandinių masės skirtumas siekė 0,14 g. Toks

sklaidos laukas priklauso nuo netolygiai įsigėrusios dervos bandinio viduje. Dervoje su kietikliu L impregnuotų bandinių masių skirtumas po merkimo siekia 0,06 g, todėl sklaidos laukas šiems bandiniams yra mažesnis. Rezultatų sklaida taip pat priklauso nuo bandinių kiekio, kurie buvo impregnuoti dervoje, nes šiuo atveju +7 ir +8 bandinių grupės turėjo tik po 2 vnt. Taip buvo nuspręsta daryti, dėl patikrinimo, kadangi spausdinimo medžiagos, laikas ir kaina yra labai svarbūs, bandymų atlikimui.



19 pav. Bandinių spausdintų iš PLA plastiko, kai sluoksnio storis 0,3 mm, o užpildymas 50 %, pastatymui naudojant plačiąją briauną, lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Paveiksle 19 matyti, kad geriausius lenkimo rezultatus gavome lenkdami bandinius, kurie buvo impregnuoti dervoje su kietikliu L. Maksimali stiprumo riba lenkiant šiems bandiniams buvo 79,824 MPa. Lyginant su bandiniais impregnuotais dervoje su kietikliu EPH 500, maksimali riba bandinių su kietikliu L viršijo 2,076 MPa, o lyginant bandinius neimpregnuotus dervoje, bandinių su kietikliu L stiprumo riba lenkiant jų maksimalią ribą viršijo 17,268 MPa.

Kaip matome iš grafinių duomenų pateiktų 19 pav, sklaidos laukas bandiniams, impregnuotiems dervoje su kietikliu EPH 500, yra labai platus lyginant su kitomis bandinių grupėmis. Tai priklauso nuo dervos kiekio, kuris įsigėrė į bandinius vakuumavimo metu. Masės skirtumas po impregnavimo šiems bandiniam siekė 0,71 g., o tai yra apie 25 % pradinės bandinių masės. Taip pat, tokiam sklaidos pasiskirstymui įtakos turi dervos įsigėrimas bandinio viduje. Jei derva pasiskirstė netolygiai arba vienoje pusėje, lenkimo bandymo metu, tai neturėjo įtakos bandinių stiprumui. Dervoje su kietikliu L impregnuotų bandinių sklaida yra palyginti mažesnė, nes jų masių skirtumas po lenkimo siekia tik 0,08 g. Tai leidžia manyti, kad derva bandinio viduje pasiskirstė tolygiai ir turėjo teigiamos įtakos bandinių rezultatams lenkimo metu.



### 3.3. Slėgio tyrimo rezultatai

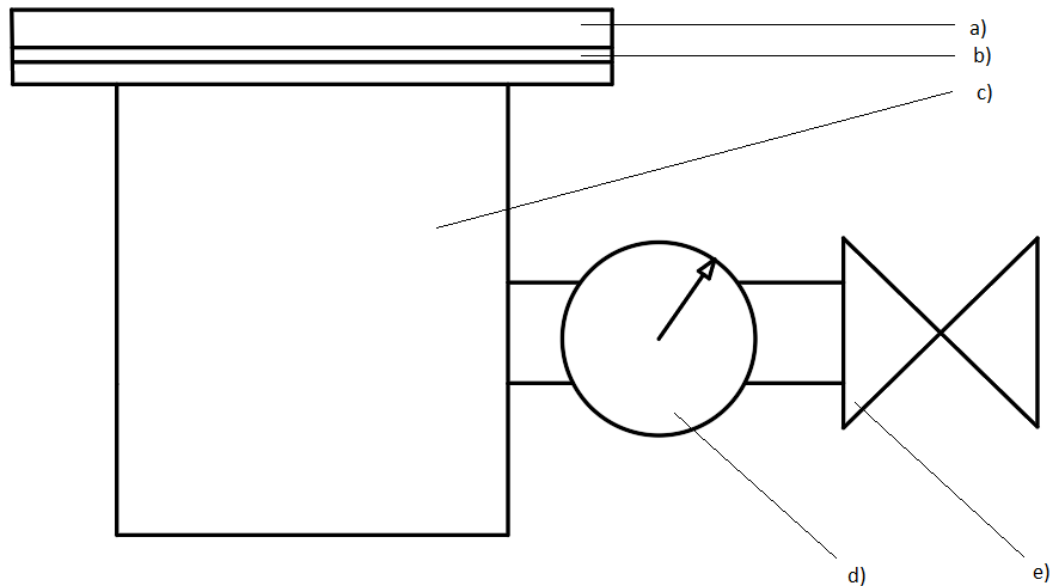
Tiriamąjį bandymo metu atlikus lenkimo trijuose takuose tyrimą ir įvertinus gautus rezultatus, pastebėta, kad geresnes savybes demonstruoja bandiniai, kurie buvo mirkyti derva su kietikliu L, todėl buvo nuspręsta pagaminti du dangtelius, vieną iš PLA plastiko, o kitą iš ABS. Panaudojant vienodus spausdinimo parametrus. Toliau šie dangteliai merkami į dervą su kietikliu L, joje išlaikomi 33 min. ir nuvalomi. Po nuvalymo paliekami džiuoti 24 val. Dangtelių duomenys, kaip ir lenkimo bandinių buvo matuojami prieš ir po merkimo į dervą. Duomenys pateikiami 13 lentelėje.

13 lentelė dangtelių duomenys prieš ir po merkimo

ABS (Baltas) prieš merkimą				ABS (Baltas) po merkimo			
Masė	Ilgis	Plotis	Storis	Masė	Ilgis	Plotis	Storis
145	138,30	137,98	10,38	225	138,33	138,1	10,38
PLA (Pilkas) prieš merkimą				PLA (Pilkas) po merkimo			
Masė	Ilgis	Plotis	Storis	Masė	Ilgis	Plotis	Storis
62	138,16	138,04	10,28	129	138,23	138,14	10,50

Kaip matome 3.7 lentelėje, visi duomenys pasikeitė po merkimo, taip pat kaip ir lenkimo bandinių. Iš duomenų galima matyti, kad dangtelis iš PLA plastiko yra 2,3 karto lengvesnis už dangtelį iš ABS plastiko. Kaip ir buvo tikėtasi didžiausias pasikeitimas matomas dangtelių masėje po merkimo. ABS dangtelis po merkimo pasunkėjo 55,2 %, o dangtelis iš PLA 108,06 %.

Po visiško išdžiūvimo dangteliai montuojami ant slėginio indo, kuris kaip minėta darbo pradžioje buvo pagamintas iš 3 mm storio vamzdžio ir dviejų plokštelių. Viena iš jų panaudojama kaip indo dugnas, o kita kaip tvirtinimo dalis. Visos dalys suvirinamos ir pagaminamas sandarus indas. Viename indo šone pritvirtinamas monometras su kranu, kad eksperimento metu būtų galima slėgį išlaikyti indo viduje ir stebėti kaip keičiasi jo dydis. Eksperimento metu buvo numatyta suteikti 4 atm slėgį.



20 pav. Slėginio indo schema. a) spausdintas dangtelis; b) tarpinė tarp spausdinto dangtelio ir slėgio; c) slėgio indas; d) monometras; e) kranas;

20 pav. pavaizduota slėginio indo schema. Indas pagamintas iš DC01 plieno, kurio storis 3mm. Iš indo šono išeina vamzdelis, prie kurio tvirtinasi monometras, o už jo tvirtinasi kranas, tam tikslui, kad kai inde bus sukeltas slėgis būtų galima viską užsukti ir stebėti, kiek iš tikrųjų sandarus yra indas. Viršutinėje indo dalyje privirintas rėmelis, su skylėmis. Skylės tiksliai atkartojamos spausdinamuose dangteliuose, o tarpinėje (kuri yra guminė) skylės iškerpamos. Viską užsandarinus ir sudėjus gaunamas slėginis indas.



21 pav. Slėginis indas, su jau pritvirtintu dangteliu, spausdintu iš PLA plastiko.

Kaip matome paveiksle 21 – dangtelis, tarpinė ir slėginio indo rėmelis, sutvirtinami varžtais su poveržlėmis ir veržlėmis. Siekiant sudaryti nepralaidžią ertmę indo viduje.

### 3.3.1. ABS dangtelio bandymo rezultatai

Pirmuoju bandymu buvo naudojamas dangtelis iš ABS plastiko, tačiau tik pradėjus lėtai kelti slėgį indo viduje dangtelis sutraškėjo ir išlanko pasiekęs 1 atm slėgį. Praėjus vienai minutei nuo slėgio suteikimo slėgis nukrito iki 0 atm. Toks rezultatas gali priklausyti nuo paties plastiko, kuris nėra pakankamai tvirtas atlaikyti dideliems slėgio kiekiams arba dėl dervos įsigėrimo į dangtelio vidų. Derva su kietikliu galėjo neužpildyti viso laisvo proto, o pro esančius tarpelius slėgis greitai prasiskverbė.

### 3.3.2. PLA dangtelio bandymo rezultatai

Antruoju bandymu buvo naudojamas dangtelis iš PLA plastiko, suteikus 4 atm slėgį, kranas buvo užsuktas, o slėginis indas buvo paliktas stovėti.

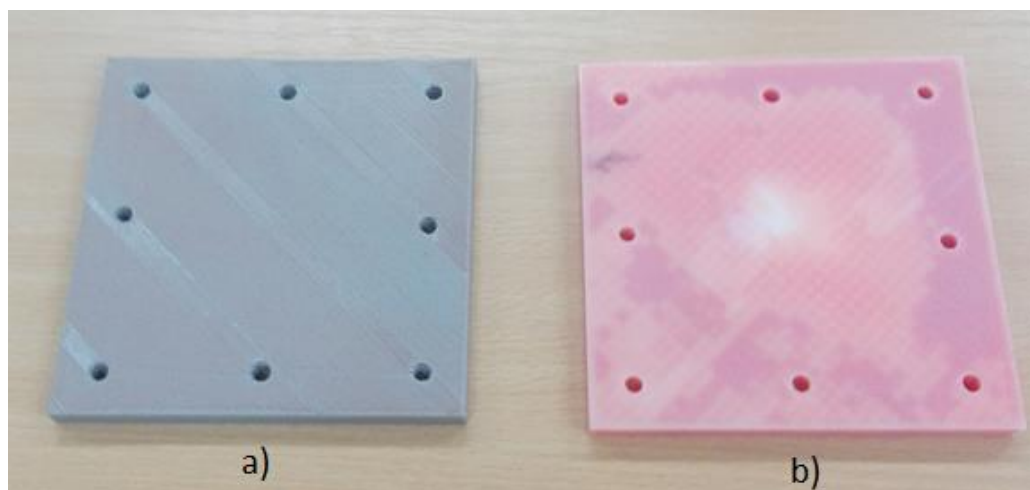
14 Lentelė slėgio dydis, po tam tikro laiko

Laikas, min	Slėgis, atm
0	4
30	4
90	4
150	4
1350	4
2790	3,7

Iš 14 lentelės duomenų matyti, kad praėjus beveik 24 valandoms po slėgio suteikimo indas ir dangtelis išlaikė pastovų slėgį – 4 atm. Galima teigti, kad PLA plastiko gaminiai pagaminti ir įmirkyti dervoje yra sandarūs, tačiau praėjus dar 42 valandoms slėgis pradėjo kristi. Tai galėjo priklausyti nuo kelių priežasčių:

- Tarpinės neatlaikė stovėjimo ir pradėjo leisti orą;
- Nepakankamas dervos įsigėrimas dangtelio viduje ir netinkamas pasiskirstymas lėmė, slėgio mažėjimą per laiką.
- Netinkamas kranas, kuris prkatikoje naudojamas santechnikoje.

Nepakankamas dervos su kietikliu įsigėrimas nustatomas iš bendro dangtelių vaizdo, po merkimo ir išdžiūvimo.



22 pav. ABS ir PLA dangteliai po įmirkymo dervoje su kietikliu L. a) – PLA plastiko dangtelis; b) – ABS plastiko dangtelis.

Kaip matome iš 22 pav. derva įsigėrė ne į visą dangtelių vidinę ertmę, o tik dalinai. Galima spręsti, kad įsigėrimo laikas buvo parinktas per trumpas arba vakuumavimo operacijoje naudotas per mažas slėgis. Taip pat, nepaisant to, kad PLA medžiagos dangtelis pademonstravo didelį sandarumą ir aukšto slėgio atlaikymą, nepilnai užpildyti oro tarpai derva turėjo įtakos galutiniam tyrimo rezultatui, kad praėjus pakankamai ilgam laiko tarpui slėgis visgi pradėjo kristi. Taip pat, nors vaizdžiai sunkiau įžiūrėti, bet PLA dangtelis nebuvo tolygiai įsigėręs derva, o ABS dangtelyje tai matosi dar labiau 22 pav. Šiuo atveju reiktų pakeisti naudojamą kietiklį, vakuumavimo kameros slėgį arba spausdinamo gaminio dydį.

### 3.4. Ekonominė dalis

Impregnavimas derva su kietikliu, sumažina spausdinimo laiką ir medžiagos kiekį, kuris reikalingas gamybos procese. Nepaisant to, kad lenkimo bandymo rezultatai buvo teigiami ir po impregnavimo gaminio stiprumas padidėjo, būtina įvertinti tokio gaminio kainą. Jei gamyba užtrunka trumpiau ir sunaudoja mažiau medžiagų, tačiau derva, kietikliai ir impregnavimo procesas turi didelės įtakos gaminio kainos kilimui, būtina įvertinti ar pagerėjusios gaminių savybės yra vertos papildomų išlaidų. Todėl šioje dalyje bus apskaičiuojama gaminio kaina tik spausdinant pilnu užpildymu ir kai naudojamas ne pilnas užpildymas impregnuojant dervose.

