

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Tadas Drapanauskas

PAGAMINTO 3D SPAUSDINTUVO SKIRTUMAI NUO ESAMŲ
KONSTRUKCIJŲ IR JO PARAMETRŲ TYRIMAS

Magistro baigiamasis darbas

Šiauliai, 2014

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

**PAGAMINTO 3D SPAUSDINTUVO SKIRTUMAI NUO ESAMŲ
KONSTRUKCIJŲ IR JO PARAMETRŲ TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Autorius – Tadas Drapanauskas (MM-12 gr.)

Vadovas – prof. habil. dr. J. Bareišis

Recenzentas – doc. dr. S. Rimovskis

Katedros vedėjas – doc. dr. A. Sabaliauskas

Šiauliai, 2014



ŠIAULIŲ
UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS
FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU _____

(parašas, data)

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Studijų programa MECHANIKOS INŽINERIJA

Išduota magistrantui (-ei) _____

Darbo tema _____

Patvirtinta 20 __m. _____ mėn. __d. fakulteto dekanų potvarkiu Nr. _____.

1. Darbo tikslas

2. Darbo struktūra

Darbo pateikimo terminas 20 __m. _____ mėn. __d.

Užduotį gavau _____

(magistranto vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas _____

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

TURINYS

SANTRAUKA	6
SUMMARY	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1 Įvairūs 3D spausdintuvai, jų konstrukciniai ir eksploataciniai ypatumai	13
1.1.1. 3D spausdintuvas „RepRap Mendel“	13
1.1.2. 3D spausdintuvas „RepRap Huxley“	14
1.1.3. 3D spausdintuvas „MakerBot“	15
1.1.4. 3D spausdintuvas „MakerGear Mosaic M1“	17
1.1.5. 3D spausdintuvas „Ultimaker“	18
1.1.6. 3D spausdintuvas „MendelMax AO-100“	19
1.2. Tikslas – gaminti 3D spausdintuvą	21
1.3. Pagaminto 3D spausdintuvo pagrindiniai parametrai	21
2. TRIMAČIO SPAUSDINTUVO TYRIMO METODIKA	24
2.1. Tyrimo objektas – Pagaminto 3D spausdintuvo konstrukcija ir jos analizė	24
2.1.1 Pagamintas 3D spausdintuvas naudoja lydžiosios masės liejimo technologiją	24
2.1.2 Pagaminto 3D spausdintuvo konstrukcija	25
2.1.3 Pagaminto trimačio spausdintuvo plastiko išstūmiklio konstrukcija	26
2.1.4 Pagaminto trimačio spausdintuvo pagrindinių elektrinių elementų konstrukcija	28
2.2. 3D spausdintuvu bandomos detalės analizė	29
3. 3D SPAUSDINTUVU ATSPAUSDINTŲ DETALIŲ TYRIMAS IR ANALIZĖ KEIČIANT JO PARAMETRUS	30
3.1. Tyrimo ir analizės veiksmai, jų seka	30
3.2. Pirmoji atspausdinta detalė	30
3.2.1 Atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametru nustatymas	30
3.2.2 Atspausdintos detalės užpildymo parametru nustatymas	31
3.3. Antroji atspausdinta detalė	32
3.3.1 Atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametru nustatymas	32
3.3.2 Atspausdintos detalės užpildymo parametru nustatymas	33
3.4. Trečioji atspausdinta detalė	35
3.4.1 Atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametru nustatymas	35
3.4.2 Atspausdintos detalės užpildymo parametru nustatymas	36
3.5. Pasirinkta detalė iš atspausdintų – antroji	37
3.6. Pasirinktos detalės temperatūrų tyrimas ir analizė	37
3.6.1 Atspausdintos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia $200^{\circ}C$	38
3.6.2 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia $190^{\circ}C$	39
3.6.3 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia $185^{\circ}C$	40
3.6.4 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia $180^{\circ}C$	40
3.6.5 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas lygus $170^{\circ}C$	41
4. GAUTŲ TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ IR LYGINIMAS	43
IŠVADOS	47

LITERATŪRA	48
PRIEDAI	50
1 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo <i>190°C</i> iki <i>56°C</i>	50
2 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo <i>180°C</i> iki <i>58°C</i>	51
3 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo <i>185°C</i> iki <i>58°C</i>	52
4 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo <i>170°C</i> iki <i>57°C</i>	53
5 PRIEDAS. Mokslinėje konferencijoje skaityto pranešimo sertifikatas.....	54

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS

TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Tadas Drapanauskas. PAGAMINTO 3D SPAUSDINTUVO SKIRTUMAI NUO ESAMŲ KONSTRUKCIJŲ IR JO PARAMETRŲ TYRIMAS. Magistro baigiamasis darbas / vadovas prof. habil. dr. J. Bareišis.

SANTRAUKA

Šiuolaikiniai moderniausi spausdintuvai, robotai ir kita mūsų naudojama kasdieninė technika – tai sudėtingų ir labai tikslių konstrukcijų gaminiai, kurie yra ne tik namuose, darbuose, kiemuose, bet ir už žemės planetos ribų. Vyresnio amžiaus žmonės supranta sąvoką „spausdintuvai“, kad tai įrenginys, kuris gali atspausdinti paveikslus ir raides ant popieriaus lapo. Tačiau naujasis išradimas pakeis mūsų kasdienybę ir leis ne tik matyti, bet ir jausti atspausdintą tikrąjį daiktą.

3D spausdintuvas – tai įrenginys, kuris paveikslus (brėžinius) paverčia fiziniais objektais. Pagrindinės sudedamosios dalys: korpusas, varikliai, 3 koordinačių ašys (x , y , z), valdymo blokas ir spausdinimo galvutė (plastiko išstūmiklis) su kaitinimo elementu.

Darbo tikslas – Ištirti pagaminto 3D spausdintuvo konstrukciją ir palyginti atspausdintų detalių kokybę su skirtingais parametrais. Darbe, siekiant iškelto tikslo, yra sprendžiami tokie uždaviniai: apžvelgiamos įvairios 3D spausdintuvų konstrukcijos; analizuojama tiriamo trimačio spausdintuvo konstrukcija; nubraižyti detalės modelį programa „SolidWorks“ kurį spausdinsime; paruošti ir sukalibruoti pagamintą 3D spausdintuvą; analizuojami ir lyginami gauti rezultatai.

Darbe buvo išanalizuota tiriamo 3D spausdintuvo konstrukcija. Tarp atspausdintų detalių geriausia – antroji, kai parenkami parametrai užliejamui 50 %, sluoksnių aukščiui 0,2mm. Gauti rezultatai parodė, kad spausdinti galima nuo 175°C darbinės temperatūros.

Darbo tema skaičiau pranešimą Šiaulių universiteto technologijos fakulteto 9 – oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Jaunųjų mokslininkų darbai“.

Reikšminiai žodžiai: 3d spausdintuvas, trimatis spausdintuvas, atspausdintos detalės 3D spausdintuvu.

ŠIAULIAI UNIVERSITY

FACULTY AND NATURAL SCIENCES OF TECHNOLOGY

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Tadas Drapanauskas. Differences between manufactured 3D printer from present constructions and its data investigation. Master final work / research advisor Assoc. prof. habil. dr. J. Bareišis.

SUMMARY

Superior modern printers, robots, and other daily use of our technology is sophisticated and highly precise structures, products which are not only at home, work, courtyards, but for the planet Earth. Older people are aware of the concept of “printers“, that is a device that can print images and letters on a sheet of paper. However, a new invention will change our daily routine and will allow you to not only see but also feel a real object.

3D printer is a device that converts physical images (drawings). Main components: housing, engines, the 3 coordinate axes (x, y, z), the control unit and the print head (the plastic extruder) with the heating element.

The aim of the work is to investigate the construction of the 3D printer and compare the quality of printed parts with different settings. At work, in order to achieve the objective of the evicted, is addressed in the following challenges: an overview of the different 3D printer design; analyzes tested three – dimensional printer construction; draw part model with program “SolidWorks”; prepare and calibrate made the 3D printed; analyzed and compared the obtained results.

In this work was analyzed investigated 3D printer construction. Among the printed parts best in the second, when selected specifications is unfill 50 % and the height of the layers from 0,2mm. The results showed that printing can from 175°C working temperature.

In my work theme I read the report in Šiauliai university faculty of technology 9th international scientific conference “Young scientist’s works”.

Keywords: 3D printer, three – dimensional printer, printed parts with 3D printer.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Pagaminto 3D spausdintuvo techniniai duomenys.....	21
4.1 lentelė. Bendri detalių spausdinimo nustatymo duomenys.....	43
4.2 lentelė. Bendri detalių spausdinimo medžiagos ir laiko duomenys.....	43
4.3 lentelė. Bendri temperatūrų ir laikų gauti duomenys.....	45

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. 3D spausdintuvas „RepRapMendel“.....	13
1.2 pav. 3D spausdintuvas „RepRapHuxley“.....	14
1.3 pav. 3D spausdintuvas „MakerBot“.....	16
1.4 pav. 3D spausdintuvas „MakerGear Mosaic M1“.....	17
1.5 pav. 3D spausdintuvas „Ultimaker“.....	18
1.6 pav. 3D spausdintuvas „MendelMax AO –100“.....	19
1.7 pav. Pagamintas 3D spausdintuvas.....	21
2.1 pav. Lyžiosios masės liejimo technologija.....	23
2.2 pav. Plastiko sluoksniavimas detalės gaminimui.....	23
2.3 pav. Pagaminto 3D spausdintuvo konstrukcija.....	23
2.4 pav. Pagaminto 3D spausdintuvo kinematinė schema.....	25
2.5 pav. Pagaminto 3D spausdintuvo spausdinimo galvutė.....	26
2.6 pav. Spausdinimo galvutės kinematinė schema.....	26
2.7 pav. 3D Spausdintuvo pagrindinių elektrinių elementų konstrukcija.....	27
2.8 pav. Bandoma detalė virtualiame programos lange.....	28
2.9 pav. Bandomos detalės brėžinys 3D spausdinimui.....	28
3.1 pav. Parenkami pirmos detalės sluoksnių aukščio parametrai.....	29
3.2 pav. Atspausdintos detalės sluoksnių aukštis – $0,1mm$	30
3.3 pav. Parenkami pirmos detalės užpildymo parametrai.....	30
3.4 pav. Atspausdintos detalės užpildymas – 100%	31
3.5 pav. Parenkami antros detalės sluoksnių aukščio parametrai.....	32
3.6 pav. Atspausdintos detalės sluoksnių aukštis – $0,2mm$	32
3.7 pav. Parenkami antros detalės užpildymo parametrai.....	33
3.8 pav. Atspausdintos detalės užpildymas – 50%	33
3.9 pav. Parenkami trečios detalės sluoksnių aukščio parametrai.....	34
3.10 pav. Atspausdintos detalės sluoksnių aukštis – $0,3mm$	34
3.11 pav. Parenkami trečios detalės užpildymo parametrai.....	35
3.12 pav. Atspausdintos detalės užpildymas – 30%	36
3.13 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai kaitinimo elementas siekia $200^{\circ}C$	37
3.14 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai kaitinimo elementas siekia $190^{\circ}C$	38
3.15 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai kaitinimo elementas siekia $185^{\circ}C$	39

3.16 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai kaitinimo elementas siekia $180^{\circ}C$	40
3.17 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai kaitinimo elementas lygus $170^{\circ}C$	41
4.1 pav. Spausdinamos detalės pagaminimo laiko ir jos užpildymo (procentais) grafikas.....	44
4.2 pav. Sunaudojamos medžiagos masės ir detalės užpildymo (procentais) grafikas.....	44
4.3 pav. Sunaudojamos medžiagos masės ir detalės pagaminimo laiko grafikas.....	45
4.4 pav. Spausdinamų detalių laiko priklausomybė nuo liejimo temperatūros grafikas.....	46

IVADAS

Darbo aktualumas. Šiuolaikiniai moderniausi spausdintuvai, robotai ir kita mūsų naudojama kasdieninė technika – tai sudėtingų ir labai tikslių konstrukcijų gaminiai, kurie yra ne tik namuose, darbuose, kiemuose, bet ir už žemės planetos ribų.

Trimatis spausdintuvas labai reikalingas įvairių sričių specialistams: architektams, inžinieriams, dizaineriams, maketuotojams. Dabar labai populiarėja jų naudojimas net maisto gamybos pramonėje, laboratorijose ir medicinoje.

3D spausdintuvas – tai įrenginys, kuris paveikslus (brėžinius) paverčia fiziniais objektais. Manoma, kad trijų ašių spausdintuvas – ateities revoliucija, kurios veiklos sritys labai plačios.