ABS medžiagos kaina - 16,57 eurai/kg = 0,0166 eurai/g

PLA medžiagos kaina - 22,61 eurai/kg = 0,0226 eurai/g

3D gaminių iš ABS plastiko spausdinimo kaina – 0,39 eurai/g

3D gaminių iš PLA plastiko spausdinimo kaina - 0,39 eurai/g

Dervos Epoxy Resin su kietikliu L – 21,93 eurai/kg = 0,0219 eurai/g

Derva su kietikliu EPH500 – 20,66 eurai/kg = 0,0201 eurai/g

Skaičiavimuose pateikiamų nežinomųjų paaiškinimas:

$P_{ABS}$  – gaminio gaminamo iš ABS plastiko kaina

$P_{PLA}$  – gaminio gaminamo iš PLA plastiko kaina

$P_{dervaL}$  – dervos su kietikliu „L“ kaina

$P_{dervaEPH}$  – dervos su kietikliu „EPH500“ kaina

$m_{ABS}$  – gaminio pagaminto iš ABS plastiko masė

$m_{PLA}$  – gaminio pagaminto iš PLA plastiko masė

$m_{dervaL}$  – dervos su kietikliu „L“ masė

$m_{dervaEPH}$  – dervos su kietikliu „EPH500“ masė

Spausdinimo metu, naudojant pilną 100 % užpildymą ABS gaminio masė yra 4,57g. PLA medžiagos bandinys 4,93g. Tai spausdinant pilnu užpildymu gaunama gaminių kaina yra:

$$P_{ABS} = (M_{ABS} + 0,39) * m_{ABS} = (0,0166 + 0,39) * 4,57 = 1,858 \text{ eurai}$$

$$P_{PLA} = (M_{PLA} + 0,39) * m_{PLA} = (0,0226 + 0,39) * 4,93 = 2,034 \text{ eurai}$$

Apskaičiuojame kainą, spausdinant gaminius 100 % užpildymu nenaudojant dervos impregnavimui. ABS bandinio spausdinto su 75 % užpildymu masė 3,21g, po impregnavimo 3,43g. Gaminio kaina apskaičiuojama:

Kai naudojama derva su kietikliu „L“:

$$P_{ABS} = (M_{ABS} + 0,39) * m_{ABS} + m_{dervaL} * P_{dervaL} = (0,0166 + 0,39) * 3,21 + 0,22 * 0,0219 \\ = 1,309 \text{ eurai}$$

Kai naudojama derva su kietikliu „EPH500“:

$$P_{ABS} = (M_{ABS} + 0,39) * m_{ABS} + m_{dervaEPH} * P_{dervaEPH} \\ = (0,0166 + 0,39) * 3,21 + 0,22 * 0,0201 = 1,309 \text{ eurai}$$

PLA bandinio spausdinto 75 % užpildymu masė 3,61 g, po impregnavimo 3,7g. Gaminio kaina apskaičiuojama:

Kai naudojama derva su kietikiu „L“:

$$P_{PLA} = (M_{PLA} + 0,39) * m_{PLA} + m_{dervaL} * P_{dervaL} = (0,0226 + 0,39) * 3,61 + 0,09 * 0,0219 \\ = 1,4909 \text{ eurai}$$

Kai naudojama derva su kietikliu „EPH500“:

$$P_{PLA} = (M_{PLA} + 0,39) * m_{PLA} + m_{dervaEPH} * P_{dervaEPH} \\ = (0,0226 + 0,39) * 3,61 + 0,09 * 0,0201 = 1,491 \text{ eurai}$$

Atlikus skaičiavimus matome, kad gaminiai gaminti su mažesniu užpildymu ir impregnuoti dervose, kainuoja apie 30 % mažiau kai naudojama ABS medžiaga ir 27 % mažiau kai naudojama PLA medžiaga. Būtina atsižvelgti į tai, kad skaičiavimo metu spausdinimo kaina pasirinkta pagal rinkoje esantį modelį, kai įvertinama gaminio masė gramais, t.y. 1g ABS ir PLA medžiagos ir jų spausdinimas kainuoja 0,39 Eur. Taip pat būtina įvertinti tai, kad impregnavimo metu neužtenka turėti dervos su kietikliu tik tiek, kiek jos įsigers. Kadangi tikslus įsigėrimo kiekis nėra užtikrintai aiškus, todėl impregnavimo procese bus naudojamas didesnis kiekis dervos, kad gaminiai būtų joje panardinami. Tačiau praktikoje impregnavimas nebus atliekamas pavienėms ir tokių mažų matmenų detalėms, todėl galima teigti, kad spausdinant didelių gabaritų gaminį, laiko nuostoliai ir gamybos išlaidos būtų didesnės nei spausdinant nepilnai užpildytą gaminį ir jį impregnuojant derva su kietikliu.

#### 4. Išvados

Atlikus detalią literatūros analizę, pastebėta, kad visi bandymai susiję su 3D spausdintais gaminiais apima tik atspausdintų bandinių mechaninių savybių tikrinimą ir palyginimą, todėl nuspręsta atlikti panašaus pobūdžio bandymą siekiant išsiaiškinti ar 3D spausdintiems bandiniams įtakos padarytų derva su kietikliais, kai atspausdinti bandiniai joje impregnuojami tam tikrą laiką ir atliekamas lenkimo bandymas.

1. Suprojektuota ir nustatytais parametrais, atspausdinami 143 vienetai bandinių. ABS plastiko bandinių buvo pagaminta 61 vnt. PLA plastiko 82 vnt. ABS medžiagos bandiniai visi buvo spausdinti 75 % užpildymu. PLA medžiagos 50 % upildymu buvo spausdinti 18 vnt. 75 % užpildymu buvo spausdinti 64vnt.

2. Eksperimento metu atliktas bandinių impregnavimas į dervą „Epoxy Reisin L“ (UN3082), kartu su kietikliu „L (UN2735)“, kurio stingimo laikas 40 minučių, ir kietikliu „EPH 500“, kurio stingimo laikas 60 minučių.

3. Po įmirkymo įvertinama bandinių masė. Visų bandinių masė padidėjo, nepriklausomai nuo spausdinimo būdo ar naudojamos medžiagos. ABS medžiagos spausdintų bandinių masė, kai buvo spausdinama plačiaja briauna daugiausiai padidėjo 1,27g. Spausdinant siaurąja briauna didžiausias masės prieaugis buvo 0,28g. PLA medžiagos bandinių masė, kai bandiniai spausdinti siaurąja briauna padidėjo 1,23g, o kai buvo spausdinta plačiaja briauna didžiausias masės padidėjimas buvo 1,22g.

4. Bandiniai spausdinti iš ABS plastiko lenkimo bandymo metu pasiekė didžiausią stiprumo ribą, kuris siekė 60,6 MPa. Tokį rezultatą pasiekė 0,3 mm sluoksnio storio ir 75 % užpildymo bandiniai, spausdinti plačiaja briauna ir impregnuoti dervoje su kietikliu L.

Mažiausia pasiekta stiprumo riba buvo bandinių pagamintų iš ABS plastiko, kurie buvo spausdinti plačiaja briauna, 0,3 mm sluoksnio storio ir 75 % užpildymu, tačiau neimpregnuoti jokia derva. Pasiiekta stiprumo riba lenkiant buvo 29,49 MPa.

PLA bandinių grupėje geriausią rezultatą pademonstravo bandiniai, kurių sluoksnio storis 0,254 mm, užpildymas 75 %, spausdinti plonąja briauna. Pasiiekta stiprumo riba lenkiant buvo 92,66 MPa. PLA bandinių mažiausia pasiekta stiprumo riba lenkiant buvo 60,49 MPa. Tokią ribą pasiekė bandiniai, kurių sluoksnio storis 0,3 mm 75 % užpildymas ir atspausdinti plonąja briauna.

Kaip galima vertinti iš pateiktų rezultatų, PLA plastikas po impregnavimo dervomis pasiekė didesnę stiprumo ribą lenkiant, nei ABS plastikas. Tačiau ir pagal mechanines šių plastikų savybes PLA yra stipresnis už ABS. Taip pat impregnavimas dervoje turėjo teigiamos įtakos, ypač ABS

plastiko gaminiams, nes be impregnavimo ir pilnu užpildymu ABS plastiko stiprumo riba lenkiant yra 41 MPa, o po impregnavimo ji siekė 60,6 MPa. PLA plastikui siekiama stiprumo riba lenkiant buvo 77 MPa, o didžiausia riba po impregnavimo siekė 92,66 MPa. Todėl galima teigti, kad 3 D spausdintų gaminių impregnavimas derva su kietikliu, pagerina gaminių atsparumą lenkimui.



## Literatūros sąrašas

1. W.Wang, C.Zanni and L.Kobbelt, (2016), „Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction“, EURIGRAPHICS 2016, Vol. 35, Number 2, 1-7p.
2. Roboto rankų pritaikymas 3D spausdinime, praplečiant spausdinimo galimybes, robotikos tinklaraštis „DoF – a Robotiq community“. [Žiūrėta 2018-10-27] prieiga per internetą: <https://blog.robotiq.com/are-robot-arms-the-next-generation-of-3d-printer>
3. Protezų neįgaliesiems projektavimas ir gamyba. Ameriko mechanikų visuomenės tinklaraštis „American Society of Mechanical Engineering“. [Žiūrėta 2018-10-27] prieiga per internetą: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/top-6-innovations-3d-printing>
4. A.Clausen, F.Wang, J.S.Jensen, O.Sigmund, J. A. Lewis. (2015), „Topology Optimized Architectures with Programmable Poisson’s Ratio over Large Deformations“. 5526 p.
5. W.Wang, T.Y.Wang, Z.Yang, L.Liu, X.Tong, J.Deng. (2013), „Cost-effective Printing of 3D Objects with Skin-Frame Structures“. 2 p.
6. M. Gebler, A.J.M. Schoot Uiterkamp, C.Visser. (2014), „A global sustainability perspective on 3D printing technologies“. Volume 74, 158-167 p.
7. Chee Kai Chua ir Kah Fai Leong, „3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING Principles and applications. Nanyang, Technological University, Singapore. 7-12psl.
8. S.F.S.Shirazi, S.Gharehkhani, M. Mehrali, H.Yarmand. (2014), „A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing“. 2 p.
9. Selektinio lazerinio sukepinimo veikimo schema. [Žiūrėta 2018-11-03] prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/figure/Selective-Laser-Sintering-SLS-Source-entopmaxtechnet\\_fig12\\_307574898](https://www.researchgate.net/figure/Selective-Laser-Sintering-SLS-Source-entopmaxtechnet_fig12_307574898)
10. R.J.M. Hague and P.M. Dickens. Loughborough University, UK. 2006. „Rapid Manufacturing. An industrial revolution for the digital age“ 75 psl.
11. Lydzios masės formavimo schema. [https://www.researchgate.net/figure/Fused-deposition-modelling-schematic\\_fig10\\_269836411](https://www.researchgate.net/figure/Fused-deposition-modelling-schematic_fig10_269836411)
12. Spausdinimui tinkamos medžiagos, kartu su jų mechaninėmis savybėmis. [Žiūrėta 2018-04-23] prieiga per internetą: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/abs-vs-pla-3d-printing-materials-comparison>
13. Stereolitografijos schema. <https://www.semanticscholar.org/paper/Computational-Modeling-of-Stereolithography-Hanzlicek-Pentek/fac85779ab964cc47b95da31c1f6d855c2b2d17b/figure/0>
14. Spausdinimo medžiagų charakteristikos.[Žiūrėta 2018-05-02] prieiga per internetą:

<http://www.buildparts.com/materials/abs>

15. Medžiagos, kuria buvo spausdinami gaminiai technologinis aprašymas. [Žiūrėta 2018-05-14] prieiga per internetą: <https://www.trideus.be/en/pla-daring-darkblue.html>
16. Bandiniai kurie buvo kietinami epoksidine derva, tyrimas. [Žiūrėta 2018-05-14] Prieiga per internetą : <http://www.instructables.com/id/Strengthening-a-3D-Printed-Part/>
17. Atliekamo lenkimo bandymo aprašymas, lenkiant su skirtingo spindulio taškais. [Žiūrėta 2018-05-04] prieiga per internetą: [http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm\\_d790.pdf](http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d790.pdf)
18. Naudojamos medžiagos techniniai duomenys ir mechaninės savybės. [Žiūrėta 2018-05-12] prieiga per internetą: <http://www.buildparts.com/materials/ab>
19. Bandymo rezultatų lentelės su pateiktu eksperimento aprašymu.[Žiūrėta 2018-05-14] prieiga per internetą: <https://www.matterhackers.com/news/filament-strength-testing>
20. Bandymas kurio metu naudojami atvirojo tipo spausdintuvai. [Žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: [http://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1047&context=materials\\_fp](http://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1047&context=materials_fp)
21. Epoksidinės dervos aprašymas. Clayton May (11 May 2018). „Epoxy resins: Chemistry and Technology (second edition). 69psl.
22. Epoksidinės dervos, sudedamosios dalies aprašymas. [Žiūrėta 2018-12-02] prieiga per internetą : <https://www.ligos.lt/lt/terminai/merkaptanai-tiolai/1698/>

ABS plastiko mehāniskās īpašības



**P400 ABS Material Properties**

A true industrial thermoplastic, ABS is widely used throughout industry. When combined with Dimension 3D printers it becomes the ideal solution to printing 3D models in an office environment.

**MECHANICAL PROPERTIES<sup>1</sup>**

	<b>Test Method</b>	<b>Imperial</b>	<b>Metric</b>
Tensile Strength, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	3,200 psi	22 MPa
Tensile Modulus, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	236,000 psi	1,627 MPa
Tensile Elongation, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	6%	6%
Flexural Delamination	ASTM D790	2,000 psi	14 MPa
Flexural Strength	ASTM D790	6,000 psi	41 MPa
Flexural Modulus	ASTM D790	266,000 psi	1,834 MPa
IZOD Impact, notched, (Method A, 73° (23° C))	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

**THERMAL PROPERTIES<sup>2</sup>**

	<b>Test Method</b>	<b>Imperial</b>	<b>Metric</b>
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi (0.5 MPa)	ASTM D648	195° F	90° C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi (1.8 MPa)	ASTM D648	169° F	76° C
Glass Transition (TG)	DMA (SSYS)	219° F	104° C
Melt Point		(NA) <sup>2</sup>	(NA) <sup>2</sup>

**OTHER<sup>3</sup>**

	<b>Test Method</b>	<b>Value</b>
Specific Gravity	ASTM D792	1.05
Vertical Burning Test	UL94	HB
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	5.60E-05 in/in/F
Dielectric Strength (kV / mm)	IEC 60112	32.0

<sup>1</sup> Build orientation is on side edge except for flexural delamination which is upright.

<sup>2</sup> Not applicable (NA) due to amorphous nature. Material does not display a melting point.

<sup>3</sup> Literature value unless otherwise noted.

## PLA plastiko mechaninės savybės

**Mechanical properties\***

	Injection molding		3D printing	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
<b>Tensile modulus</b>	-	-	2,346.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
<b>Tensile stress at yield</b>	-	-	49.5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
<b>Tensile stress at break</b>	-	-	45.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
<b>Elongation at yield</b>	-	-	3.3%	ISO 527 (50 mm/min)
<b>Elongation at break</b>	-	-	5.2%	ISO 527 (50 mm/min)
<b>Flexural strength</b>	-	-	103 MPa	ISO 178
<b>Flexural modulus</b>	-	-	3,150 MPa	ISO 178
<b>Izod impact strength, notched (at 23 °C)</b>	-	-	5.1 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<b>Charpy impact strength (at 23 °C)</b>	-	-	-	
<b>Hardness</b>	-	-	83 (Shore D)	Durometer

### 3 priedas. Epoksidinės dervos „Epoxy Resin L“ techniniai duomenys

#### SECTION 9: Physical and chemical properties

##### 9.1. Information on basic physical and chemical properties

Physical state:	Liquid	
Colour:	yellowish	
Odour:	characteristic	
		<b>Test method</b>
pH-Value:		not determined
<b>Changes in the physical state</b>		
Melting point:		not determined
Initial boiling point and boiling range:		200 °C
Flash point:		150 °C
<b>Flammability</b>		
Solid:		not applicable
Gas:		not applicable
Lower explosion limits:		not determined
Upper explosion limits:		not determined
<b>Auto-ignition temperature</b>		
Solid:		not applicable
Gas:		not applicable
Decomposition temperature:		not determined
<b>Oxidizing properties</b>		
Not oxidising.		

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH

#### Safety Data Sheet

according to Regulation (EC) No 1907/2006

Revision date: 19.03.2018	<b>Epoxy Resin L</b> Product code: 100135	Page 5 of 10
---------------------------	--	--------------

Vapour pressure: (at 20 °C)		1 hPa
Density (at 23 °C):		1,1 g/cm <sup>3</sup> ISO 2811-2
Water solubility:	The study does not need to be conducted because the substance is known to be insoluble in water.	
<b>Solubility in other solvents</b>		
not determined		
Partition coefficient:		not determined
Viscosity / dynamic: (at 23 °C)		875 mPa·s ISO 3219
Vapour density:		not determined
Evaporation rate:		not determined
<b>9.2. Other information</b>		
Solid content:		not determined

**SECTION 9: Physical and chemical properties****9.1. Information on basic physical and chemical properties**

Physical state:	liquid
Colour:	yellowish
Odour:	amine-like

**Test method****Changes in the physical state**

Initial boiling point and boiling range:	> 200 °C
--	----------

Flash point:	> 100 °C
--------------	----------

Lower explosion limits:	
-------------------------	--

Upper explosion limits:	
-------------------------	--

Density (at 23 °C):	0,998 g/cm <sup>3</sup>	ISO 2811-2
---------------------	-------------------------	------------









Water solubility:	slightly soluble
-------------------	------------------

Viscosity / dynamic: (at 25 °C)	115 mPa·s	ISO 3219
------------------------------------	-----------	----------

**SECTION 9: Physical and chemical properties****9.1. Information on basic physical and chemical properties**

Physical state:	liquid	
Colour:	light yellow	
Odour:	like: Amines	
		<b>Test method</b>
pH-Value:		not determined
<b>Changes in the physical state</b>		
Melting point:		not determined
Initial boiling point and boiling range:		> 200 °C
Flash point:		> 100 °C
<b>Flammability</b>		
Solid:		not applicable
Gas:		not applicable
Lower explosion limits:		1,2 vol. %
Upper explosion limits:		13 vol. %
Ignition temperature:		380 °C
<b>Auto-ignition temperature</b>		
Solid:		not applicable
Gas:		not applicable
Decomposition temperature:		not determined
<b>Oxidizing properties</b>		
Not oxidizing.		
Density (at 23 °C):		1,02 g/cm <sup>3</sup> ISO 2811
Water solubility:		insoluble
<b>Solubility in other solvents</b>		
not determined		
Partition coefficient:		not determined
Viscosity / dynamic: (at 23 °C)		550 mPa·s ISO 3219
Vapour density:		not determined
Evaporation rate:		not determined
<b>9.2. Other information</b>		
Solid content:		not determined

6 priedas. Dervos sukietėjimo duomenys

	<b>Harz L</b>  <b>Härter S</b> 	<b>Harz L</b>  <b>Härter L</b> 	<b>Harz L</b>  <b>Härter CL</b> 	<b>Harz L</b>  <b>Härter EPH 500</b> 
<b>Verarbeitungszeit</b> 100 g-Ansatz bei 20 °C <i>Processing time</i> 100 g batch at 20 °C	15 min	40 min	60 min	60 min
<b>Mischungsverhältnis</b> in Gewichtsteilen <i>Mixing ratio in</i> <i>parts by weight</i>	100 : 40	100 : 40	100 : 30	100 : 63
<b>Mischungsverhältnis</b> in Volumenteilen <i>Mixing ratio in</i> <i>parts by volume</i>	100 : 45	100 : 45	100 : 35	100 : 71
<b>Mischviskosität</b> in mPa.s <i>Mixing viscosity</i> <i>in mPa.s</i>	887 ± 100	580 ± 100	500 ± 100	620 ± 100
<b>Härtungsbedingungen</b> <i>Curing conditions</i>	16-24 h bei 23 °C <i>16-24 h at 23 °C (73 °F)</i>	24 h bei 23 °C Warmhärtung optional <i>24 h at 23 °C (73 °F)</i> <i>post curing optional</i>	24-48 h bei 23 °C Warmhärtung optional <i>24-48 h at 23 °C (73 °F)</i> <i>post curing optional</i>	24-36 h bei 23 °C <i>24-36 h at 23 °C (73 °F)</i>
<b>Wärmeformbeständigkeit</b> <i>Heat resistance</i>	Ca. 65 °C bei 23 °C <i>Approx. 65 °C (149 °F) at 23 °C (73 °F)</i>	Ca. 65 °C bei 23 °C Bis maximal 75 °C mit zusätzlichen 15 h bei 60 °C <i>Approx. 65 °C (149 °F)</i> <i>at 23 °C (73 °F)</i> <i>Up to 75 °C (167 °F) with</i> <i>additional 15 h at 60 °C</i> <i>(140 °F)</i>	Ca. 65 °C bei 23 °C Bis maximal 95 °C mit zusätzlichen 15 h bei 80 °C <i>Approx. 65 °C (149 °F)</i> <i>at 23 °C (73 °F)</i> <i>Up to 95 °C (203 °F)</i> <i>with additional 15 h at 80 °C (176 °C)</i>	Ca. 65 °C bei 23 °C <i>Approx. 65 °C (149 °F) at 23 °C (73 °F)</i>



Lentelėje pateikiami ABS plastiko bandinių spausdintų plačiąja briauna matavimų duomenys

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Išilgai spausdinti   ABS (balti)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	2,23	80,01	10,08	4,1	1	2,64	80	10,24	4,18
2	2,22	80,08	10,07	4,08	2	2,41	80,15	10,18	4,17
3	2,22	80,08	10,06	4,1	3	2,48	80,11	10,15	4,19
4	2,21	80,07	10,08	4,1	4	2,48	80,29	10,1	4,2
5	2,22	80,02	10,03	4,08	5	2,45	80,08	10,21	4,22
6	2,22	80,02	10,05	4,03	6	2,35	80,09	10,2	4,26
2)					2)				
1	2,22	80,09	10,09	4,09	1	2,46	80,16	10,24	4,28
2	2,23	80	10,06	4,08	2	2,41	80,05	10,22	4,21
3	2,21	80,02	10,08	4,11	3	2,34	80,08	10,24	4,22
4	2,23	80,08	10,08	4,06	4	2,36	80,21	10,2	4,23
5	2,22	80	10,1	4,1	5	2,48	80,04	10,23	4,21
6	2,21	80,06	10,05	4,08	6	2,34	80,17	10,18	4,2
3)					3)				
1	2,22	80,06	10,19	4,11	1				
2	2,22	80,01	10,12	4,12	2				
3	2,23	80	10,1	4,11	3				
4	2,21	80,08	10,08	4,1	4				
5	2,22	80,06	10,06	4,11	5				
6	2,22	80,09	10,09	4,1	6				
4)									
1	2,39	79,99	10,16	4,46					
2	2,4	80,03	10,1	4,44					
3	2,39	80,04	10,03	4,47					
4	2,38	80,01	10,07	4,45					
5	2,41	80,06	10,03	4,46					
6	2,39	80,04	10,1	4,43					
5)									
1	2,41	80,02	10,06	4,46		2,69	80,03	10,06	4,48
2	2,39	80,01	10,03	4,43		3,61	80,02	10,04	4,47
3	2,4	79,97	10,04	4,45		3,62	79,99	10,07	4,47
4	2,39	79,93	10,06	4,45		3,64	79,95	10,09	4,48
5	2,4	80,01	10,02	4,45		3,64	80,04	10,04	4,48
6	2,4	80,03	10,07	4,5		3,65	80,04	10,09	4,5
6)									
1	2,4	79,99	10,04	4,47		2,88	80,02	10,06	4,52
2	2,4	80,03	10,07	4,48		3,67	80,05	10,08	4,49
3	2,4	80,03	10,16	4,46		3,68	80,04	10,18	4,49

4	2,39	80,1	10,05	4,48		3,66	80,1	10,09	4,52
5	2,39	80,06	10,1	4,47		3,66	80,06	10,1	4,5
6	2,39	80	10,03	4,48		3,65	80,01	10,04	4,5

Lentelėje pateikiami ABS plastiko bandinių spausdintų siaurąja briauna matavimų duomenys

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Skersai spausdinti + ABS (balti)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	3,16	80,07	10,1	4,06	1	3,39	80,2	10,27	4,17
2	3,19	80,06	10,04	4,06	2	3,43	80,09	10,34	4,18
3	3,18	80,06	10,04	4,02	3	3,36	80,1	10,28	4,08
4	3,2	80,09	10,09	4,12	4	3,44	80,18	10,37	4,22
5	3,19	80,06	10,1	4	5	3,34	80,09	10,25	4,09
6	3,18	80,11	10	4,09	6	3,37	80,08	10,35	4,15
2)					2)				
1	3,2	80,08	10,03	4,04	1	3,46	80,15	10,38	4,22
2	3,19	80,14	10,01	4,02	2	3,38	80,2	10,26	4,07
3	3,2	80,08	10,05	4,04	3	3,46	80,16	10,42	4,19
4	3,16	80,02	10,1	4,05	4	3,44	80,16	10,32	4,15
5	3,15	80,04	10,09	4,02	5	3,41	80,19	10,32	4,17
6	3,17	80,21	10,1	4,04	6	3,34	80,4	10,12	4,08
3)					3)				
1	3,18	80,08	10,05	4,08	1				
2	3,17	80,08	10,08	4,08	2				
3	3,18	80,03	10,1	4,03	3				
4	3,17	80,18	10,02	4,05	4				
5	3,19	80,04	10,08	4,08	5				
6	3,18	80,06	10,13	4,02	6				
4)					4)				
1	3,19	80,16	10,36	4,13					
2	3,2	80,07	10,41	4,16					
3	3,2	80,11	10,43	4,14					
4									
5									
6									
5)					5)				
1	3,2	79,95	10,32	4,03	1	3,41	79,98	10,34	4,07
2	3,2	79,96	10,32	4,03	2	3,4	79,98	10,34	4,06
3					3				
4					4				
5					5				
6					6				
6)					6)				
1	3,21	80,08	10,45	4,14	1	3,43	80,1	10,48	4,15
2	3,19	80,1	10,36	4,1	2	3,41	80,1	10,38	4,13
3					3				

Lentelėje pateikiami PLA plastiko bandinių spausdintų plačiaja briauna matavimų duomenys

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Išilgai spausdinti   PLA (mėlyni)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	3,58	79,81	10,37	4,16	1	3,71	78,86	10,36	4,18
2	3,61	79,95	10,34	4,17	2	3,75	79,97	10,34	4,18
3	3,56	79,89	10,2	4,11	3	3,69	79,9	10,32	4,13
4	3,61	80,06	10,14	4,07	4	3,7	80,07	10,18	4,07
5	3,6	79,75	10,33	4,23	5	3,71	79,75	10,42	4,26
6	3,59	79,98	10,19	4,16	6	3,68	79,99	10,19	4,09
2)					2)				
1	3,56	80,2	10,35	3,93	1	3,61	80,22	10,46	3,99
2	3,57	80,06	10,27	3,97	2	3,62	80,05	10,37	3,99
3	3,58	80,02	10,12	4,01	3	3,64	80,03	10,17	4,1
4	3,55	80,26	10,51	3,86	4	3,62	80,27	10,6	3,99
5	3,55	80,26	10,44	3,92	5	3,63	80,27	10,47	4,03
6	3,54	80	10,48	3,86	6	3,59	80,28	10,57	3,95
3)					3)				
1	3,48	80,39	10,58	3,78	1				
2	3,6	79,99	10,21	4,09	2				
3	3,6	80,03	10,26	4,09	3				
4	3,6	80,02	10,22	4,05	4				
5	3,6	79,95	10,14	4,05	5				
6	3,58	79,97	10,21	4,07	6				
4)									
1	3,43	80,03	10,21	4,07	1				
2	3,47	79,93	10,2	4,15	2				
3	3,43	80,07	10,12	4,06	3				
4	3,43	80,07	10,18	4,04	4				
5	3,44	80,08	10,17	4,08	5				
6	3,44	80,05	10,13	4,07	6				
5)									
1	3,43	79,89	10,12	4,2	1	3,92	79,9	10,14	4,22
2	3,44	79,92	10,17	4,18	2	4,03	79,96	10,19	4,2
3	3,43	79,92	10,12	4,21	3	4,02	79,94	10,18	4,22
4	3,39	79,88	10,18	4,21	4	4,01	79,93	10,22	4,24
5	3,4	79,91	10,17	4,21	5	4	79,92	10,19	4,22
6	3,39	79,95	10,13	4,21	6	3,98	79,98	10,14	4,23
6)									
1	3,44	80,05	10,23	4,04	1	3,54	80,05	10,23	4,07
2	3,45	80,09	10,2	4,11	2	3,62	80,09	10,2	4,12
3	3,59	80,01	10,33	4,16	3	3,72	80,01	10,34	4,16

4	3,56	80,05	10,25	4,1	4	3,71	80,05	10,24	4,13
5	3,6	80,02	10,29	4,18	5	3,77	80,02	10,29	4,2
6	3,56	80,04	10,22	4,1	6	3,72	80,04	10,26	4,1
7)									
1	2,95	79,81	10,06	4,2	1	3,22	79,85	10,14	4,23
2	2,7	79,93	10,19	4,23	2	3,92	79,95	10,22	4,23
3	2,95	79,8	10,15	4,21	3	3,93	79,85	10,17	4,23
4	2,92	79,85	10,03	4,2	4	3,9	79,88	10,06	4,22
5	2,96	79,81	10,13	4,18	5	3,93	79,84	10,14	4,21
6	2,92	79,81	10,06	4,22	6	3,92	79,86	10,06	4,24
8)									
1	2,81	80,24	10,23	3,92	1	3,69	80,24	10,31	3,97
2	2,86	80,05	10,18	3,98	2	3,73	80,05	10,2	4,03
3	2,82	80,1	10,31	3,97	3	3,7	80,1	10,31	4,01
4	2,86	80,37	10,14	3,94	4	3,65	80,38	10,14	3,94
5	2,85	80,31	10,04	4,01	5	3,71	80,45	10,07	4,04
6	2,82	80,1	10,17	3,96	6	3,7	80,1	10,18	4,01
9)									
1	2,84	80,27	10,04	3,97	1				
2	2,81	80,21	10,07	3,97	2				
3	2,8	80,18	10,06	3,96	3				
4	2,83	80,25	10,12	4,05	4				
5	2,86	80,03	10,09	4,02	5				
6	2,82	80,17	10,29	3,95	6				

Lentelėje pateikiami PLA plastiko bandinių spausdintų siaurąja briauna matavimų duomenys