3D spausdintuvai skirstomi pagal gaminamus daiktus, liejamas medžiagas. Vieni jų geba atspausdinti vien tik plastiką, keramiką, gumą, šokoladą, pyragą ar betoną. Lenkijoje sukurtas vienintelis pasaulyje spausdintuvas galintis panaudoti įvairiausias medžiagas, ar gaminti savo pačių detales ateities spausdintuvams. Tam reikalinga tinkama spausdintuvo galvutė.

Spausdintuvas leidžia įkūnyti koncepcines idėjas, per keletą valandų ar dienų atsispausdinti galima savo 3D projektą, kaip unikalų baigtinį gaminį. Persikėlimas iš 3D skaitmeninio pasaulio į fizinį pagreitins gaminio tobulinimo procesą ir sumažins kainą. Dėl visų šių priežasčių pavyks greičiau patekti į rinką, nes net darbo kambaryje galėsime atsispausdinti fizinius prototipus. Greitai aptiksime gaminio silpnąsias vietas ir nesunkiai atliksime pakeitimus projektavimo procese tuo metu, kai tai kainuoja mažiausiai.

Funkcionalių prototipų gamyba paprastai trunka nuo keleto valandų ir poros savaitių, o 3D spausdintuvas leis pastebėti trūkumus, dar prieš jiems tampa brangiomis inžinerinėmis modifikacijomis. Jis padeda sutrumpinti gaminio patekimo į rinką laiką ir prailgina jo eksploatacijos trukmę.

Naudojant perkamą 3D spausdintuvą paprasta ir lengva pasigaminti daugelį dalykų, reikalingų namuose – tereikia tiesiog parsisiųsti arba susiprojektuoti daikto brėžinį.

Trimačiu spausdintuvu galima atsispausdinti įvairias prietaisų dalis, veržles, varžtus, rankenas, interjero detales – lempų gaubtus, žvakides, auskarus, apyrankes, žaislus, bei jų dalis ar tiesiog įvairiausias daiktus pradedant nuo paprasto puodelio iki žmogaus kaukolės kopijos. Jei reikia didesnių daiktų galima atsispausdinti dviratį ar tiesiog automobilį, kurių mes norime, kurios sukuria mūsų fantaziją ir kurių mums gali prireikti čia ir dabar.

Darbo tikslas – Ištirti pagaminto 3D spausdintuvo konstrukciją ir palyginti atspausdintų detalių kokybę su skirtingais parametrais.

Darbe, siekiant iškelto tikslo, yra sprendžiami tokie **uždaviniai**:

1. Apžvelgti įvairių 3D spausdintuvų konstrukcijas.
2. Išanalizuoti tiriamo trimačio spausdintuvo konstrukciją.
3. Nubraižyti detalės modelį kuri spausdinsime.
4. Paruošti ir sukalibruoti pagamintą 3D spausdintuvą spausdinimui.
5. Atspausdinti tris detales skirtingais detalės parametrais.
6. Išsirinkti vieną detalę ir atspausdinti keičiant spausdintuvo temperatūros parametrus.
7. Išanalizuoti ir palyginti gautus rezultatus.

Darbo tema skaičiau pranešimą Šiaulių universiteto technologijos fakulteto 9-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Jaunųjų mokslininkų darbai“. Konferencijoje skaityto pranešimo sertifikatas pateiktas 5 priede.

Darbo struktūra ir apimtis. Darbą sudaro įvadas, 4 dalys ir išvados. Pagrindinė darbo medžiaga aprašyta 49 puslapiuose, įskaitant 4 lenteles ir 37 paveikslus. Taip pat pateikiami 5 priedai. Naudotos literatūros sąrašą sudaro 18 šaltinių.

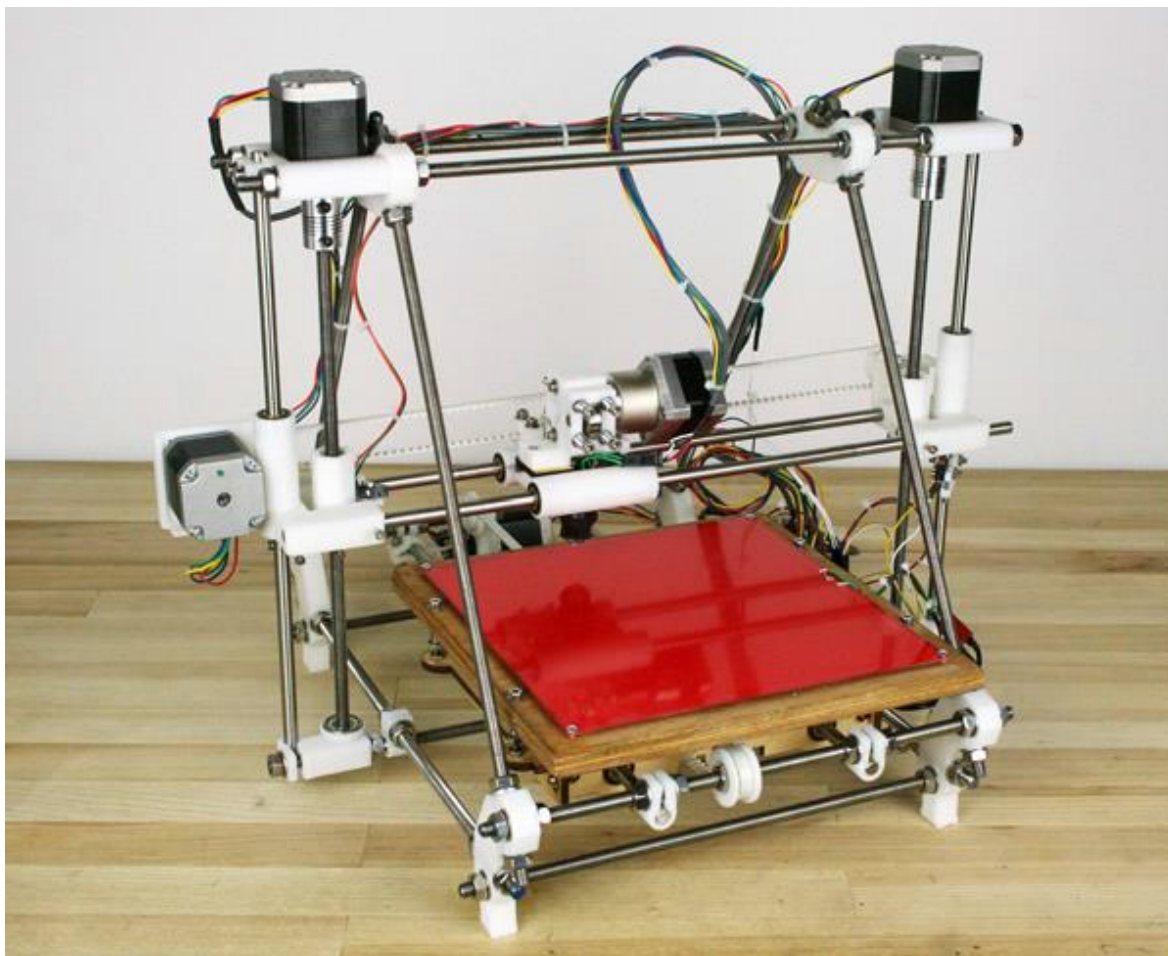
1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Įvairūs 3D spausdintuvai, jų konstrukciniai ir eksploataciniai ypatumai

1.1.1. 3D spausdintuvas „RepRap Mendel“

„RepRap“ – tai projektas, kuriuo siekiama sukurti 3D spausdintuvą, galintį išspausdinti tokį patį spausdintuvą. Darvinas, šio trimačio spausdintuvo įkūrėjas, sukūrė antros kartos modelį pavadindamas „Mendel“. Buvo siekiama patobulti pirmąjį modelį, kad jame būtų kuo mažesnis sudedamųjų dalių kiekis spausdintuve, tiek iš spausdintų, tiek ir iš techninės įrangos pusės neprarandant tų pačių įrenginio funkcijų ir charakteristikų. Modelio dizainas buvo pavadintas didžiąja „T“ raide [1].

Šis rinkoje esantis 3D spausdintuvas (1.1 pav.) yra vienas geriausių už prieinamą kainą ir aukščiausios kokybės iš parduodamų trimačių spausdintuvų privatiems žmonėms. Gaminamas Ohajuje esančioje kompanijoje „MakerGear“ išvertus į lietuvių kalbą reiškia „pavarų gamintojas“.



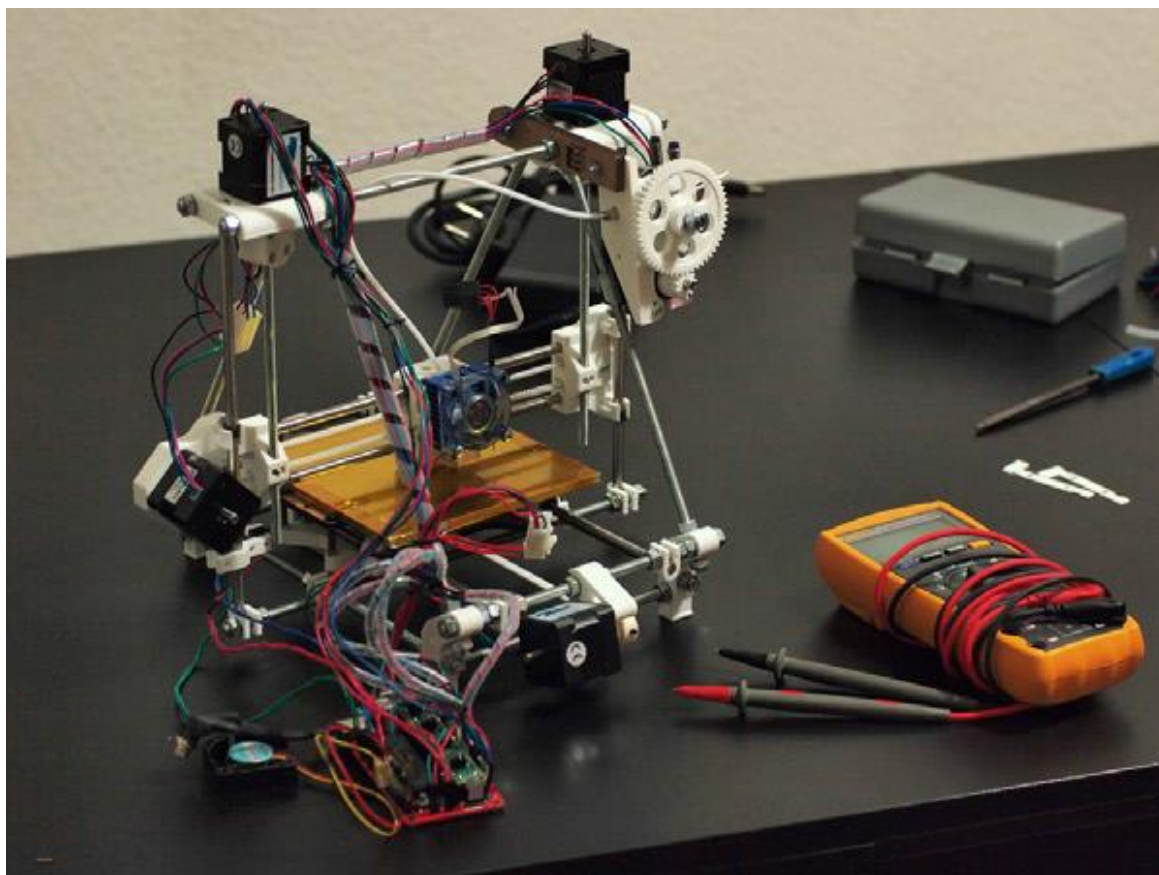
1.1 pav. 3D spausdintuvas „RepRap Mendel“

Modelis „RepRap Mendel“ yra pigus, bet turi nedidelį spausdinimo tūrį, kurio gabaritai – $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 110\text{mm}$. Bendras tūris yra $0,0044\text{m}^3$. Didžiausias pastūmos greitis x ir y ašių gali siekti 725mm/s . Korpusą sudaro atspausdintos dalys, srieginiai strypai ir kiti perkami standartinių detalių komponentai. Du žingsniniai varikliai naudojami lygiagrečiai z ašies kryptimi siekiant sumažinti standartinių detalių kiekį (pvz. skriemuliai, variklių diržų ilgis). Pakeičiant pagrindinį dizainą buvo panaudojami nerūdijančio plieno strypai suderinti su bronzinėmis įvorėmis, linijiniais guoliais x ir y ašių kryptimis. Slankiojantis šildymo padas naudojamas y ašyje, o x ir z ašyse slankiojanti spausdinimo galvutė.