Prieš įmirkymą					Po įmirkymo				
Skersai spausdinti + PLA (mėlyni)									
	Masė	Ilgis	Plotis	Storis		Masė	Ilgis	Plotis	Storis
1)					1)				
1	3,38	79,44	10,14	4,31	1	3,45	79,81	10,17	4,33
2	3,38	79,82	10,17	4,32	2	3,45	79,83	10,17	4,32
3	3,38	79,29	10,15	4,3	3	3,45	79,86	10,15	4,36
4	3,37	79,39	10,1	4,34	4	3,45	79,98	10,18	4,36
5	3,39	79,75	10,1	4,31	5	3,47	79,96	10,2	4,31
6	3,4	79,88	10,14	4,23	6	3,47	79,92	10,15	4,23
2)					2)				
1	3,4	79,84	9,95	4,26	1	3,46	79,85	10,17	4,33
2	3,39	79,85	10,03	4,17	2	3,45	79,86	10,17	4,32
3	3,39	79,86	9,94	4,33	3	3,44	79,87	10,15	4,36
4	3,39	79,89	9,97	4,32	4	3,43	79,98	10,18	4,33
5	3,38	79,91	9,9	4,41	5	3,44	79,96	10,2	4,46
6	3,39	79,88	9,95	4,48	6	3,44	79,92	10,15	4,5
3)					3)				
1	3,39	79,82	9,88	1,31	1				
2	3,37	79,87	9,86	4,56	2				
3	3,4	79,82	9,84	4,54	3				
4	3,38	79,58	10,12	4,25	4				
5	3,38	79,86	10,15	4,29	5				
6	3,4	79,74	10,1	4,31	6				
4)									
1	3,34	80,17	9,83	4,24	1				
2	3,38	80,14	9,91	4,31	2				
3	3,35	80,17	9,88	4,27	3				
4					4				
5					5				
6					6				
5)					5)				
1	3,4	79,91	10,2	4,25	1	4,08	79,93	10,24	4,27
2	3,36	79,95	10,21	4,24	2	4,08	79,97	10,22	4,27
3					3				
4					4				
5					5				
6					6				
6)					6)				
1	3,36	80,2	9,9	4,25	1	3,94	80,2	9,91	4,31
2	3,38	80,13	9,92	4,29	2	3,92	80,16	9,94	4,37
3									

4									
5									
6									
7)									
1	2,68	80,06	10,2	4,24	1	3,88	80,06	10,2	4,24
2	2,73	79,95	10,24	4,23	2	3,94	79,95	10,24	4,24
3					3				
4					4				
5					5				
6					6				
8)									
1	2,75	79,93	10,17	4,22	1	3,79	79,97	10,22	4,23
2	2,7	79,9	10,18	4,22	2	3,93	79,92	10,2	4,24
3									
4									
5									
6									

## ABS plastiko lenkimo bandymo rezultatai išreikšti MPa

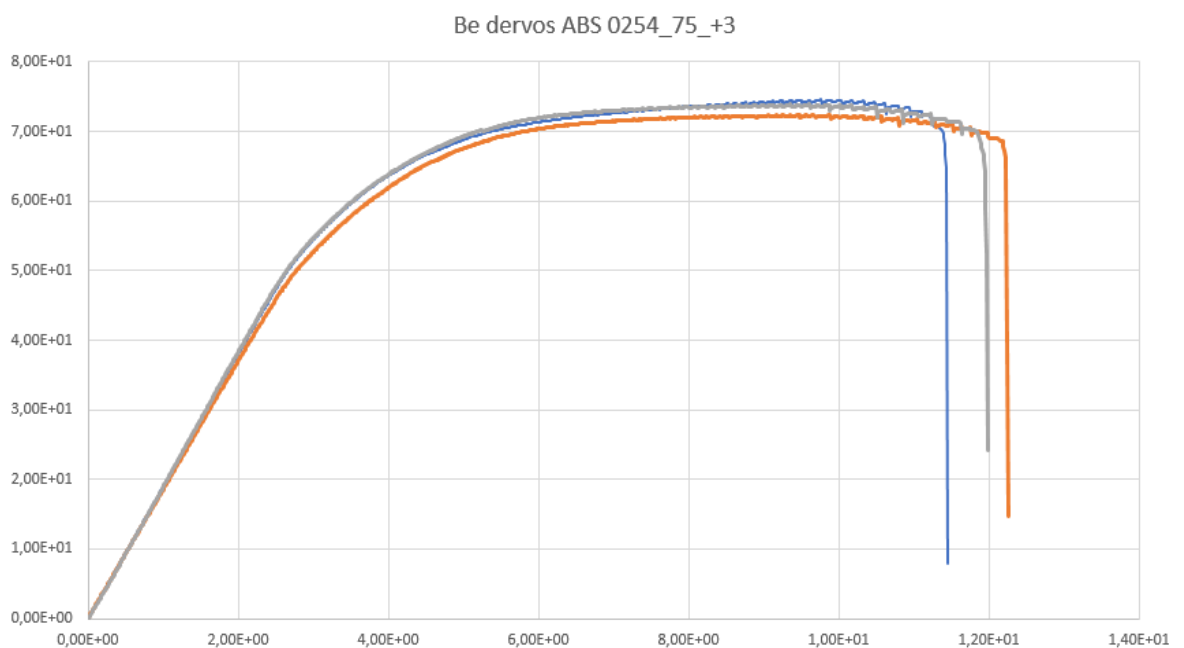
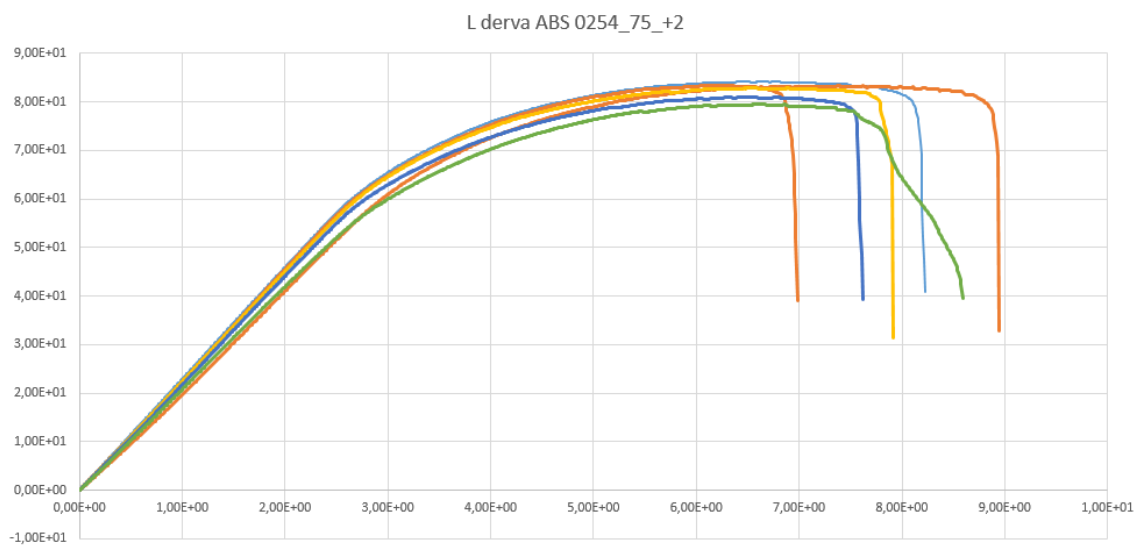
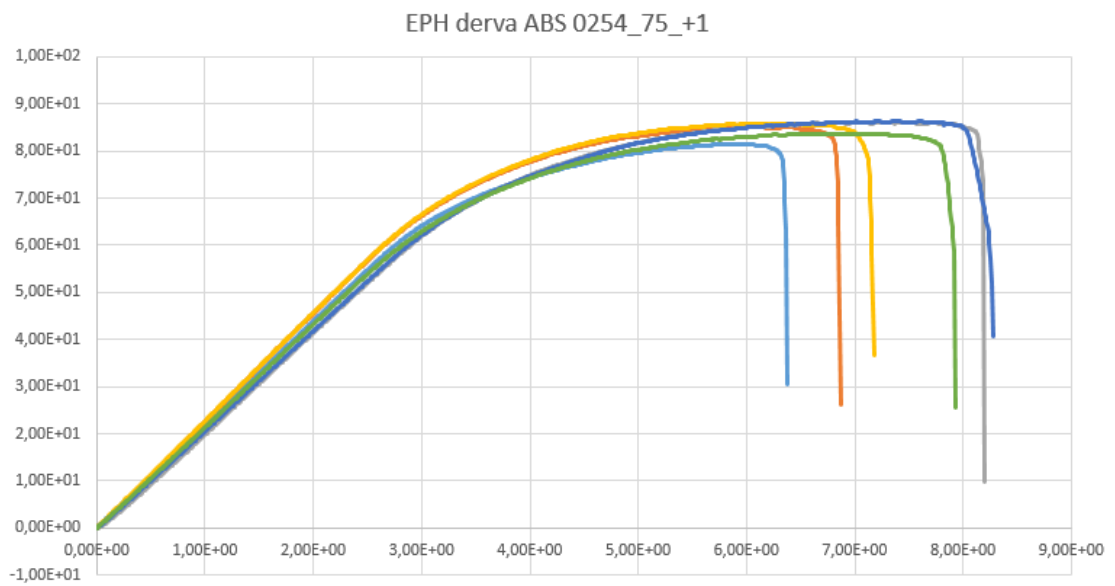
Spusdinimo kriterijai	ABS 0,254 75%		
	I1 (L)	I2 (EPH500)	I3 Be dervos
MAX	40,699	37,8	33,36
MIN	34,420	35,899	31,660
AVG	38,736	36,539	32,247
Spusdinimo kriterijai	ABS 0,254 75%		
	1+(EPH)	2+ (L)	3+ (be dervos)
MAX	51,799	50,5	44,74
MIN	48,859	47,719	43,420
AVG	50,869	49,433	44,165
Spusdinimo kriterijai	ABS 0,3 75%		
	4+ (be dervos)	5+ (EPH)	6+(L)
MAX	45,075	48,952	52,2
MIN	42,407	47,940	49,440
AVG	44,020	48,446	50,820
Spusdinimo kriterijai	ABS 0,3 75%		
	I4(be dervos)	I5(EPH)	I6 (L)
MAX	32,16	51,16	60,6
MIN	29,489	40,931	42,247
AVG	30,755	42,247	54,661

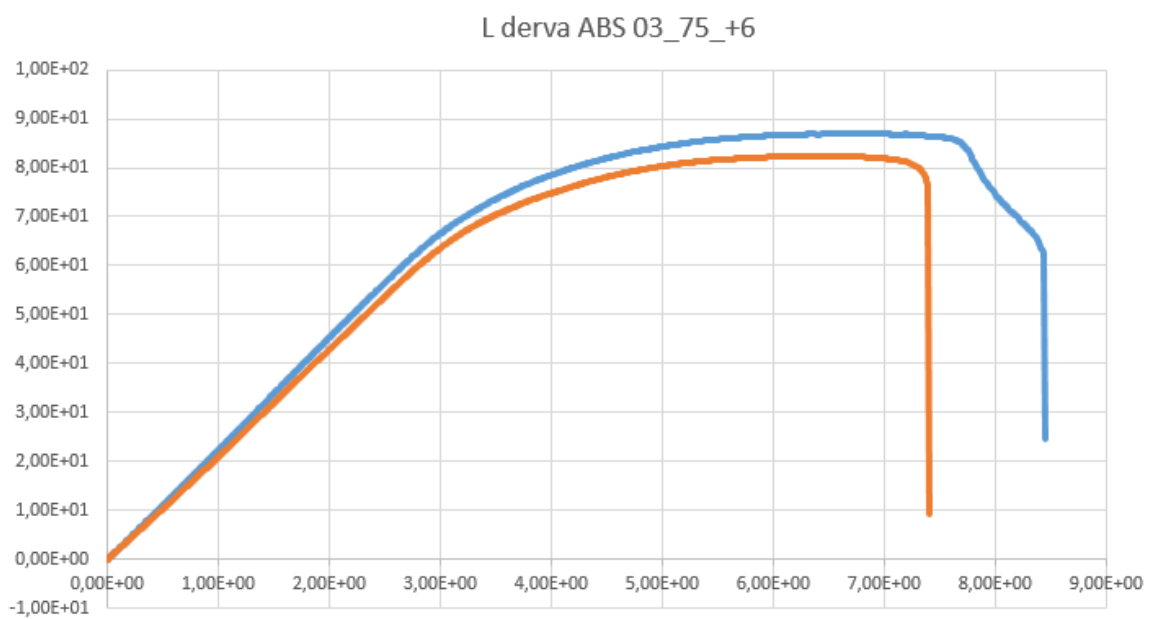
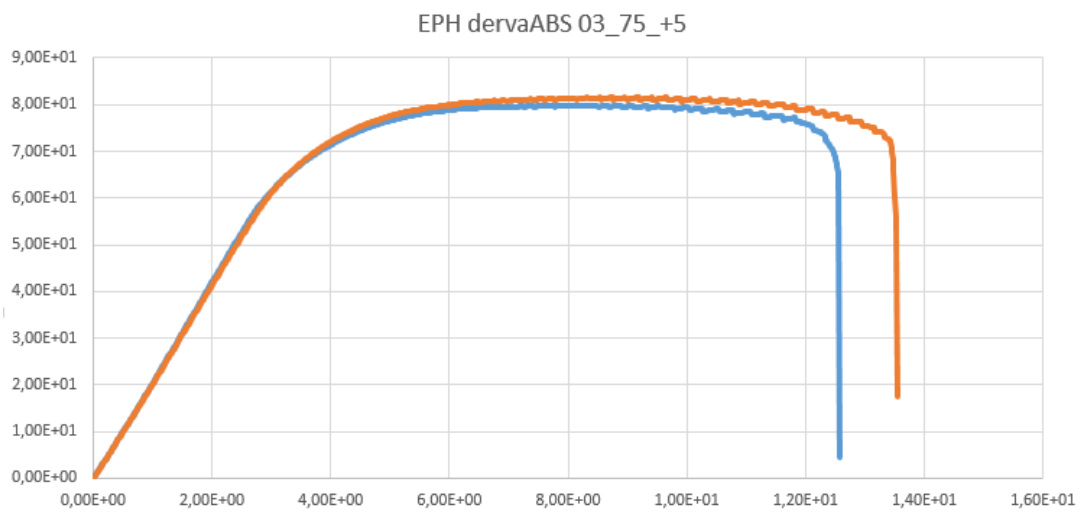
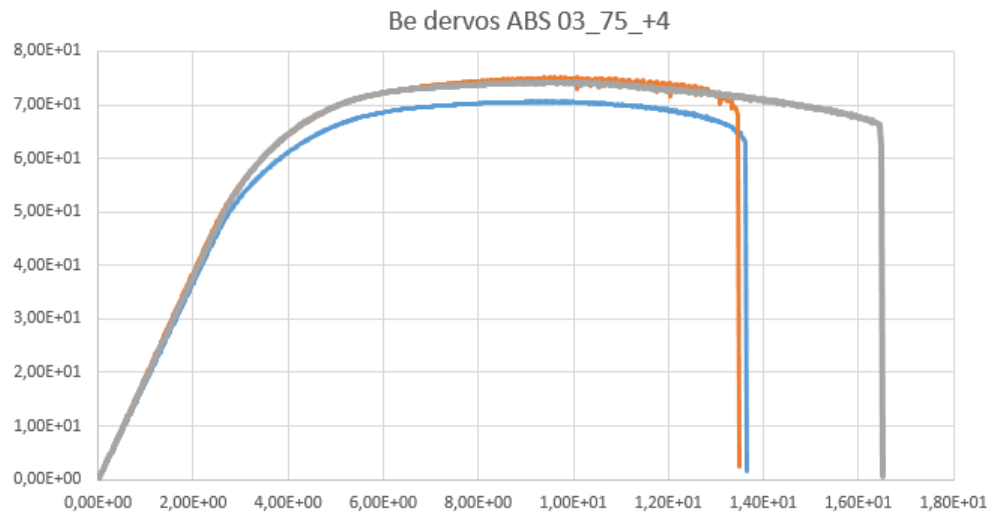