Išvada: Vidutinė spausdinimo tūrio apimtis. Su kai kuriais daiktais gali būti pasiektas didelis spausdinimo greitis. Spausdintuvo dalys lengvai prieinamos ir parsisiunčiamos norint atkartoti toki patį spausdintuvą.

1.1.2. 3D spausdintuvus „RepRap Huxley“

Pagal visus parametrus „RepRap Huxley“ spausdintuvo išvaizda ir techniniu veikimo požiūriu yra panašus į „RepRap Mendel“. Mažesnis išoriniais gabaritais ir laikomas kaip nešiojamų 3D spausdintuvų pradininku.



1.2 pav. 3D spausdintuvus „RepRap Huxley“

Trimatis spausdintuvas (1.2 pav.) yra pigesnis nei „*RepRap Mendel*“, žinoma, priklauso ir nuo to kokia komplektacija reikalinga. Nors šio įrenginio dydis (išoriniai gabaritai) ir nešiojamoji galimybė yra svarbiau, nei kainos, bet spausdinti gali iki $140\text{mm} \times 140\text{mm} \times 110\text{mm}$, o bendro tūrio yra $0,0022\text{ m}^3$. Tai pusė karto mažiau nei „*RepRap Mendel*“. 3D spausdintuvas yra kuklus ir vienas iš mažiausių išorinių gabaritų turinčių trimačių spausdintuvų, tiek jo gabaritiniais matmenimis, tiek ir detalės atspausdinamo tūrio. Pastūmos greitis pasiekia tik 200mm/s [2].

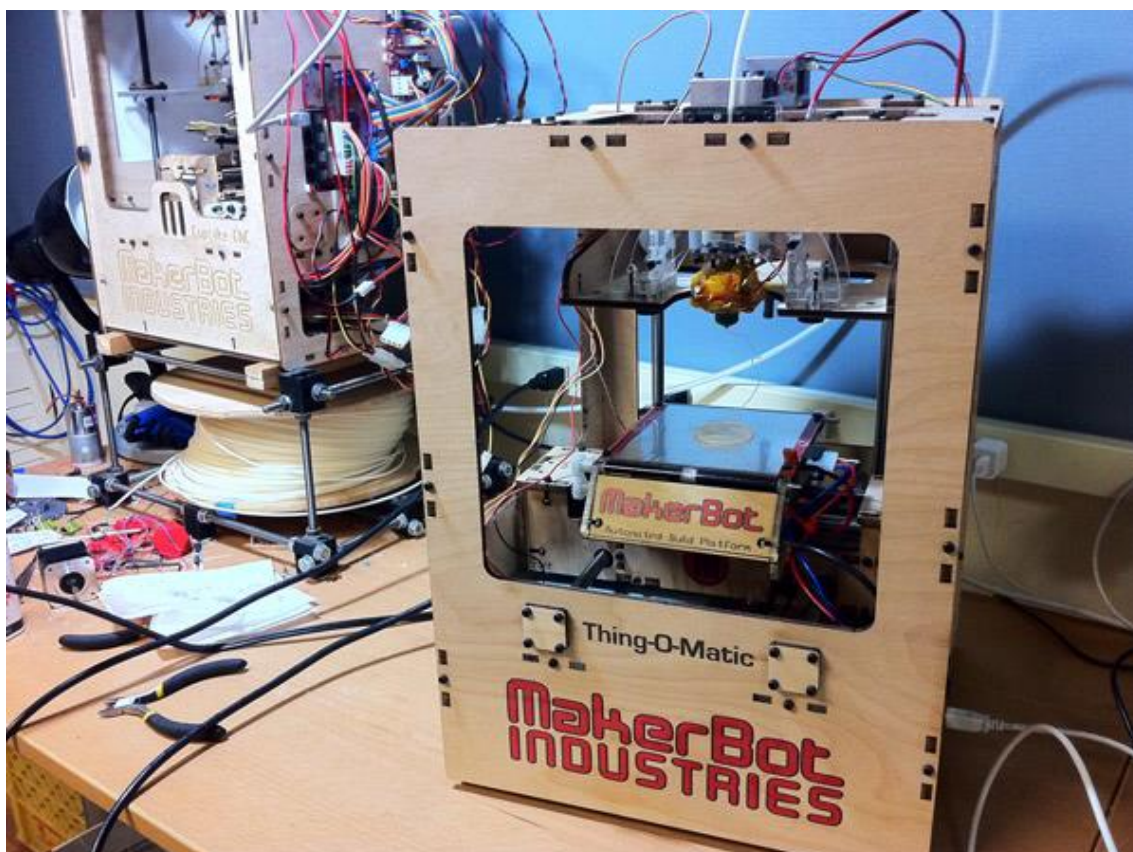
Naudojami linijiniai guoliai x ir y kryptimis, o z ašiai smulkaus žingsnio srieginiai strypai. „*Huxley*“ yra stebėtina tikslus kai reikia gaminti įvairiausio dizaino detales, sugeba išgauti paviršiaus nukrypimus iki $0,0125\text{mm}$. Dėl mažesnių jo matmenų spausdinimo galvutė gali tiksliai riedėti x ašimi. Tačiau šildant kaitinimo elementą yra neapgalvota, kad jis liečiasi su x ašies strypu ir karštį perduoda į visą korpusą. Šiluma atiduodama į bendrą korpusą gali pakenkti spausdinamo plastiko charakteristikom. Be to, atsiranda padidėjusi trintis vamzdžiui ir kaitinimo elementui, kurie daug greičiau dyla būtent dėl paminėtų priežasčių. Šiuo principu, panaudodami naują idėją, išgavo didesnę tikslumą spausdintuvui, tad negalima teigti, pasitvirtino ar nepasitvirtino pamėgintas toks jų bandymas.

Išvada: Vienas iš mažiausių ir mažiausių spausdinimo tūrį turinčių 3D spausdintuvų esamų rinkoje. Palyginus tikslus su patikima judėjimo sistema. Lengvai prieinamos ir parsisiunčiamos detalės beveik taip pat, kaip „*RepRap Mendel*“.

1.1.3. 3D spausdintuvas „*MakerBot*“

Kiekvienas 3D spausdintuvas pagamintas namų sąlygomis būna išskirtinai pavadintas, kaip ir šis „*MakerBot*“ (1.3 pav.) išvertus į mūsų gimtąją (lietuvių) kalbą, reiškia „gamintojas Bot – as“.

Tai pirmasis tokio tipo pagamintas 3D spausdintuvas po „*RepRap*“ modelių ir pristatytas viešai. Lengvai surenkamas korpusas, nors jau turėjo ir papildomą technologiją – šokolado liejimą [3]. Pagamintas iš medžio plokščių faneros išpjautos su lazeriu, ne tik korpusas, bet ir kitos detalės, laikikliai. Keitėsi visa konstrukcija, kurią patobulino ir pagerino nuo pagrindų. Atnaujintas slankiojimas ašimis pagal nustatytas koordinates, lengviau valdomas, nei prieš tai. Labiausiai patobulino plastiko išstūmiklio technologiją, kuri ir dabar yra naudojama kai kuriuose gaminiuose.



1.3 pav. 3D spausdintuvas „MakerBot“

Trimatis spausdintuvas turintis vieną iš mažiausių spausdinamos detalės tūrį. Gaminio gabaritiniai matmenys yra dideli, bet atspausdintos detalės tūrio matmenys palyginus labai maži – $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 115\text{mm}$, o bendroje statistikoje tūrio tik – $0,0017\text{ m}^3$.

Po šio pasisekusio modelio neseniai išleistas trečiosios kartos naujasis gaminys pavadintas „Replicator“, kurie bandė ištaisyti klaidas ir padidinti spausdintuvo gabaritus. Svarbiausia padidinus gabaritinius matmenis padidejo ir spausdinamos detalės tūris – $0,0049\text{ m}^3$. Bet nedžiugina esami rodikliai: $225\text{mm} \times 145\text{mm} \times 150\text{mm}$.

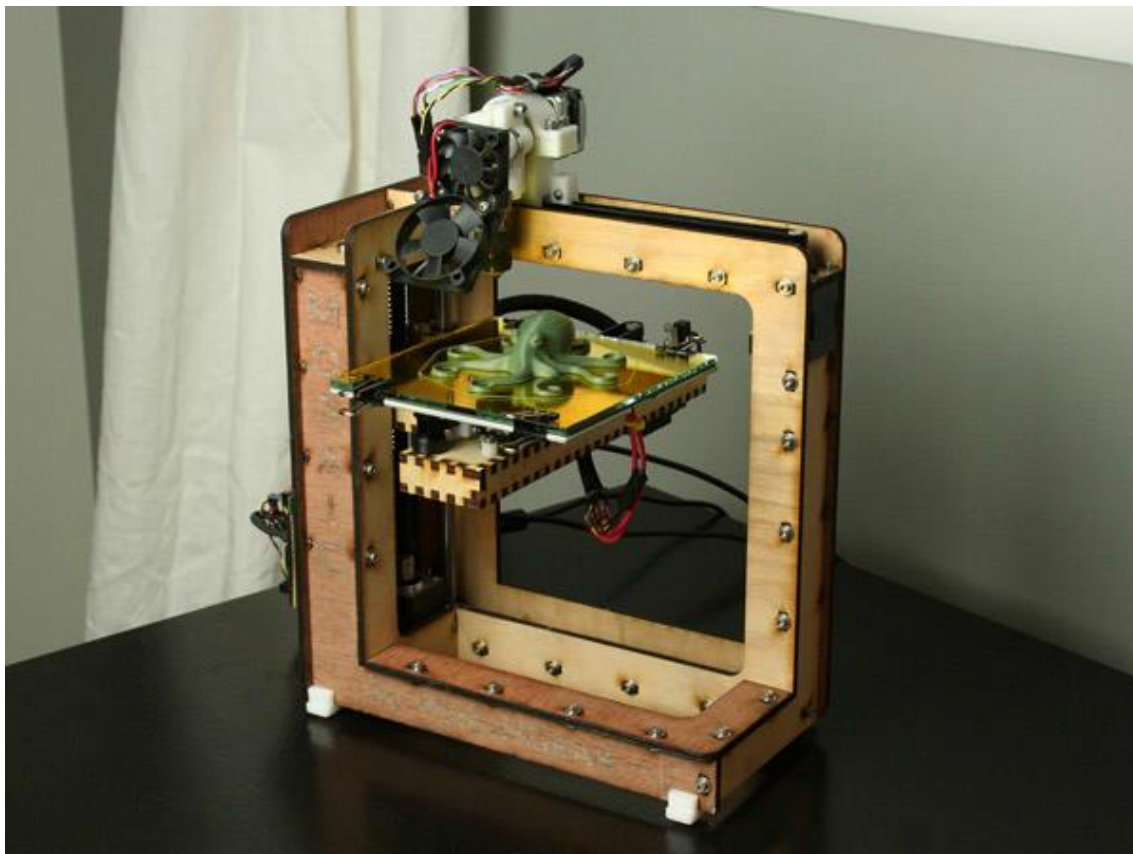
Pasiūlytas ne tik kaip paprastas 3D spausdintuvas, bet ir kaip šokoladui lieti skirtas įrenginys. Gamintojų teigimu, pilno sukomplektuoto svajonių spausdintuvo detales galima surinkti per savaitgalį, tai palyginus labai greitai, kai kiti užtrukdavo nuo mėnesio laiko. Bet jo kaina už faneros korpusą ir visą nesurinktą įrenginį siekia 6000 litų.

Komplektacijoje galima pasirinkti šildymo padą ir dviejų plastiko išstūmiklių galvą skirtingų spalvų spausdinimui vienu metu. Kitos kompanijos dar to nesilū. Surinktais duomenimis toks jų bandymas – nepasitvirtino, susiliedavo spalvos ir gaudavosi prastos kokybės detalė.

Eksperimentiniai trimačiai spausdintuvai su dviejų spalvų spausdinimo technologija jau buvo sukurti, prieš atsirandant šiam, tik „MakerBot“ buvo pirmieji pasiūlę kaip kitą komplektaciją ir pritaikę savo gaminiuose.

Išvada: Tai brangiausias iš nagrinėjamų 3D spausdintuvų, o jo savybės tikrai nėra pačios geriausios. Nesukalibruotas, ir net nežinomas jo patikimumas, ilgaamžiškumas. Gali spausdinti dviem spalvomis vienu metu.

1.1.4. 3D spausdintuvas „MakerGear Mosaic M1“



1.4 pav. 3D spausdintuvas „MakerGear Mosaic M1“

Tai 3D spausdintuvas, kuris išsiskiria savo dizainu nuo kitų. Nėra tiesiog paprasta dėžutė, nors pagaminta iš faneros ir išpjaustyta lazeriu.

Panaudotas įdomus sprendimas šiame įrenginyje, kad šildymo padas perkeltas ant z ir y ašių, o tai reiškia padas turi dviejų judančių kryptių koordinatas ir spausdinama detalė pado atžvilgiu juda tik žemyn. Spausdintuve telpamos medžiagos ant pado tūris panašus kaip ir kitų mažųjų 3D spausdintuvų: $127\text{mm} \times 127\text{mm} \times 127\text{mm}$. Viso: $0,0020\text{m}^3$. Pagrindinės ašys x ir y gali siekti iki 450mm/s pastūmos greitį [4].

Spausdintuvas sutrumpintai vadinamas „Mosaic M1“ (1.4 pav.) išvertus reiškia „mozaika“ ir pirmasis jų modelis „M1“. Trijų koordinačių spausdintuvas unikalus tuo, kad jo neįprasta forma ir labai tiksliai pagamintos ašys (x ir y) bei slydimo takai.

Padengti varžtai ir veržlės specialiu švinu (naudojami programinių staklių gamyboje). Žinant šiuos skirtumus, nuo paprastų esamų spausdintuvų leidžia sukurti tokį įrenginį, kuris yra pakankamai lengvai montuojamas, o svarbiausia labai tikslus ir nesunkiai kalibruojamas.

Visas valdymo ir elektros blokas gali atsijungti nuo korpuso. Remonto atveju greičiau galima sutvarkyti sugedusią mikroschemą, tiesiog ją atjungiant, išimant ir įstatant naują. Gamintojo teigimu labai greitai įsijungia mikroprocesorius, tad pabudus kiekvieną rytą galima atsispausdinti ką nors naujo. Bet ar kiekvienas mūsų norėtume taip gyventi, abejoju.

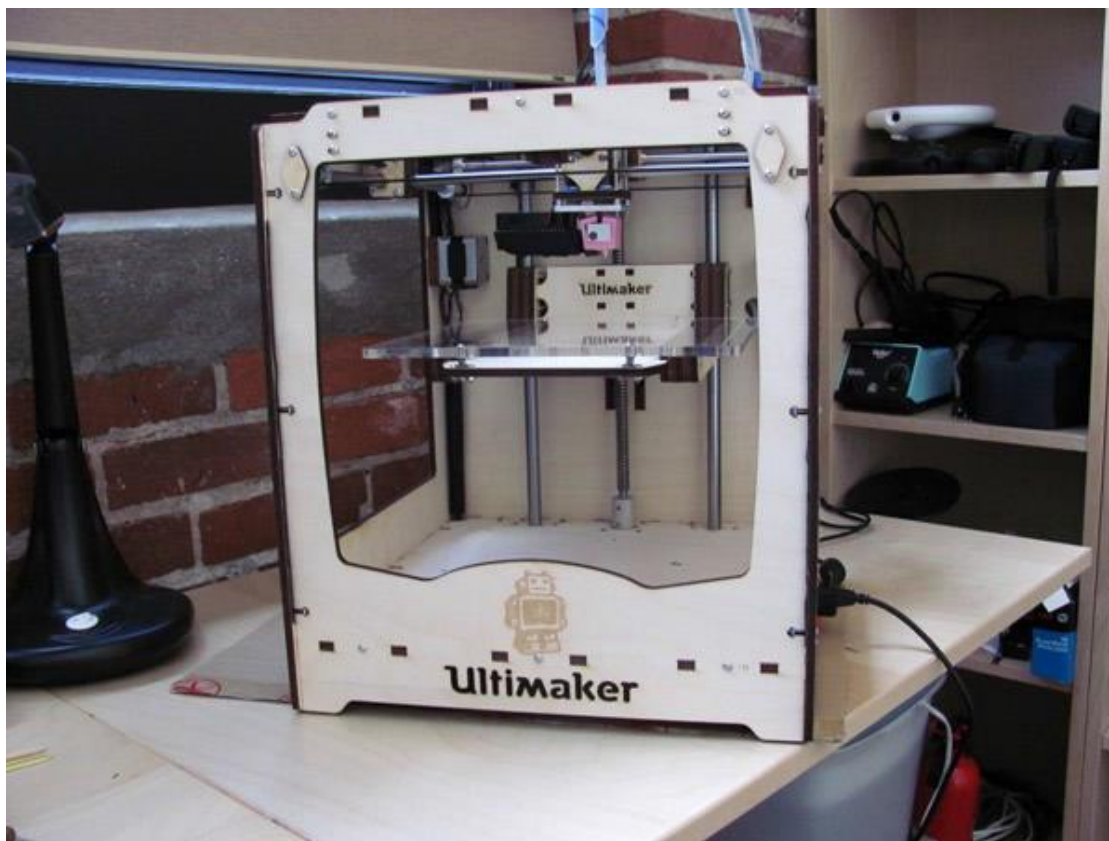
Kiti trimačiai spausdintuvai kalibruojasi daug ilgiau, nei „mozaika“. Reikia mažiau priežiūros ir yra patikimesnis. Antrasis spausdintuvas pagal išorinius gabaritinius matmenis, atsilieka tik nuo mažiausiojo „RepRap Huxley“.

Išvada: Greičiausias pagal spausdinimo laiką ir kokybės santykį. Unikali, tiksli įranga, nesunkus kalibravimas, bei garantuotas ilgaamžiškumo patikimumas.

1.1.5. 3D spausdintuvas „Ultimaker“

Sparčiausiai populiarėjantys trimačiai spausdintuvai „Ultimaker“ (1.5 pav.). Būtent šis spausdintuvas jau net lenkia dauguma kitų gaminamų spausdintuvų kaip „MakerBot“ ar „MakerGear“ techninėmis charakteristikomis. Detalę galima atspausdinti iki tokių matmenų dydžio: $210\text{mm} \times 210\text{mm} \times 220\text{mm}$ [5]. Bendras tūris – $0,0100\text{m}^3$. Tai didesnio talpumo spausdinimo tūris iš visų gaminamų 3D spausdintuvų.

Nėra kaitinimo pado, bet sumanūs žmonės jau prisitaiko savo poreikiams ir pasigamina jį, kad galėtų spausdinti, ne tik *PLA* plastiką, bet ir *ABS*. Korpusas pagamintas iš faneros, išpjaunant lazeriu, o dizainas primena keturkampę kartoninę dėžę.



1.5 pav. 3D spausdintuvas „Ultimaker“

Neįtikėtina, tačiau esanti spausdinimo galvutė x ir y ašimis gali tiesiog „skrieti“, apribotas jos svoris leidžia judėti labai tiksliai ir greitai, nors pastūmos greitis didžiausias spausdintuve 350mm/s .

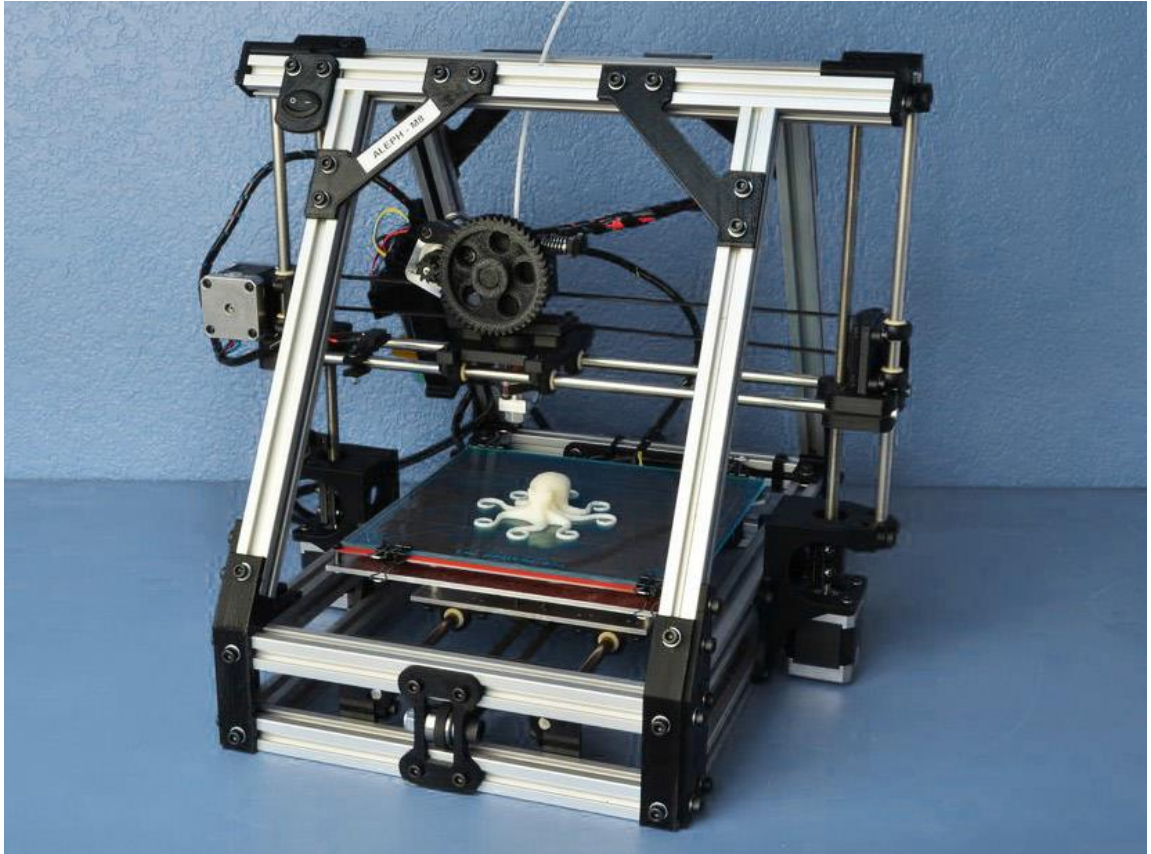
Tai ateities 3D spausdintuvų vizija, nes kiekvienoje ašyje daug guolių, nerūdijačio plieno strypų ir net 12 skriemulių tikslumui išgauti. Inžinieriai, kurie suprojektavo žinojo, kad bus didelė gaminio kaina, nors kokybė jiems buvo svarbiausia.

„Ultimaker“ – brangiausias 3D spausdintuvas, išskyrus pramoninius trimačius spausdintuvus. Šis įrenginys dar turi oficialią savo spausdinimo programą, kuri suteikiama gaminį nusipirkus.

Išvada: Geras spausdinimo greitis ir atitinkamas jo tikslumas. Nuostabi detalių kokybė. Be to, dideli atspausdinto gaminio gabaritai. Gražus dizainas ir yra nedidelių gabaritinių matmenų lyginant su atspausdinamu detalės tūriu. Trūksta kaitinimo pado, kad būtų galima spausdinti kitas medžiagas. Išlaidos ir gaminio sudėtingumas – entuziasto lygio.

1.1.6. 3D spausdintuvas „MendelMax AO-100“

Prisiminus „RepRap“ modelius, tai šis skiriasi tuo, kad nenaudojami srieginiai strypai. Vietoj jų aliuminiai profiliai. Kai spausdintuvo korpusas pagamintas iš srieginių strypų yra daug sunkiau surinkti ir tinkamai sukalibruoti. Naujos kartos trimačiuose spausdintuvuose stengiamasi naudoti kuo daugiau aliumininių profilių, kad jie būtų lengvesni.



1.6 pav. 3D spausdintuvas „MendelMax AO-100“

Profiliai iš aliuminio, kurių išorės matmenų plotas yra 20 mm^2 naudojami visam spausdintuvo korpusui. Užsakomi tik iš specialių įmonių, nes profilių forma – vienietinė, bei gaminama tik 3D spausdintuvams. Dažniausiai pateikiami jau supjaustyti, tam tikru ilgiu, o spausdintuvo surinkėjams, reikia tik juos sudėti į visą bendrą gaminį.

Profiliai vadinami „T“ formos, kad į angas tilptų varžtai prie kurių prisukamos kitos detalės. Šis konstrukcijos būdas naudojamas automobilių gamyboje, siekiant sumažinti viso trimačio spausdintuvo pagaminimo laiką ir pagerintą kokybę. Pasirinkimo variantas atitinka daug didesnę tikslumą ir greitesnį spausdinimo greitį, bet gaminio kainą padidina 250 – 500 litų nuo paprastojo „RepRap Mendel“ modelio.