## PLA plastiko lenkimo bandymo rezultatai išreikšti MPa

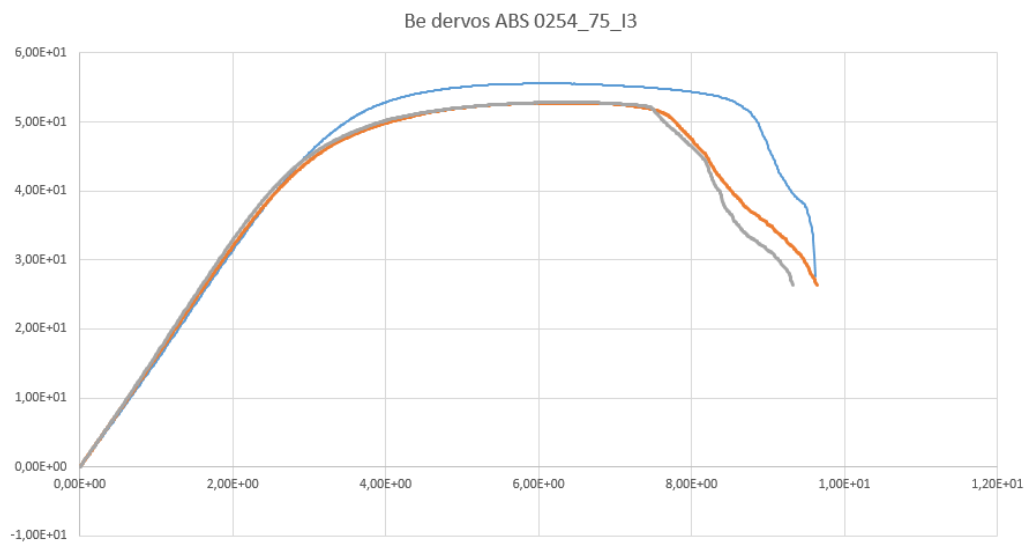
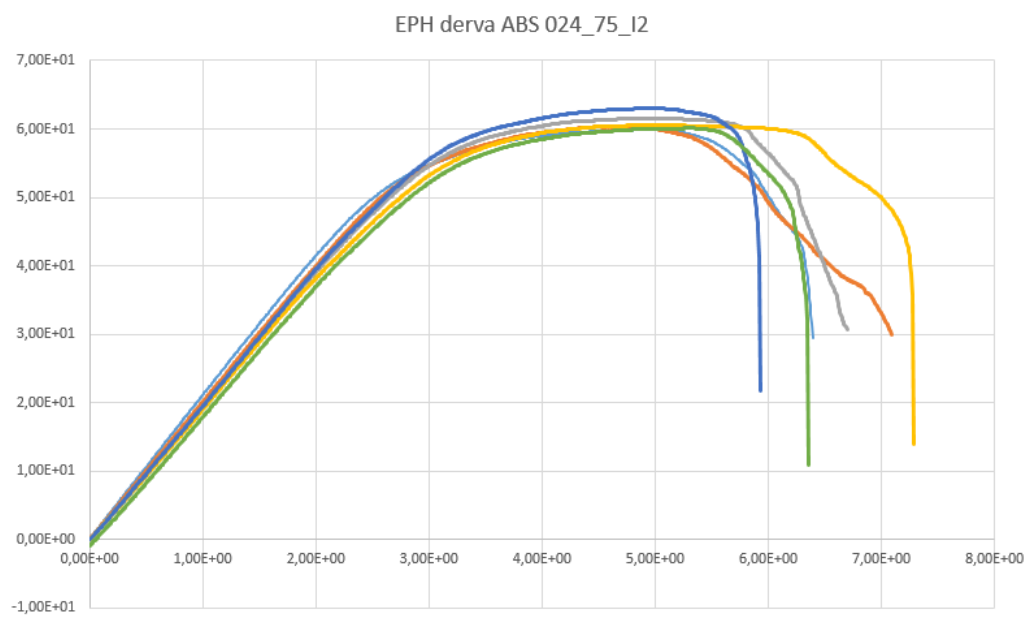
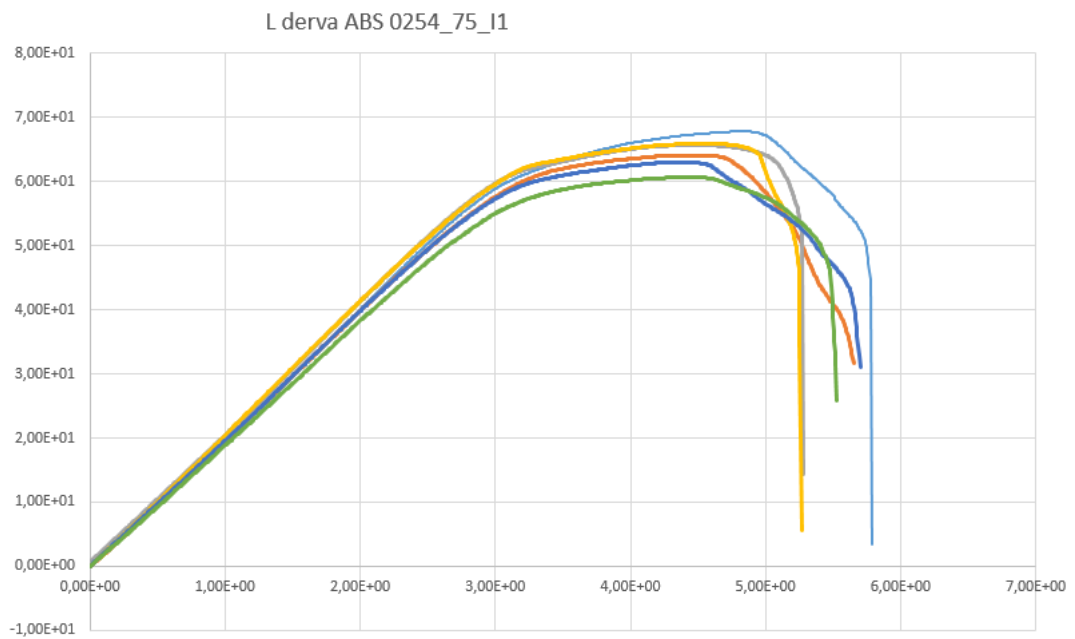
Spausdinimo kriterijai	PLA 0,254 75%		
	I1 (L)	I2 (EPH500)	I3 Be dervos
MAX	89,802	92,658	76,554
MIN	82,002	79,242	75,06
AVG	87,189	84,827	75,604
Spausdinimo kriterijai	PLA 0,254 75%		
	1+(EPH)	2+ (L)	3+ (be dervos)
MAX	91,542	85,362	92,622
MIN	84	75,402	79,842
AVG	87,28	79,643	86,563
Spausdinimo kriterijai	PLA 0,3 75%		
	4+ (be dervos)	5+ (EPH)	6+(L)
MAX	67,362	76,776	81,822
MIN	63,522	76,338	78,978
AVG	65,054	76,557	80,4
Spausdinimo kriterijai	PLA 0,3 75%		
	I4(be dervos)	I5(EPH)	I6 (L)
MAX	73,338	86,598	84,138
MIN	65,058	83,016	75,498
AVG	66,273	84,632	79,259
Spausdinimo kriterijai	PLA 0,3 75%		
	4+(be dervos)	7+ (L)(50%)	8+ (EPH)
MAX	67,362	68,058	72,438
MIN	63,522	65,82	60,498
AVG	65,054	66,939	66,468
Spausdinimo kriterijai	PLA 0,3 50%		
	I7 (EPH)	I8 (L)	I9 (Be dervos)
MAX	77,748	79,824	62,556
MIN	63,942	77,922	60,6
AVG	73,412	78,858	61,778

13 priedas. Lenkimo bandymo grafikai, lekiant ABS medžiagos bandinius, spausdintus plačiaja briauna.

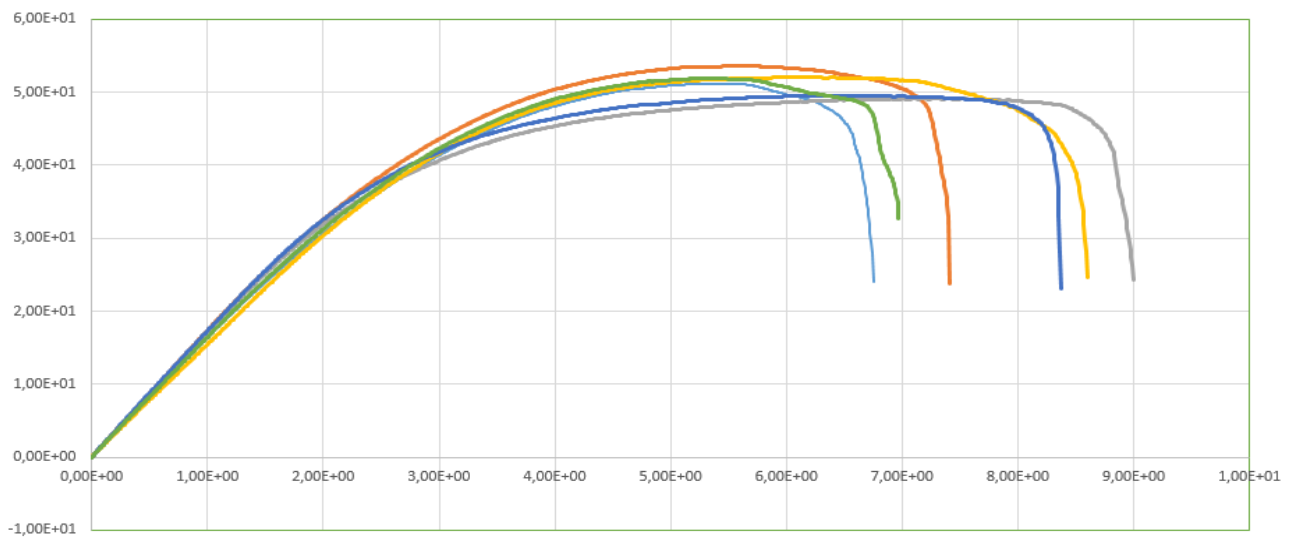




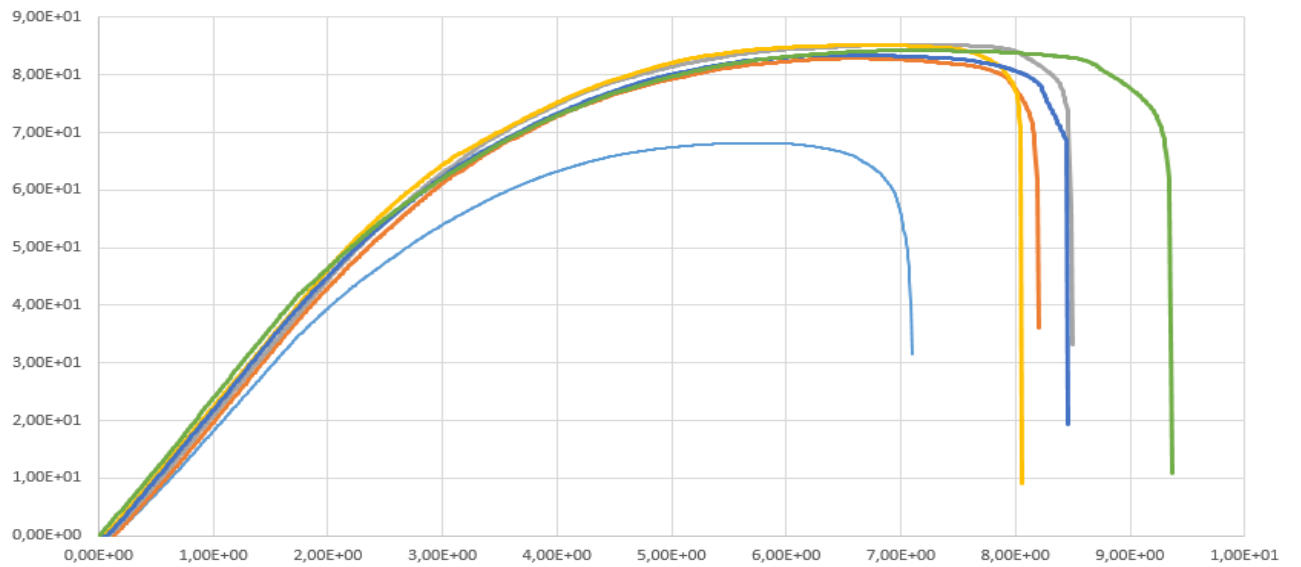
14 priedas. Lenkimo bandymo grafikai, lekiant ABS medžiagos bandinius, spausdintus siaurąja briauna.