3D spausdintuvas „AO – 100“ turi $200\text{mm} \times 190\text{mm} \times 100\text{mm}$ ir $0,0038\text{ m}^3$ tūrį [6]. O esamas „MendelMax AO – 100“ (1.6 pav.) maksimalus spausdinamos detalės tūris yra: $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 200\text{mm}$ ir bendras $0,0125\text{ m}^3$. Skirtumas akivaizdus. Visi šie spausdintuvai gaminami gamykloje ir visi be išimties tikrinami, kalibruojami bei surenkami, todėl lengviau juos naudoti paprastam vartotojui. Galima pasirinkti spausdinamo tūrio kiekį, pagal spausdintuvo komplektacijas.

Išvada: Didesnių matmenų kaitinimo padas, nei standartinių spausdintuvų (priklauso nuo komplektacijos). Teoriškai tikslesnis spausdinimas ir tvirtesnis rėmas. Aliuminio rėmas daug brangesnis nei srieginių strypų, lyginant su spausdintuvu „RepRap Mendel“, bet gerokai greitesnis jo surinkimas.

1.2. Tikslas – gaminti 3D spausdintuvą

Domėjimasis 3D spausdintuvais buvo ilgiau nei metus laiko. Vis laukiau kokių žinių Lietuvoje apie šią ateities revoliuciją, galbūt kažkas greitai turės ir galėsiu pamėginti. Deja.

Ėmė gausėti antraštėse žodžių „3D spausdintuvas“ ir galiausiai supratau, kad noriu pasigaminti savo 3D spausdintuvą.

Įpusėjus gaminimui perskaičiau tokį straipsnį „Šilališkis pagaminęs lietuvišką trimatį spausdintuvą“ [12] ir tai mane dar labiau pastūmėjo „užsibrėžto“ tikslo link.

Tuo metu buvo pasirodęs spausdintuvas pirkti ir „topo centras“ parduotuvėje [13], kurio kaina – 9 600 litų, o tiek pinigų skirti tikrai nenorėjau. Tad tai dar vienas tikslas kas mane paskatino pačiam pasigaminti 3D spausdintuvą. Spausdintuvų kaina buvo visų skirtinga, bet mano norimam trimačiui spausdintuvui nebuvo tokio spausdinamo detalės tūrio kokio norėjau už prieinamą kainą.

Galvojau tikrai nebus sunku pasigaminti, tačiau klydau. Kiekviena spausdinama detalė reikalauja daug pastangų ir įdirbio.

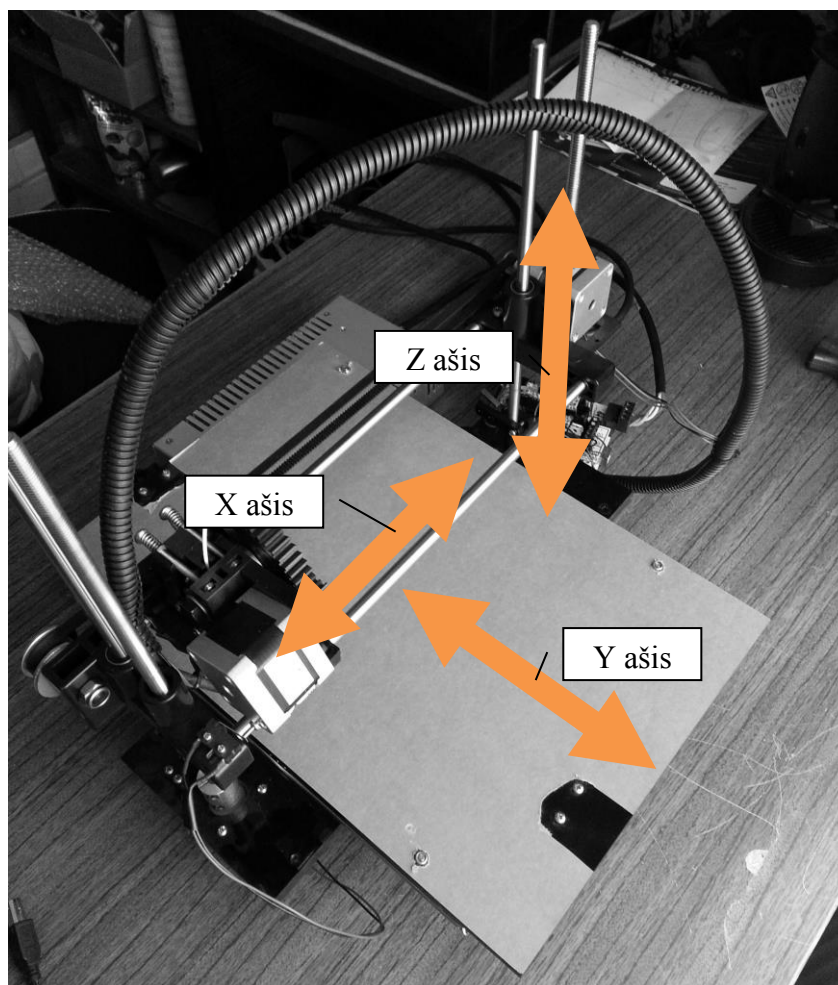
Kadangi labai norėjosi išmėginti detalės spausdinimo nustatymus ir 3D spausdintuvo parametrų pakeitimus, tai pasitaikius galimybei pritaikiau jį savo magistriniame darbe, o svarbiausia praktikoje.

1.3. Pagaminto 3D spausdintuvo pagrindiniai parametrai

Tarp visų šių 3D spausdintuvų nusprendžiama gaminti kitokį, nei visi apžvelgti literatūros sąrašė. Susidariau bendrą nuomonę ir viską įvertinęs gaminausi trimatį spausdintuvą tokiais techniniais duomenimis (1.1 lent.).

1.1 lentelė. Pagaminto 3D spausdintuvo techniniai duomenys

Spausdinimo medžiaga:	PLA plastikas
Spausdinamos medžiagos vielos diametras:	1,75 mm
Spausdinimo galvutės diametras:	0,4 mm
Naudojamų variklių kiekis:	5 vnt.
Naudojamų variklių modeliai:	NEMA 17
Valdymo blokas su mikroprocesoriumi:	Arduino MEGA 2560 su RAMPS 1.4
Detalės rezoliucija:	0,1 mm
Guoliai:	LM8UU, linijiniai
Spausdinimo detalės gabaritiniai matmenys:	254mm x 228mm x 203mm
Spausdinimo detalės bendras tūris:	0,0118 m ³



1.7 pav. Pagamintas 3D spausdintuvas

3D spausdintuvas skiriasi (1.7 pav.), kad gali atspausdinti didžiausią detalės tūrį iš visų nagrinėjamų trimačių spausdintuvų modelių. Jo konstrukcija panaši kaip „*RepRap*“, tik trys varikliai yra apatinėje plokštumoje. Du varikliai judina z ašį, o vidurinis y ašies padą. Mano spausdintuve naudojamas padas neturi specialaus kaitinimo, tiesiog yra paprastas padas.

Spausdintuvo korpusas pagamintas iš medžio drožlių ir plastiko plokščių. Plokštės labai standžios, jos neturi susilankstymo galimybių kaip fanera. Bet bijo drėgmės ir yra sunkios. Rinkausi tik todėl, kad lengviau apdirbamos ir turėjau atliekamų namuose. Spausdintuvo forma ne dėžutė, kaip „*Ultimaker*“ ar „*MakerBot*“. Viršuje nėra z ašių sustandinimo, bet mano supratimu jo ir nereikia.

Z ašis turi padui ne guolius, o bėgelius kurie naudojami baldų gamyboje. Šių bėgelių tikslumas neaiškus, bet spausdinant detalės drebėjimas ir paklaida nejaučiami. Kitos ašys naudoja linijinius guolius.

Trimačiame spausdintuve y ašyje juda tik padas, o spausdinimo galvutė juda x bei z ašimis. Kituose 3D spausdintuvuose juda padas z kryptimi.

Kai žašimi juda tik padas – efektyvesnis būdas, bet tada reikia padaryti kartoninės dėžės tipo korpusą. Nuo to priklauso spausdintuvo tikslumas ir konstrukcijos sudėtingumas. Mano 3D spausdintuvas bus kaip eksperimentas, nes skiriasi gerokai paprastesne surinkimo kokybe.

Nagrinėjamas spausdintuvas yra skirtas tik spausdinti detales iš polilaktido (*PLA*) plastiko. Tai tam tikra bioplastiko rūšis, sukurta pieno rūgščių pagrindu. Būtų galima pritaikyti ir *ABS* plastiką, bet reikia specialaus kaitinimo pado ką kiti spausdintuvai jau turi.

Išvada: 3D spausdintuvas palyginus turi didelį detalės spausdinimo tūrį iš apžvelgtų. Jei trimatis spausdintuvas neturi kaitinimo pado (perkamas atskirai) tai visas šis tūris priklauso nuo standartinių perkamų strypų ilgių. Kadangi pagamintui spausdintuvui esu numatęs kaitinimo padą (kai kurias detales jam pirkti, o kai kurias gaminti), todėl tūrio gabaritiniai matmenys padaryti nedaug didesni nei kaitinimo pado.

Kiti trimačiai spausdintuvai gali atspausdinti ir *ABS* (akrilnitrilo butadienio stireno polimeras) plastiką, šokolado liejimą, spausdinti iškart dvejomis spalvomis, o manasis to dar negali „pasigirti“.

Pagamintas 3D spausdintuvas geresnis tik kai kuriais aspektais:

- yra paprastos konstrukcijos, nei kiti;
- palyginus tikslus;
- gali atspausdinti didelį detalės tūrį;
- pigiausias.

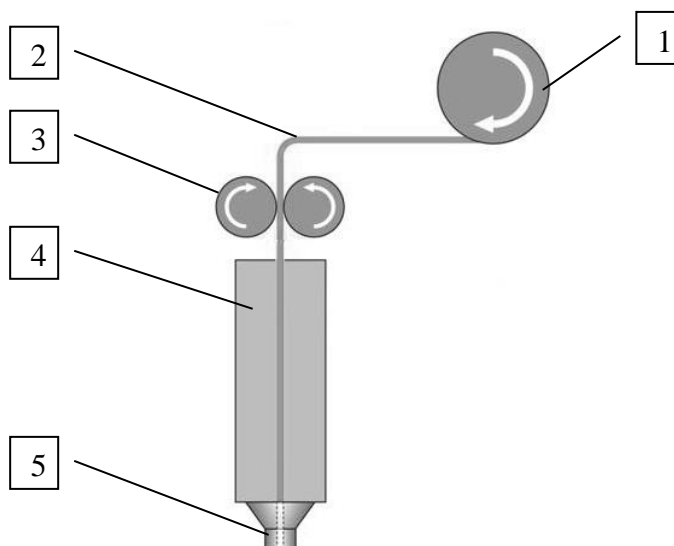
2. TRIMAČIO SPAUSDINTUVO TYRIMO METODIKA

2.1. Tyrimo objektas – Pagaminto 3D spausdintuvo konstrukcija ir jos analizė

3D spausdintuvas – tai įrenginys, kuris gali judėti trimis ašimis, horizontaliomis x ir y kryptimis, o z ašis tik vertikaliaja.

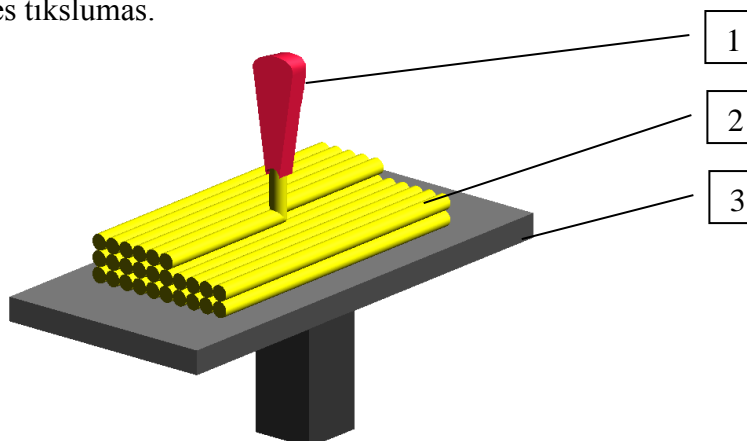
2.1.1 Pagamintas 3D spausdintuvas naudoja lydžiosios masės liejimo technologiją

Spausdintuvo technologija vadinama *lydžiosios masės liejimo technologija* (angliškai – Fused Deposition Modeling (FDM)) [14]. Naudojami realūs termoplastikai, pasižymi tikslumu bei tvirtumu.



2.1 pav. Lydosios masės liejimo technologija

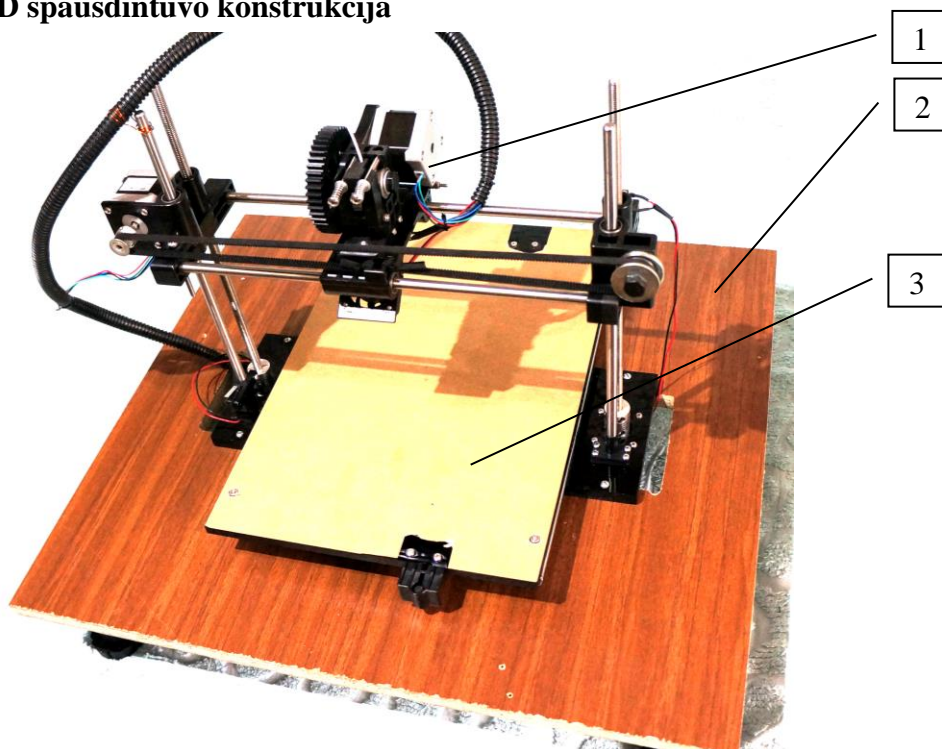
Ritėje 1 esantis susuktas plastiko siūlas 2 juda per žingsninę pavarą 3 ir lydosi kaitinimo elemente 4. Principinėje schemoje kaitinimo galvutės išeinamoji skylė 5 yra 0,4 mm diametro. Nuo šio matmens priklauso išeinamasis plastiko paviršius, kuris lieja pačią detalę. Kuo tikslesnė skylė, tuo ir geresnis gaminamos detalės tikslumas.



2.2 pav. Plastiko sluoksniavimas detalės gaminimui

Kaitinimo elementas pro kurio skylę juda išlydyta medžiaga *1* ir nusėsta sluoksniais *2* ant pado *3*.

2.1.2 Pagaminto 3D spausdintuvo konstrukcija

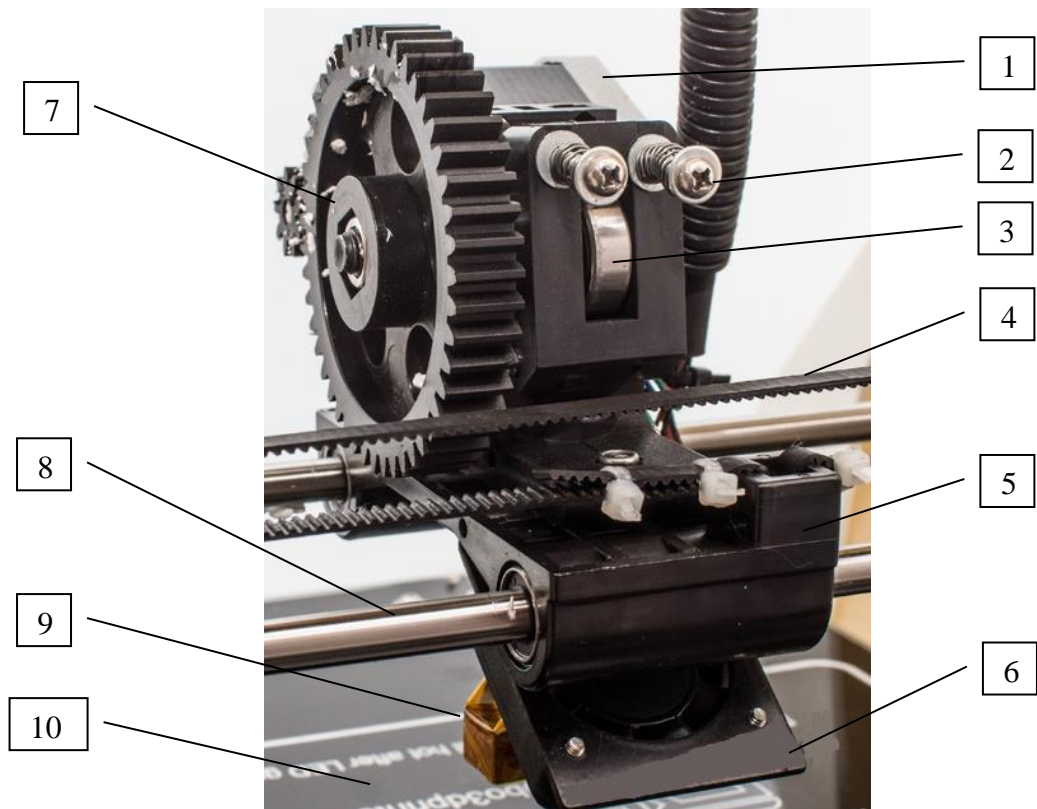


2.3 pav. Pagaminto 3D spausdintuvo konstrukcija

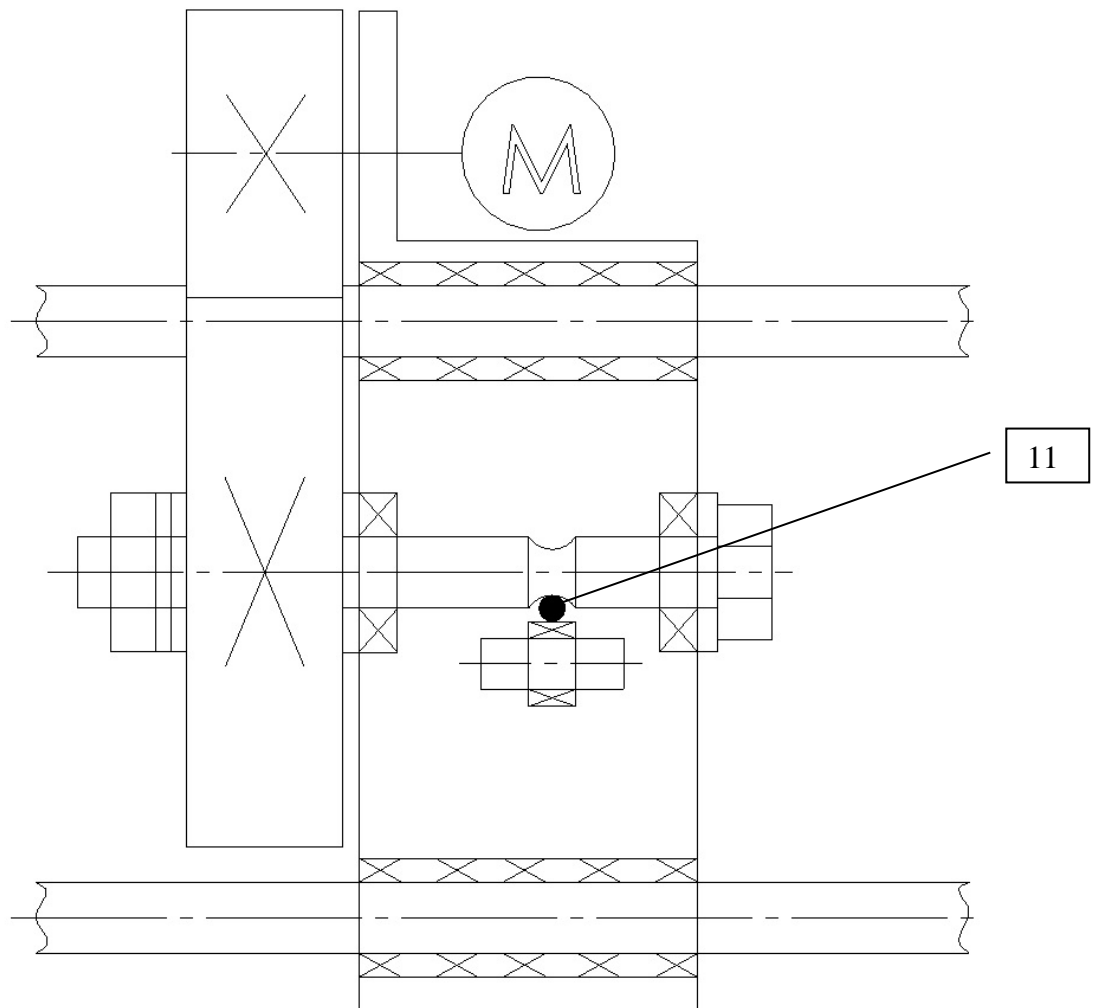
Trimačio spausdintuvo pagrindinių sudedamųjų dalių yra trys. Svarbiausia ir labiausiai akcentuojama dalis – spausdinimo galvutė *1*, nuo kurios priklauso visas spausdinimo darbas. Įdomus faktas, jog naudojamų 3D spausdintuvų veikimo principas išlieka toks pat visose jų panaudojimo srityse, tik keičiasi spausdinimo galvutės konstrukcija. Kaip ir kiekvienas jų turi korpusą *2* su kojomis spausdintuvo pastatymui bei padą *3*. Esamas padas turi būti kuo lygesnis ir negali turėti deformacijų nuo temperatūros, kuri atsiranda detalei gaminant.

Kinematinėje schemoje (2.4 pav.) parodytas trimatis spausdintuvas, kuriame naudojami vienodi penki didelio tikslumo žingsniniai varikliai *5* – NEMA 17, o sukimo momentas $0,47 Nm$. Vieno variklio pasisukimo žingsnis yra $1,8$ laipsnio. Naudojama krumplinė diržinė pavara kiekvienai ašiai su linijiniais guoliais *4* (LM8UU).

Linijinio judėjimo pagrindu sukurta sistema leidžia judėti kiekvienai ašiai. Šie guoliai pastaruoju metu įgijo populiarumą dėl jų ilgaamžiškumo ir sklandaus darbo. Slankiojasi garsiau, nei bronzos įvorės, tačiau savo techninių savybių nepraranda. Guolių ilgaamžiškumas priklauso ne tik nuo jų pagaminimo kokybės, bet ir nuo strypo per kurį jis riedės.