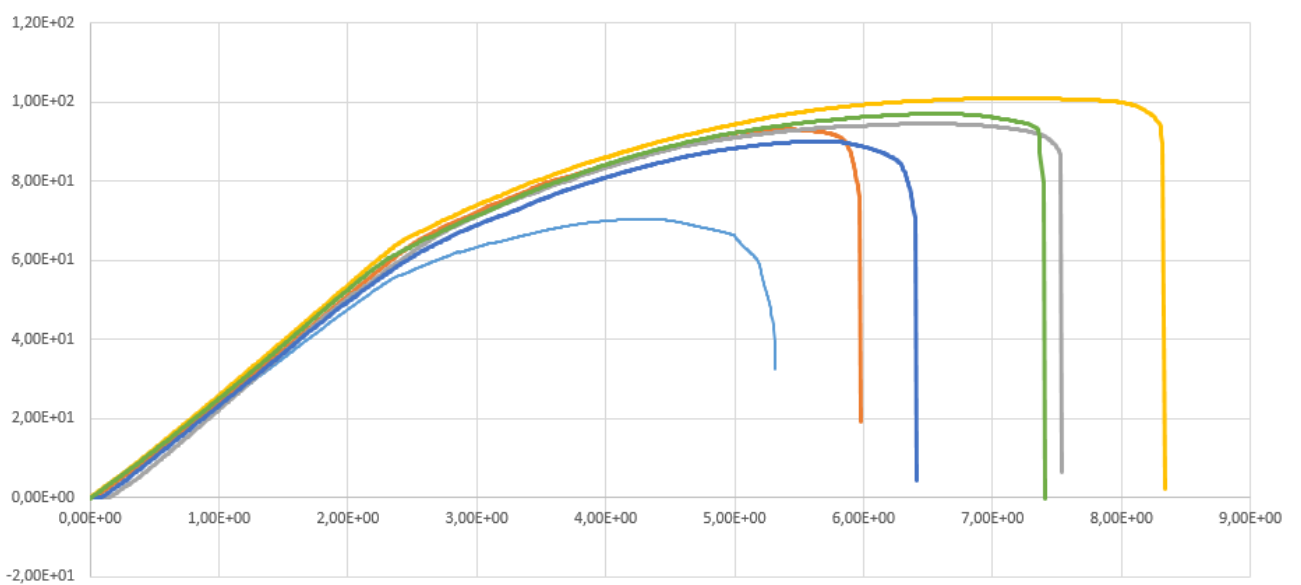
Be dervos ABS\_03\_75\_I4



EPH derva ABS 03\_75\_I5

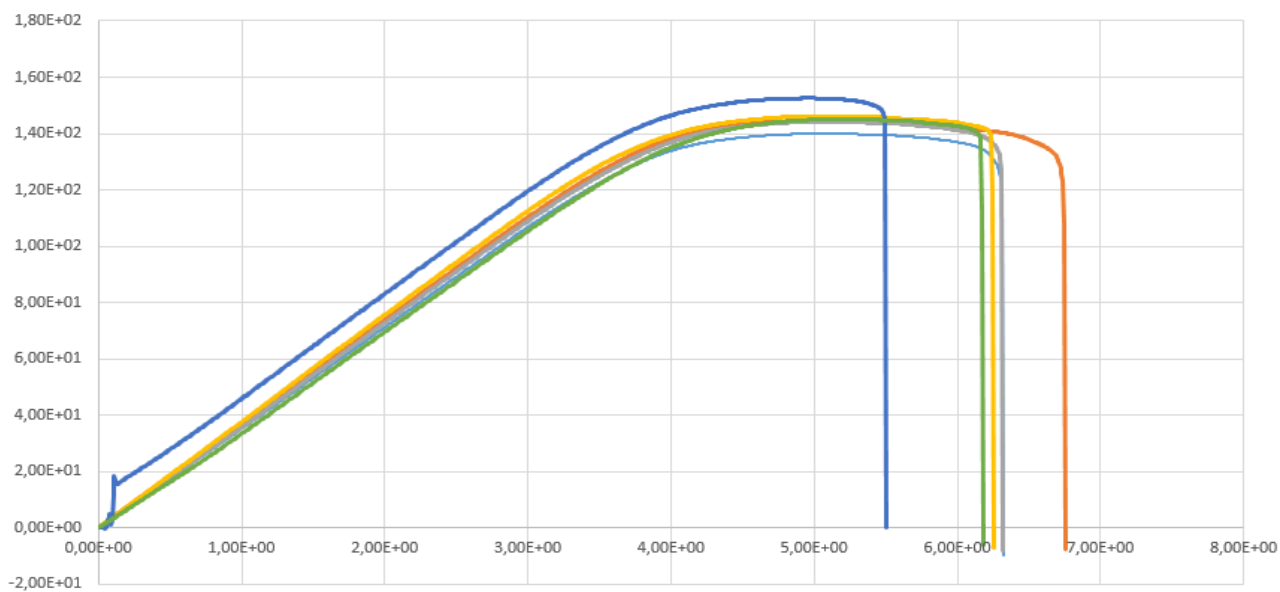


L derva ABS 03\_75\_I6

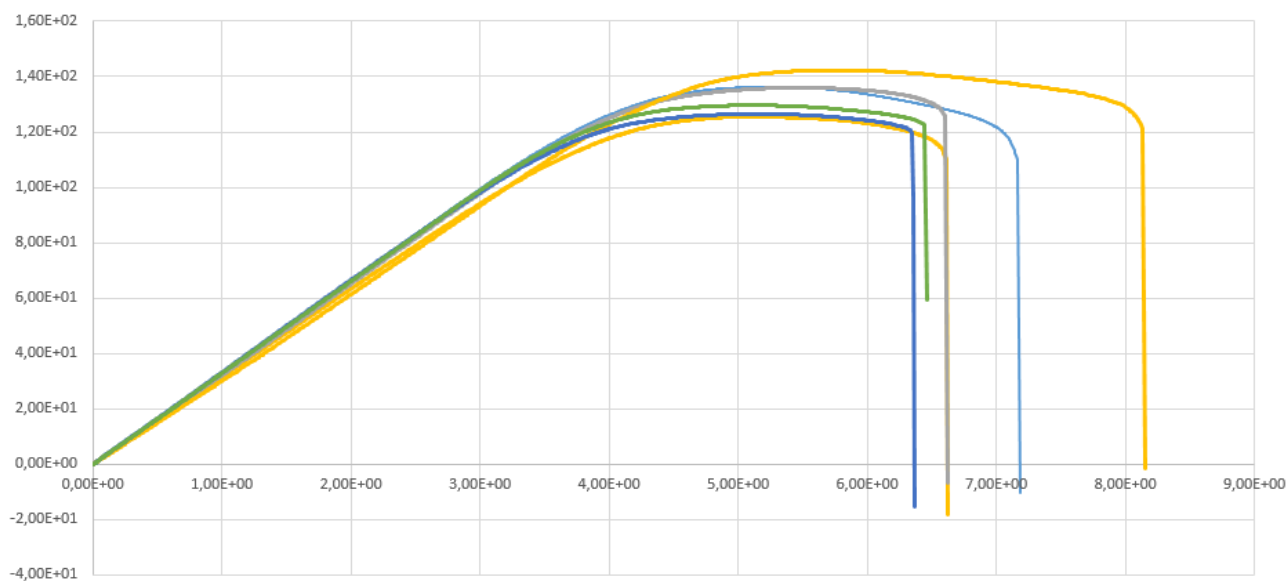


15 priedas. Lenkimo bandymo grafikai, lekiant PLA medžiagos bandinius, spausdintus plačiaja briauna.

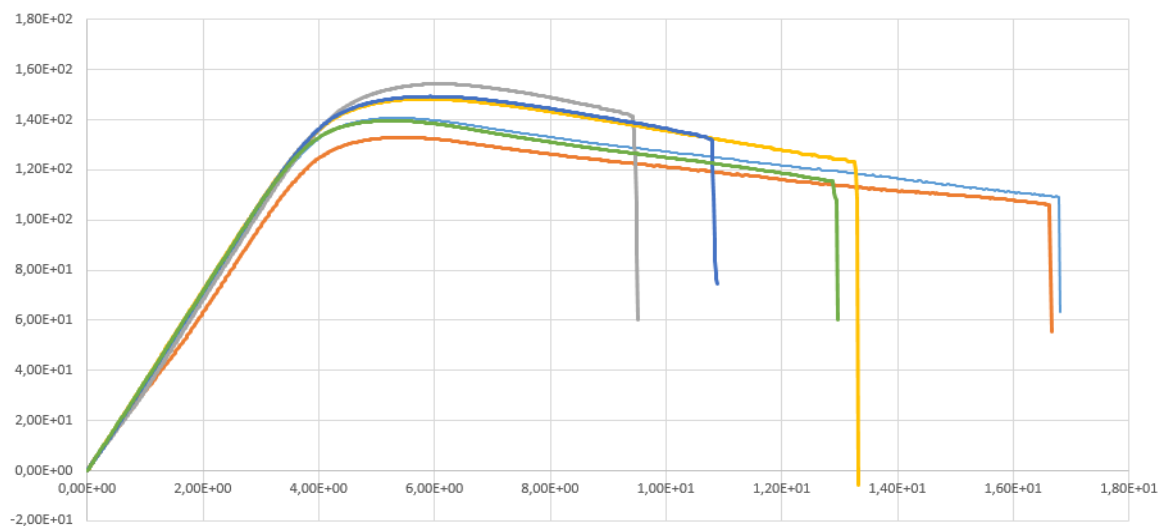
EPH derva PLA 0254\_75\_+1



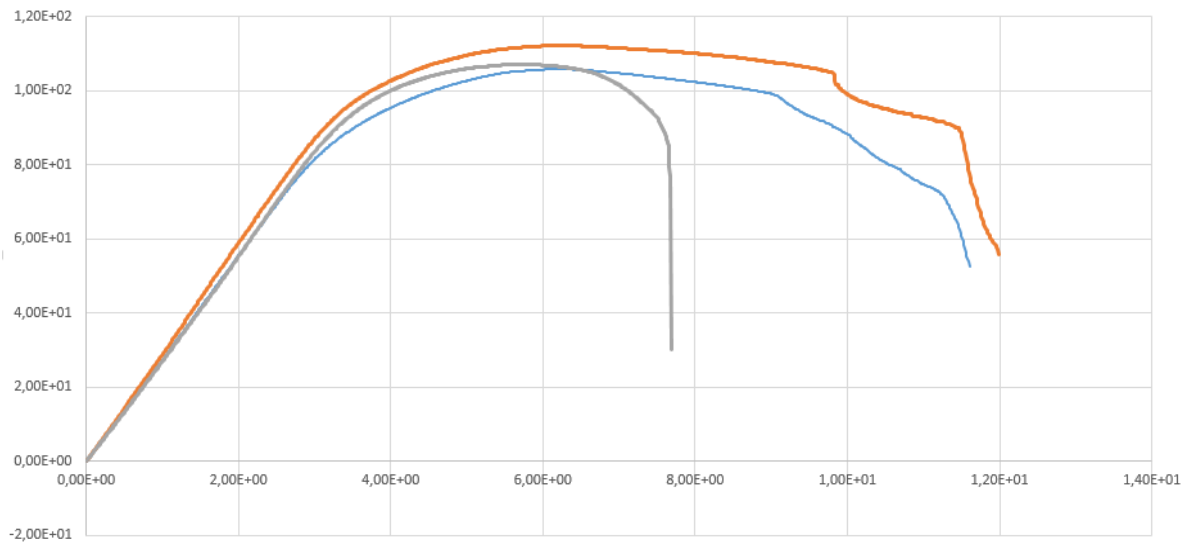
L derva PLA 0254\_75\_+2



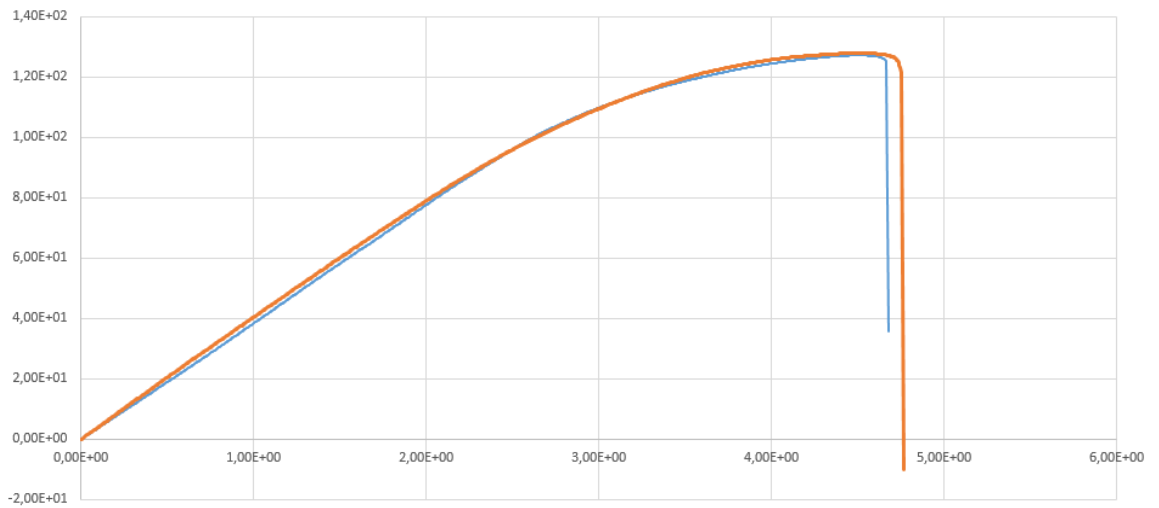
BE dervos PLA 0254\_75\_+3



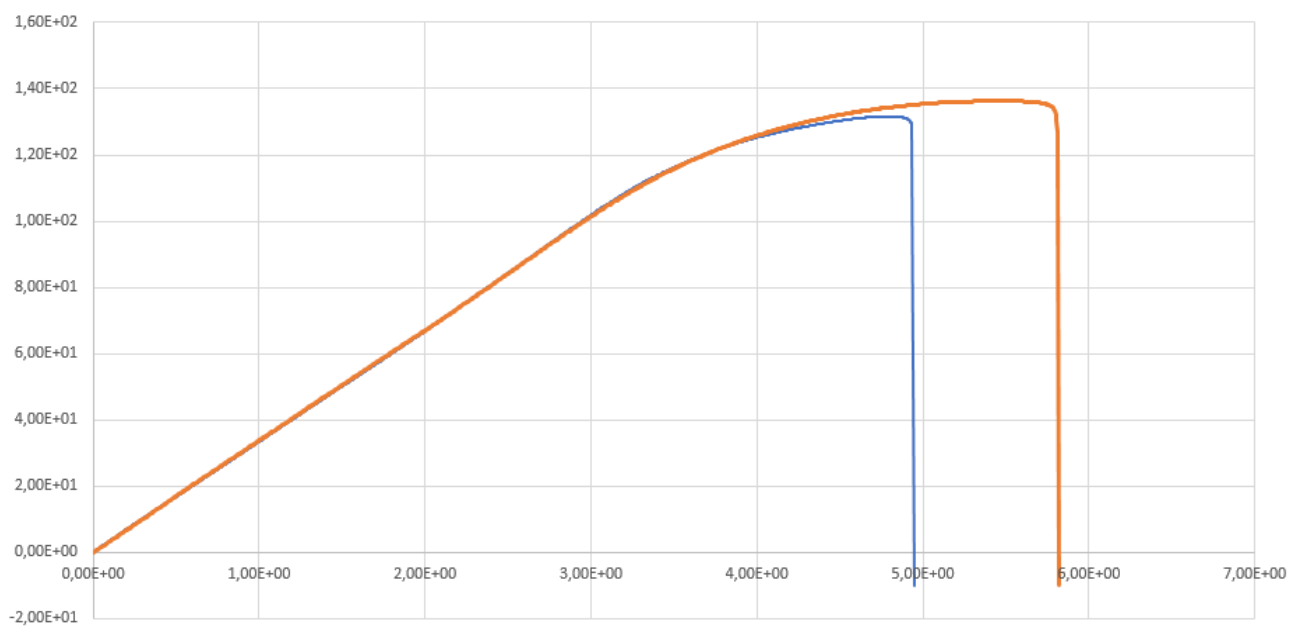
Be dervos PLA 03\_75\_+4



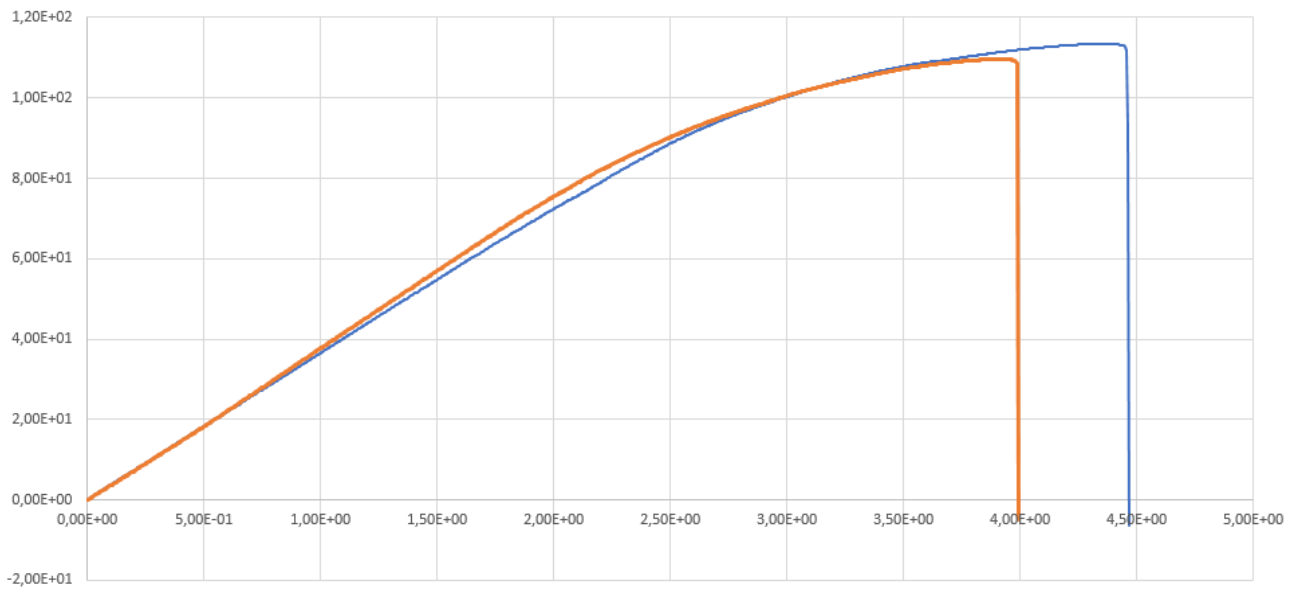
EPH derva PLA 03\_75\_+5



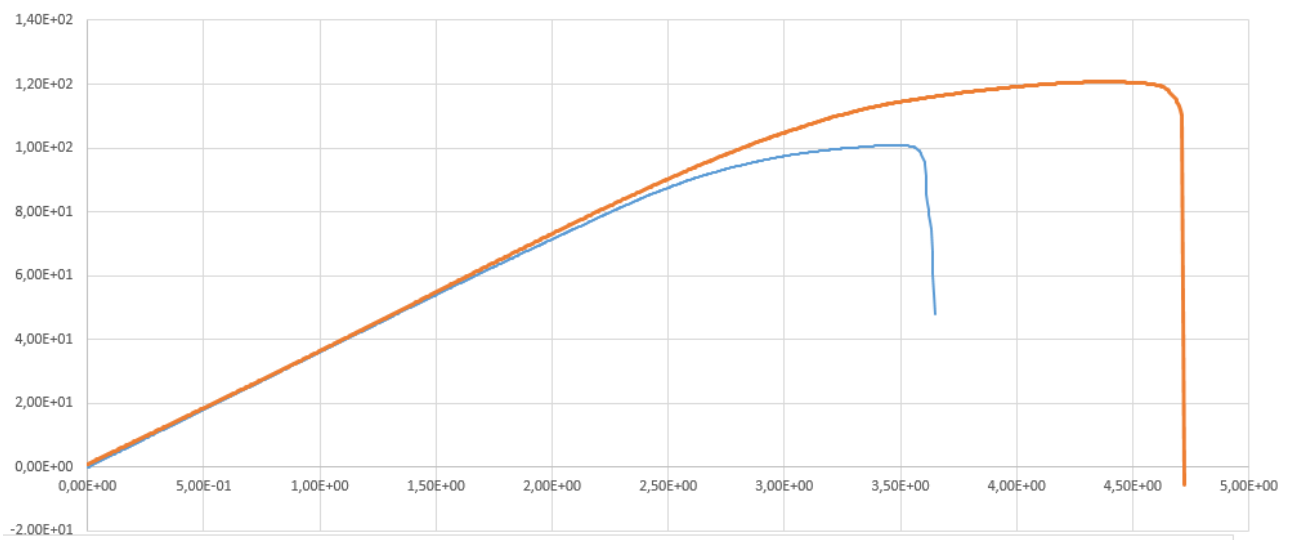
L derva PLA 03\_75\_+6



L derva PLA 03\_75\_+7

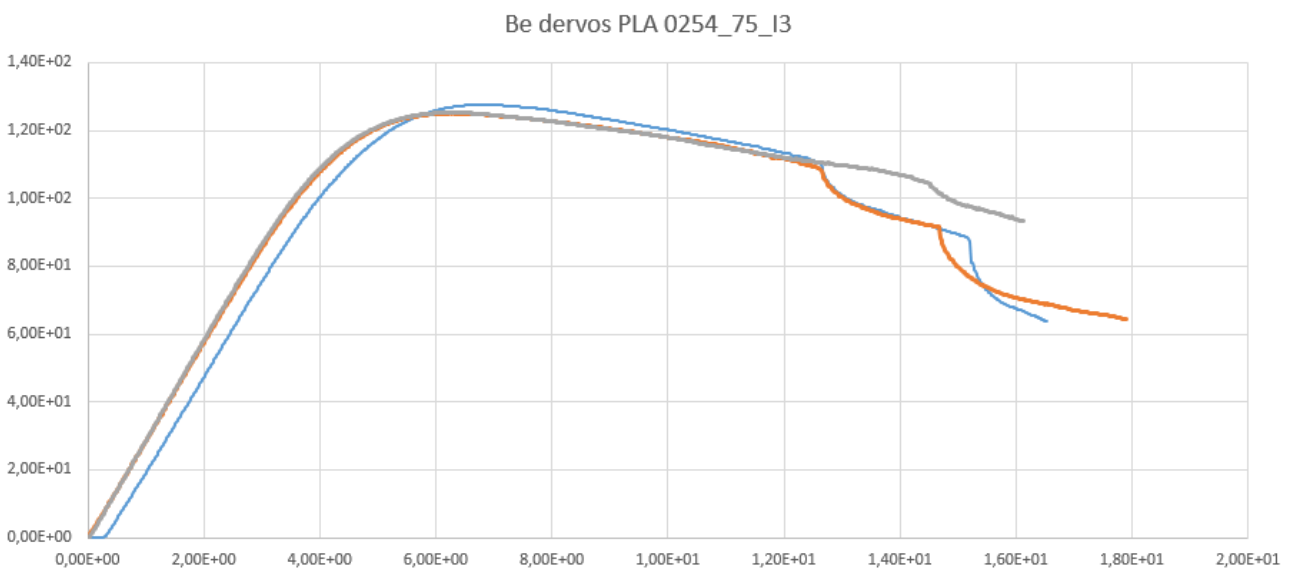
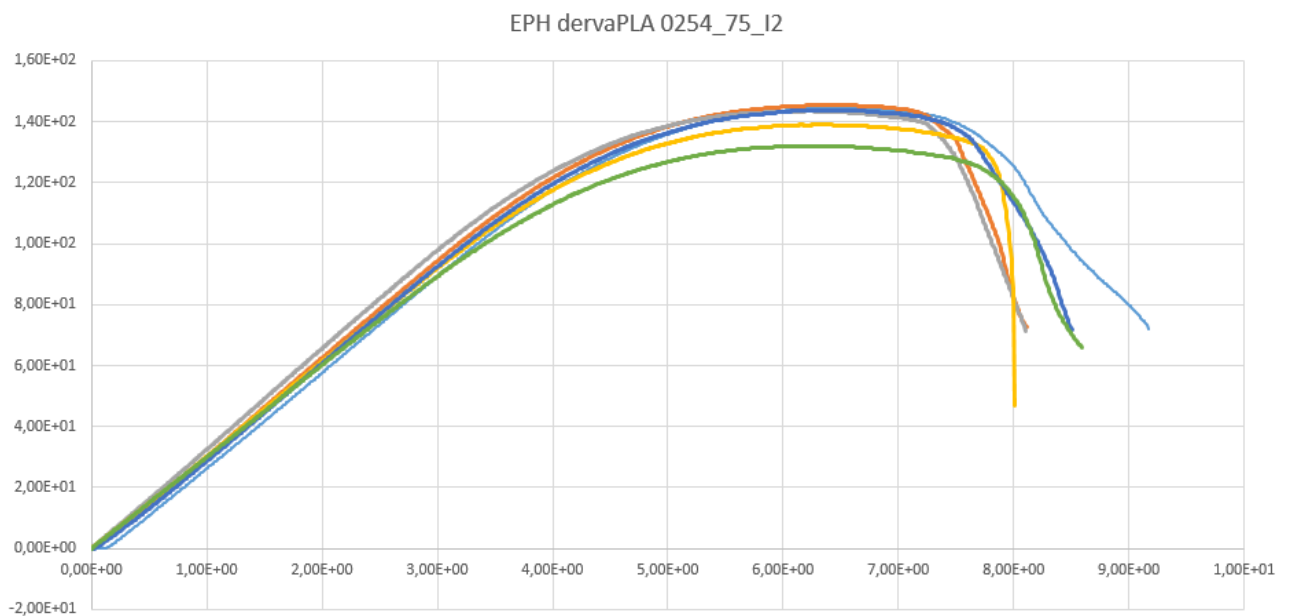
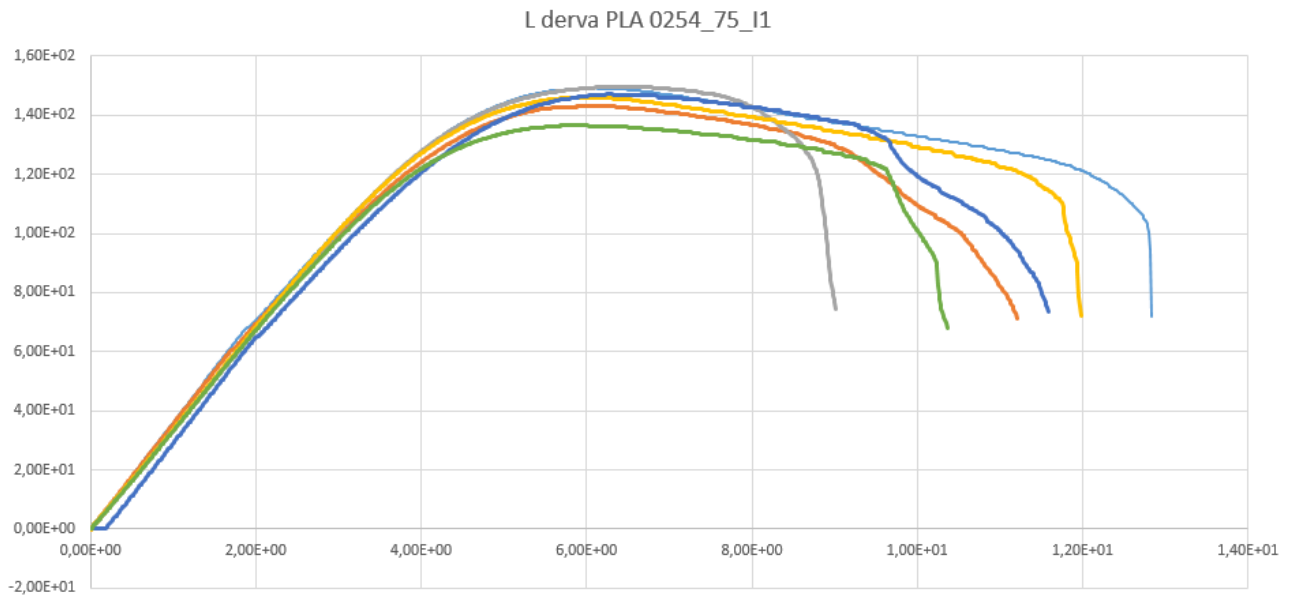


EPH derva PLA 03\_75\_+8

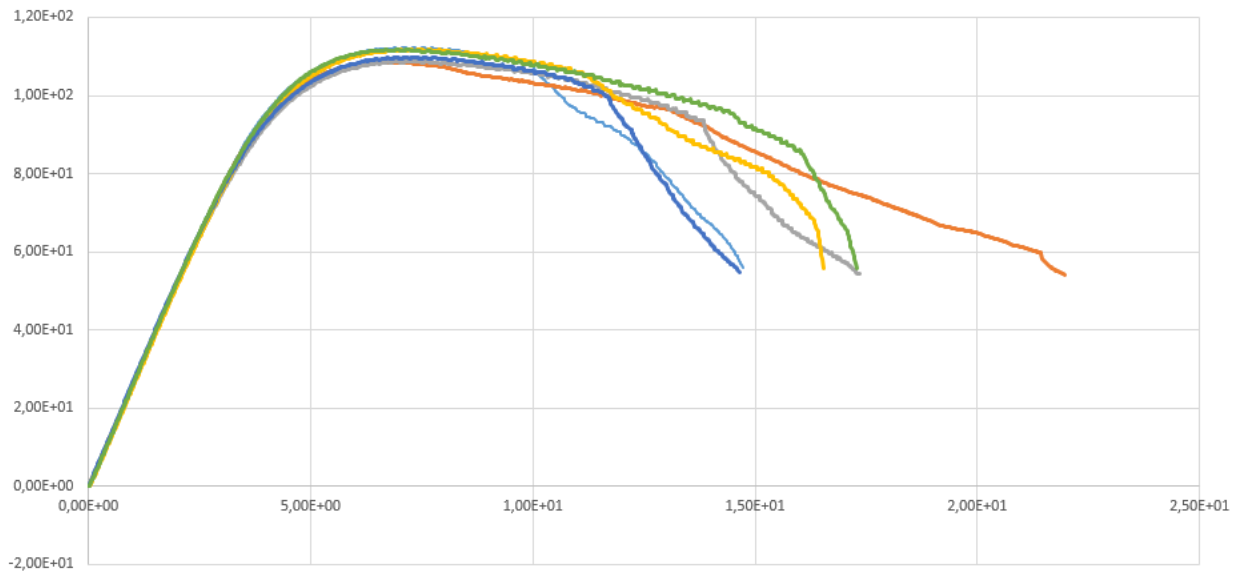




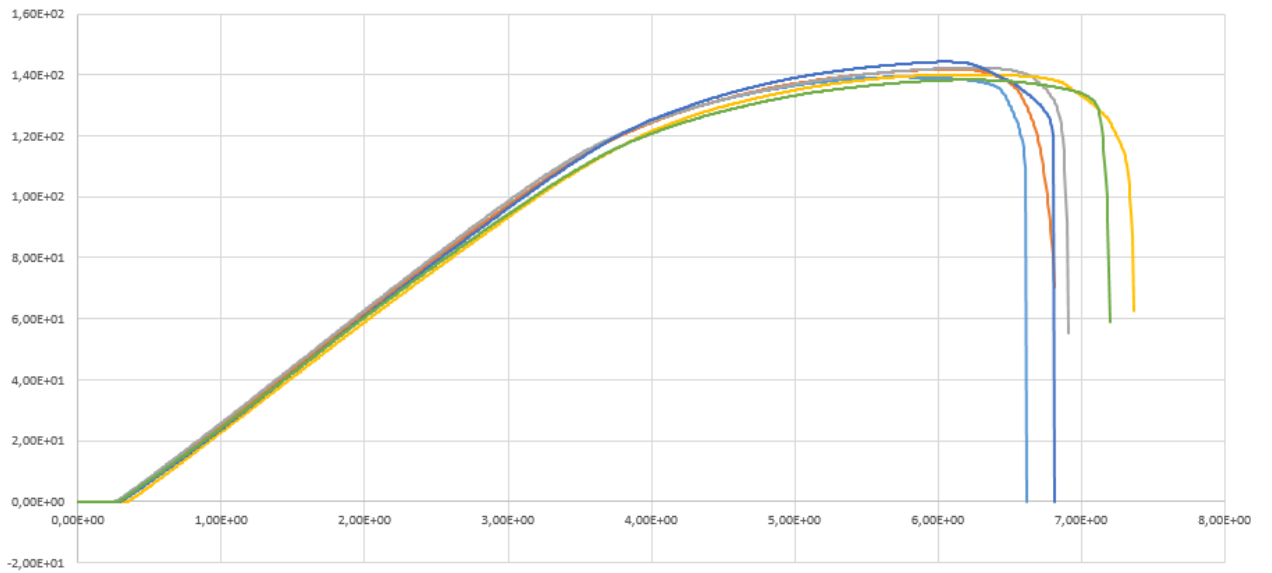
16 priedas. Lenkimo bandymo grafikai, lekiant PLA medžiagos bandinius, spausdintus siaurąja briauna.