2.5 pav. Pagaminto 3D spausdintuvo spausdinimo galvutė

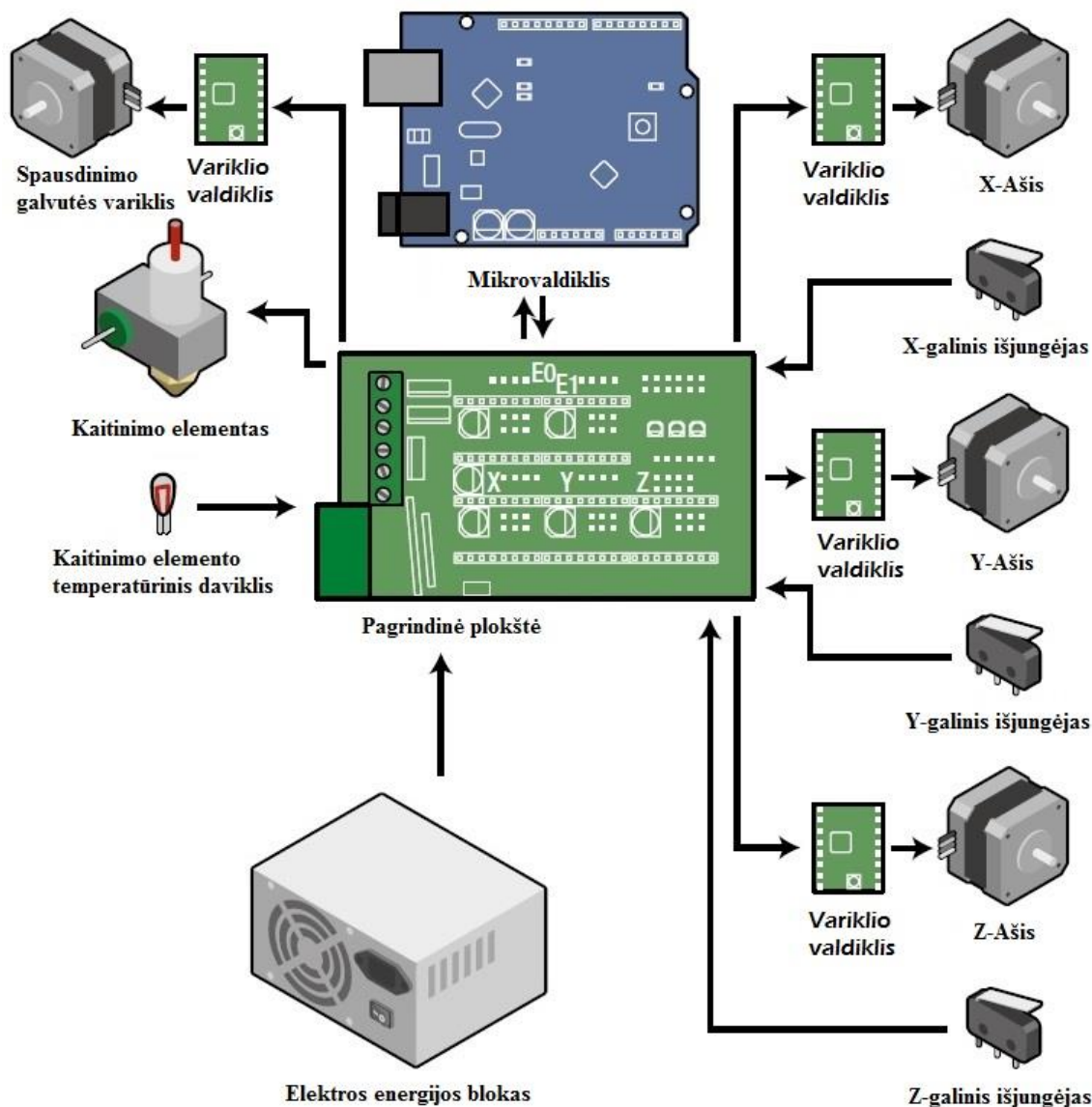


2.6 pav. Spausdinimo galvutės kinematinė schema

Plastiko spausdinimui yra naudojamos $\varnothing 3mm$ arba $\varnothing 1,75mm$ specialios vielos.. Kinematinėje schemoje (2.6 pav.) pavaizduota $\varnothing 1,75mm$ diametro viela pozicijoje 11. Su šia viela galima tiksliau atspausdinti gaminį, nei su didesnio diametro.

Variklis su kitomis detalėmis yra orientuoti žemyn, kad būtų lengviau kontroliuoti plastiko srauto judėjimo kryptį ir temperatūrą.

2.1.4 Pagaminto trimačio spausdintuvo pagrindinių elektrinių elementų konstrukcija

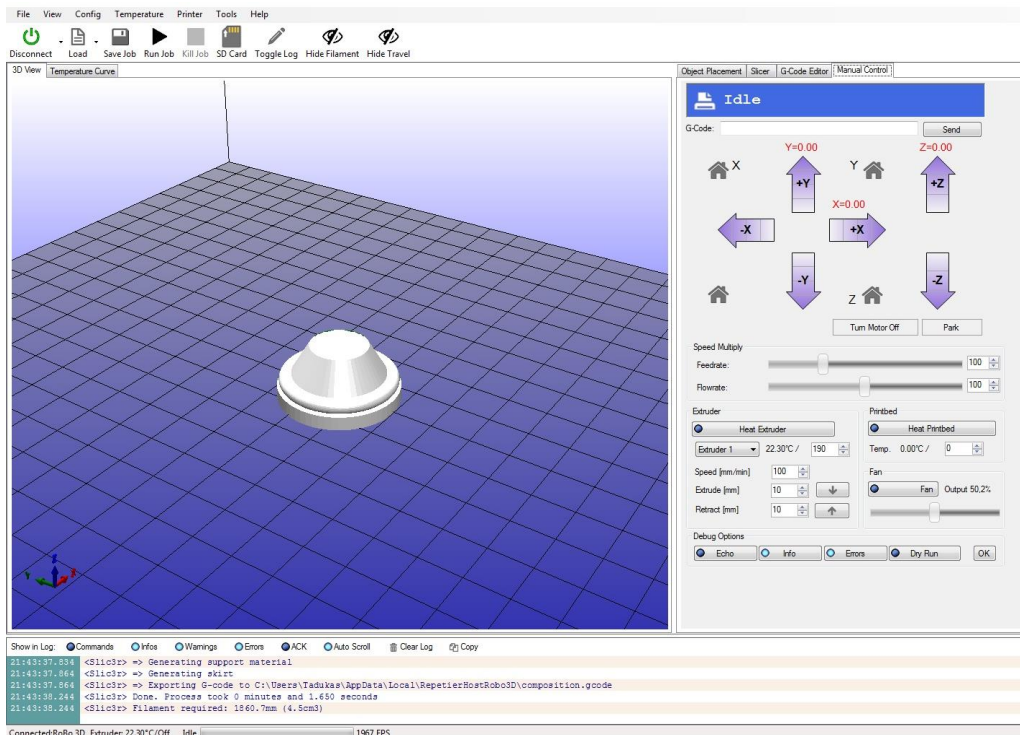


2.7 pav. 3D spausdintuvo pagrindinių elektrinių elementų konstrukcija

Elektrinių elementų bendroje konstrukcijoje (2.7 pav.) galime pamatyti, kaip kiekvienas iš įvairių elektrinių įrenginių yra sujungti. Rodyklėmis pažymėta kryptis, kaip iš vieno komponento perduodamas signalas į kitą. Pagrindinė plokštė jungia kitus komponentus (variklio valdiklius, elektros maitinimo bloką, mikrovaldiklį, kaitinimo elementus). Mikrovaldiklis yra viso 3D spausdintuvo „smegenys“.

2.2. 3D spausdintuvu bandomos detalės analizė

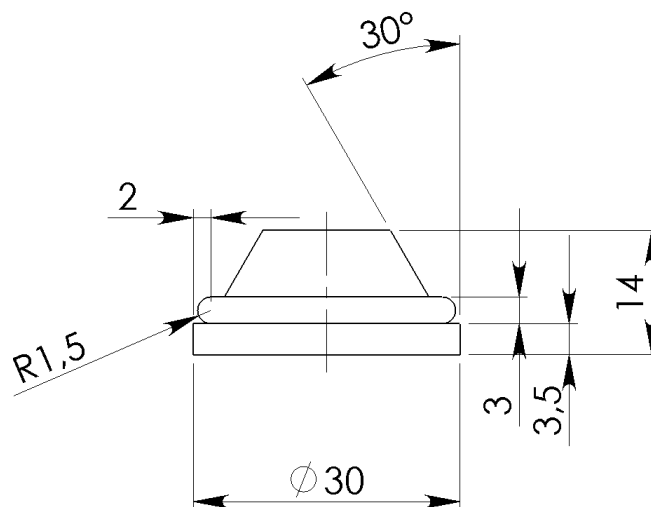
Naudojama 3D spausdintuvų programa „Repetier – host“ (2.8 pav.) , kuri yra nemokama [15]. Programoje galima pakeisti G – kodo failą ir pamatyti pakeitimus peržiūrint virtualiame programos lange.



2.8 pav. Bandoma detalė virtualiame programos lange

Detalę rinkausi dėl šių priežasčių:

- turi matytis jos vidus ir išorė, kokiais sluoksniais detalė yra užpildyta;
- kad nereikėtų išnaudoti daug spausdinimo medžiagos, bet rezultatas būtų akivaizdus.



2.9 pav. Bandomos detalės brėžinys 3D spausdinimui

3. 3D SPAUSDINTUVU ATSPAUSDINTŲ DETALIŲ TYRIMAS IR ANALIZĖ KEIČIANT JO PARAMETRUS

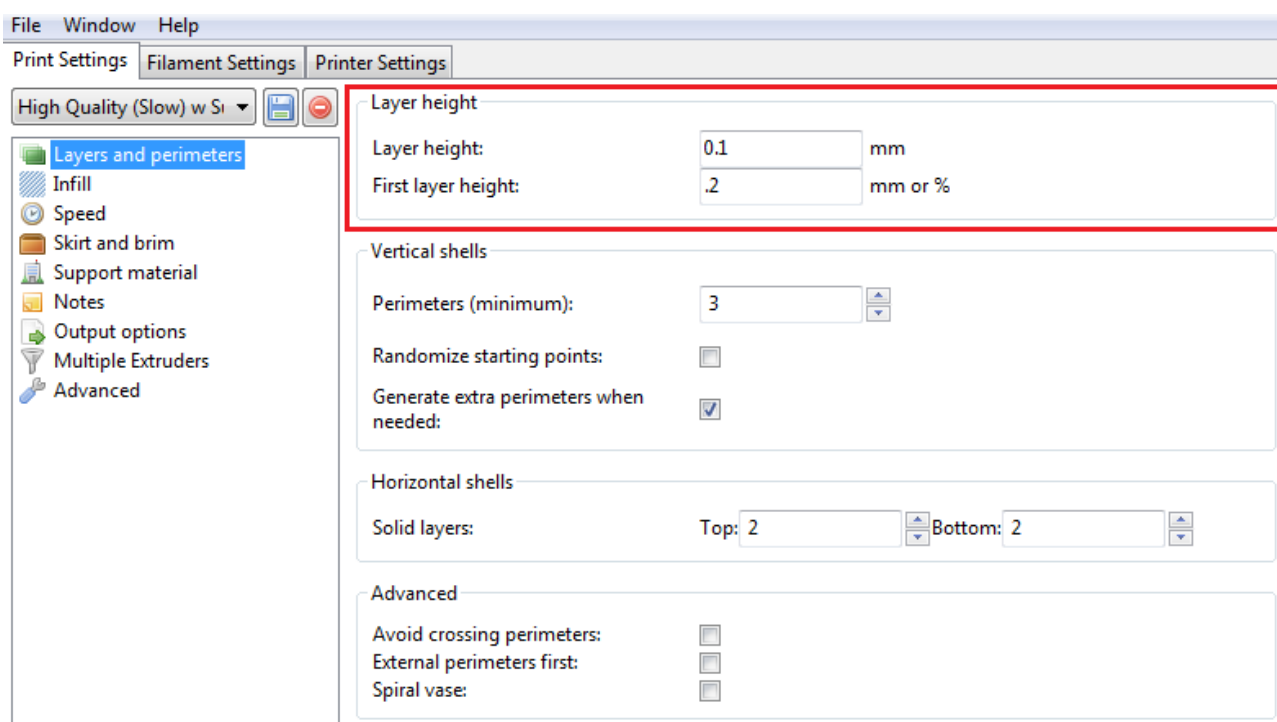
3.1. Tyrimo ir analizės veiksmai, jų seka

Pirmiausiai atspausdinsiu detalių modelius su tam tikrais detalės parametrais, kurioms keisis sluoksnių aukščiai (*Layer height*) ir vidaus užpildymo tankis (*Fill density*). Esamus veiksmus atlieku, dėl tokių priežasčių: kad iš visų pasirinktų parametru išsirinkčiau geriausiai atspausdintą detalės modelį, kad detalės kontūras būtų gana tikslus ir galėčiau tęsti tolimesnius veiksmus.

Išsirinktą detalę, iš visų trijų, mėginsime atspausdinti 3D spausdintuvu pasirinktomis kitomis darbinėmis temperatūromis ir analizuosime kokie skirtumai keičiant temperatūrinius spausdintuvo parametrus.

3.2. Pirmoji atspausdinta detalė

3.2.1 Atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametru nustatymas



3.1 pav. Parenkami pirmos detalės sluoksnių aukščio parametrai

Pirmosios atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametrai pateikiami (3.1 pav.) programos lange. Sluoksnių aukščio (*Layer height*) parametrai buvo parinkti – $0,1\text{mm}$, išskyrus pirmojo sluoksnio aukštis (*First layer height*) – $0,2\text{mm}$. Tai reiškia, kad pirmasis sluoksnis bus aukštesnis už visus kitus sluoksnius užsidedančius ant jo. Tik todėl, kad tarp 3D spausdintuve esančio spausdinimo galvutės ir pado yra atstumas, kurį reikia įvertinti.