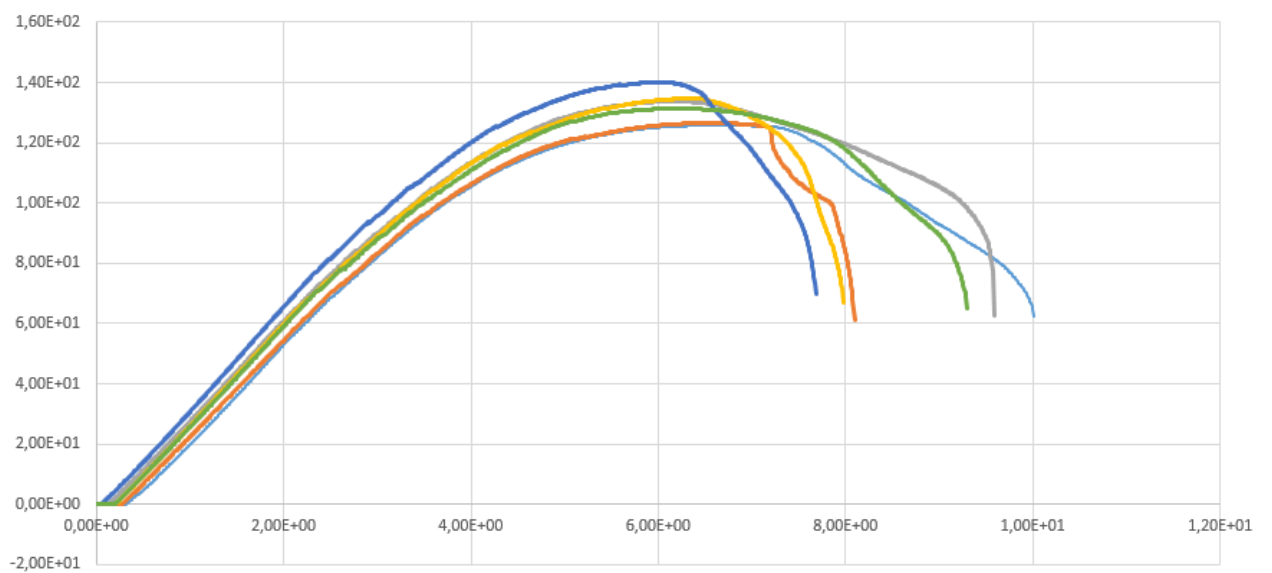
Be dervos PLA 03\_75\_I4



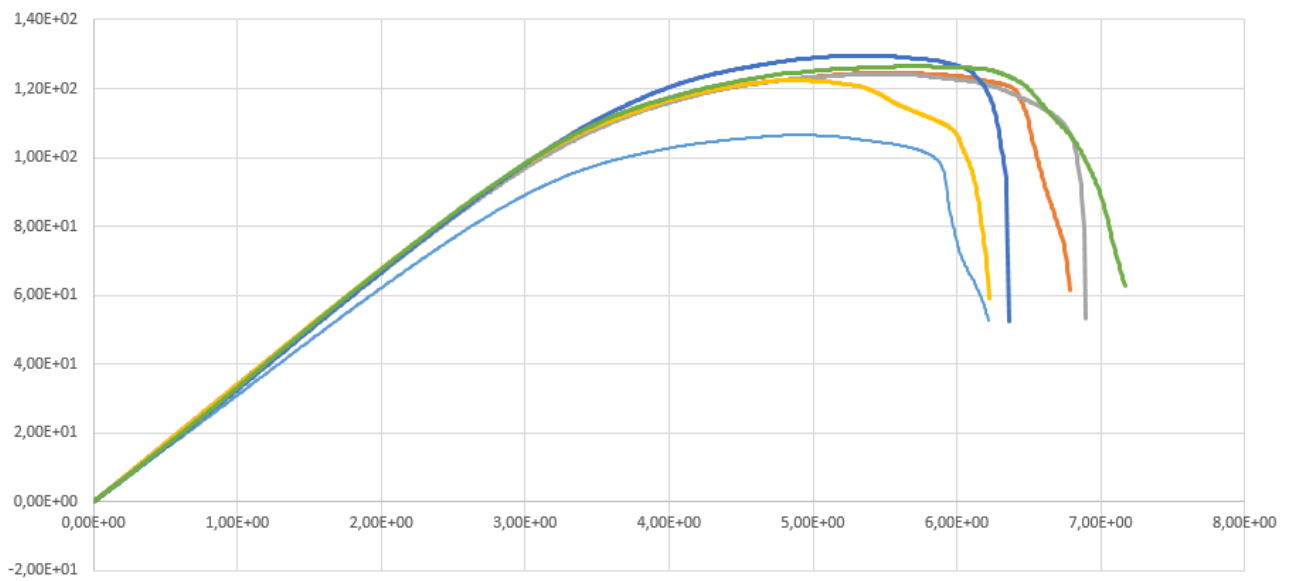
EPH derva PLA 03\_75\_I5



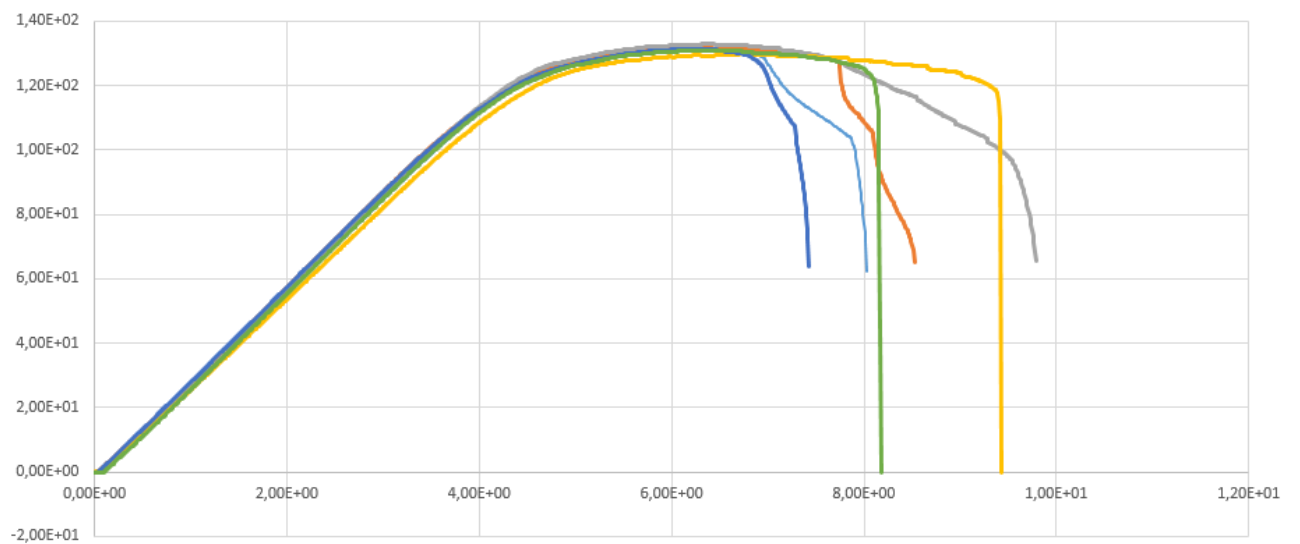
L derva PLA 03\_75\_I6



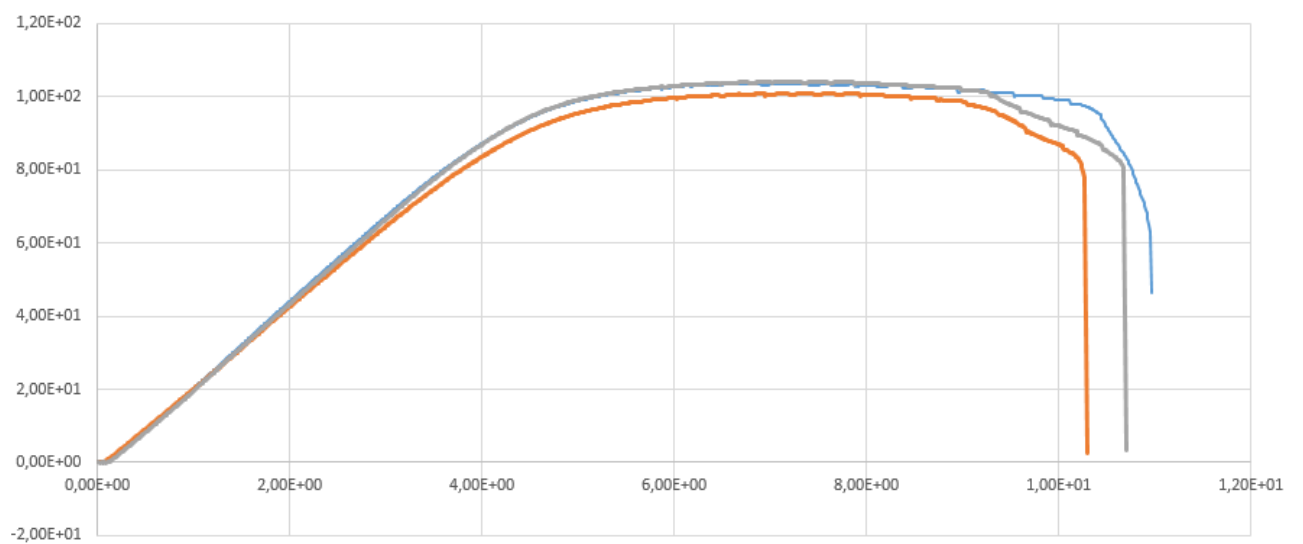
EPH derva PLA 03\_50\_I7



L derva PLA 03\_50\_I8



Be dervos PLA 03\_50\_I9



## 17 priedas. ABS bandinių lenkimo rezultatai N

Spausdinimo kriterijai	MAX	MIN	AVG
ABS 0,254 75%			
I1 (L)	67,833	60,700	64,560
I2 (EPH500)	63,000	59,833	60,899
I3(Be dervos)	55,600	52,767	53,745
ABS 0,254 75%			
1+ (EPH500)	86,333	81,433	84,783
2+ (L)	84,167	79,533	82,388
3+(Be dervos)	74,567	72,367	73,608
ABS 0,3 75%			
4+ (Be dervos)	75,125	70,678	73,367
5+ (EPH500)	81,586	79,900	80,743
6+(L)	87,000	82,400	84,700
ABS 0,3 75%			
I4 (Be dervos)	53,600	49,149	51,258
I5 (EPH500)	85,267	68,218	81,564
I6(L)	101,000	70,411	91,102

## 18 priedas. ABS bandinių lenkimo rezultatai Mpa

Spausdinimo kriterijai	MAX	MIN	AVG
ABS 0,254 75%			
I1 (L)	40,699	34,420	38,736
I2 (EPH500)	37,8	35,899	36,539
I3(Be dervos)	33,36	31,660	32,247
ABS 0,254 75%			
1+ (EPH500)	51,799	48,859	50,869
2+ (L)	50,5	47,719	49,433
3+(Be dervos)	44,74	43,420	44,165
ABS 0,3 75%			
4+ (Be dervos)	45,075	42,407	44,020
5+ (EPH500)	48,952	47,940	48,446
6+(L)	52,2	49,440	50,820
ABS 0,3 75%			
I4 (Be dervos)	32,16	29,489	30,755
I5 (EPH500)	51,16	40,931	42,247
I6(L)	60,6	42,247	54,661

## 19 priedas. PLA bandinių lenkimo rezultatai N

Spausdinimo kriterijai	MAX	MIN	AVG
PLA 0,254 75%			
I1 (L)	149,670	136,670	145,315
I2 (EPH500)	145,430	132,070	141,378
I3(Be dervos)	127,590	125,100	126,007
PLA 0,254 75%			
1+ (EPH500)	152,570	140,000	145,467
2+ (L)	142,270	125,670	132,738
3+(Be dervos)	154,370	133,070	144,272
PLA 0,3 75%			
4+ (Be dervos)	112,270	105,870	108,423
5+ (EPH500)	127,960	127,230	127,595
6+(L)	136,370	131,630	134,000
PLA 0,3 75%			
I4 (Be dervos)	112,230	108,430	110,455
I5 (EPH500)	144,330	138,360	141,053
I6(L)	140,230	125,830	132,098
PLA 0,3 75%			
4+ (Be dervos)	112,270	105,870	108,423
7+ (L)	113,430	109,700	111,565
8+(EPH500)	120,730	100,830	110,780
PLA 0,3 50%			
I7 (EPH500)	129,580	106,570	122,353
I8 (L)	133,040	129,870	131,430
I9(Be dervos)	104,260	101,000	102,963

## 20 priedas. PLA bandinių lenkimo rezultatai Mpa

Spausdinimo kriterijai	MAX	MIN	AVG
PLA 0,254 75%			
I1 (L)	89,802	82,002	87,189
I2 (EPH500)	92,658	79,242	84,827
I3(Be dervos)	76,554	75,06	75,604
PLA 0,254 75%			
1+ (EPH500)	91,542	84	87,28
2+ (L)	85,362	75,402	79,643
3+(Be dervos)	92,622	79,842	86,563
PLA 0,3 75%			
4+ (Be dervos)	67,362	63,522	65,054
5+ (EPH500)	76,776	76,338	76,557
6+(L)	81,822	78,978	80,4
PLA 0,3 75%			
I4 (Be dervos)	73,338	65,058	66,273
I5 (EPH500)	86,598	83,016	84,632
I6(L)	84,138	75,498	79,259
PLA 0,3 75%			
4+ (Be dervos)	67,362	63,522	65,054
7+ (L)	68,058	65,82	66,939
8+(EPH500)	72,438	60,498	66,468
PLA 0,3 50%			
I7 (EPH500)	77,748	63,942	73,412
I8 (L)	79,824	77,922	78,858
I9(Be dervos)	62,556	60,6	61,778