Atspausdintos detalės neišeina nufotografuoti, neturiu tokių priemonių, bet pateikiamas pavyzdys, kaip atrodo sluoksnių išsidėstymas (3.2 pav.).



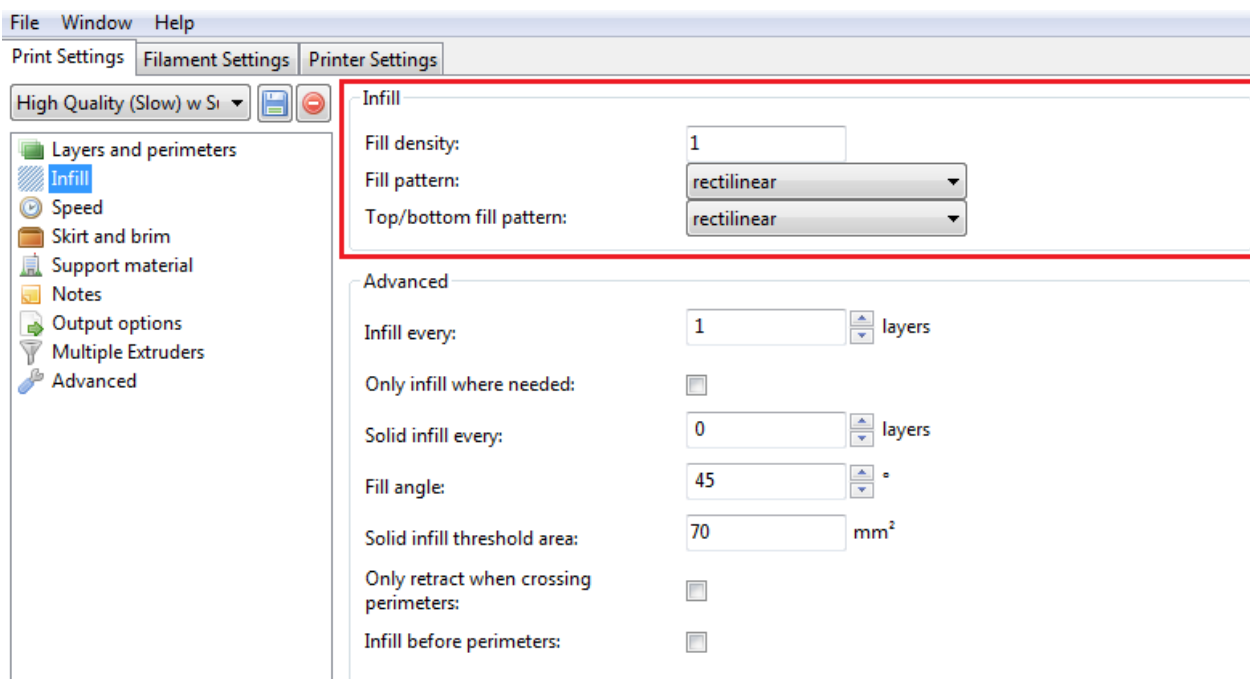
3.2 pav. Atspausdintos detalės sluoksnių aukštis – 0,1mm

3.2.2 Atspausdintos detalės užpildymo parametrų nustatymas

Nuo detalės užpildymo priklauso jos tvirtumas lenkimui ar glemžimui. Detalės užpildomi sluoksniai būna tik dviejų pasirinkimo tipų: pilnas sluoksnių užpildymas arba tik dalinis vidaus užpildymas.

Paveikslėlyje (3.3 pav.) matome, kad detalių užpildymo pastraipoje (*Infill*) užpildymo tankis (*Fill density*) parinktas 1. Šiuo atveju buvo parenkamas detalės pilnas sluoksnių užpildymas, nes 1 yra lygus 100%.

Užpildymo modelio tipas (*Fill pattern*) ir pagrindinės plokštumos tipas (*Top/bottom fill pattern*) buvo pasirenkamas linijinis (*rectilinear*).



3.3 pav. Parenkami pirmos detalės užpildymo parametrai

Atspausdinant pirmąją detalę (3.4 pav.) išnaudojamos medžiagos kiekis (*PLA* plastiko viela, $\varnothing 1,75\text{mm}$.) parodytas programoje buvo:

- 22,6 m medžiagos ilgis;
- 16,4 g medžiagos masė;
- 630 cm³ medžiagos tūris;
- 1903 s detalės spausdinimo laikas.

Pasvertos detalės masė – 7 g.

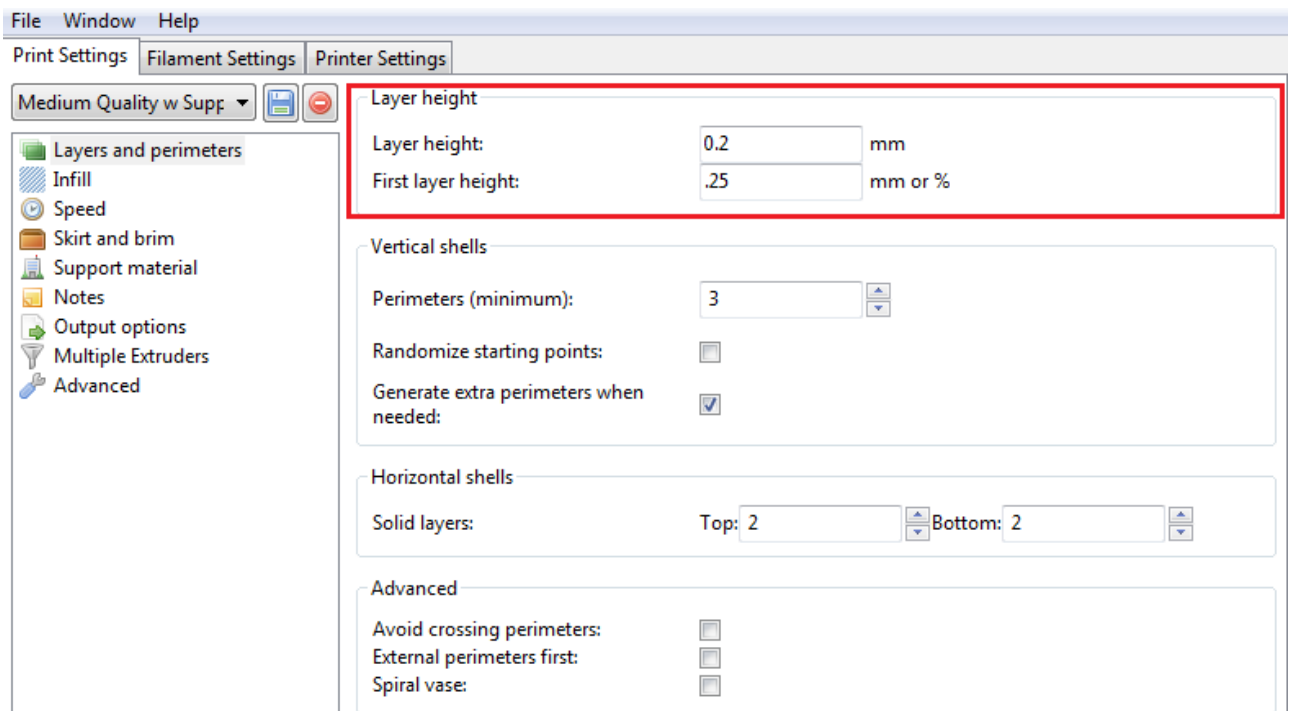


3.4 pav. Atspausdintos detalės užpildymas – 100%

3.3. Antroji atspausdinta detalė

3.3.1 Atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametrų nustatymas

Antrosios atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametrai pateikiami (3.5 pav.) programos lange. Sluoksnių aukščio (*Layer height*) parametrai buvo parinkti – 0,2mm, išskyrus pirmojo sluoksnio aukštis (*First layer height*) – 0,25mm. Tai reiškia, kad pirmasis sluoksnis bus aukštesnis už visus kitus sluoksnius užsidedančius ant jo. Tik todėl, kad tarp 3D spausdintuve esančio spausdinimo galvutės ir pado yra atstumas, kurį reikia įvertinti.



3.5 pav. Parenkami antros detalės sluoksnių aukščio parametrai

Atspausdintos detalės neišeina nufotografuoti, neturiu tokių priemonių, bet pateikiamas pavyzdys, kaip atrodo sluoksnių išsidėstymas (3.6 pav.).



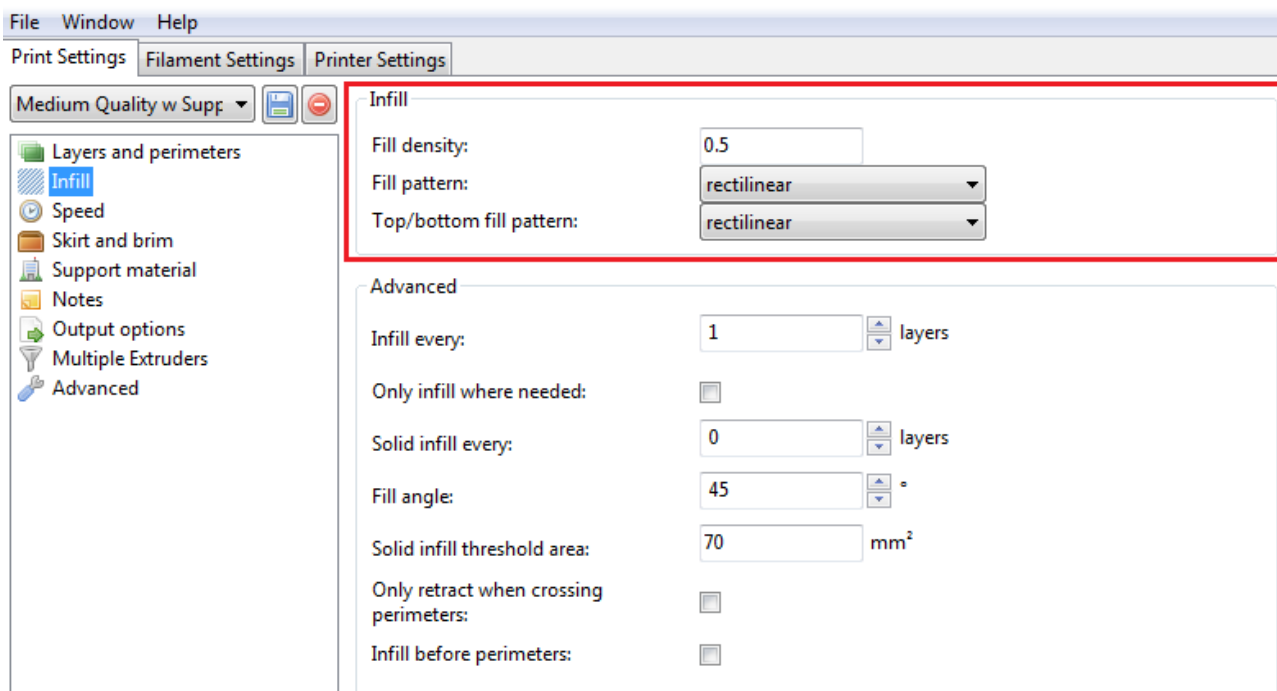
3.6 pav. Atspausdintos detalės sluoksnių aukštis – 0,2mm

3.3.2 Atspausdintos detalės užpildymo parametrų nustatymas

Nuo detalės užpildymo priklauso jos tvirtumas lenkimui ar glemžimui. Detalės užpildomi sluoksniai būna tik dviejų pasirinkimo tipų: pilnas sluoksnių užpildymas arba tik dalinis vidaus užpildymas.

Paveikslėlyje (3.7 pav.) matome, kad detalių užpildymo pastraipoje (*Infill*) užpildymo tankis (*Fill density*) parinktas 0,5. Šiuo atveju buvo parenkamas detalės dalinis vidaus sluoksnių užpildymas, nes 0,5 yra lygus 50%.

Užpildymo modelio tipas (*Fill pattern*) ir pagrindinės plokštumos tipas (*Top/bottom fill pattern*) buvo pasirenkamas linijinis (*rectilinear*).



3.7 pav. Parenkami antros detalės užpildymo parametrai

Spausdinant antrąją detalę (3.8 pav.) išnaudojamos medžiagos (*PLA* plastiko viela, Ø1,75mm.) kiekis parodytas programoje buvo:

- 18,6 m medžiagos ilgio;
- 13,5 g medžiagos masė;
- 450 cm³ medžiagos tūrio;
- 1142 s detalės spausdinimo laikas.

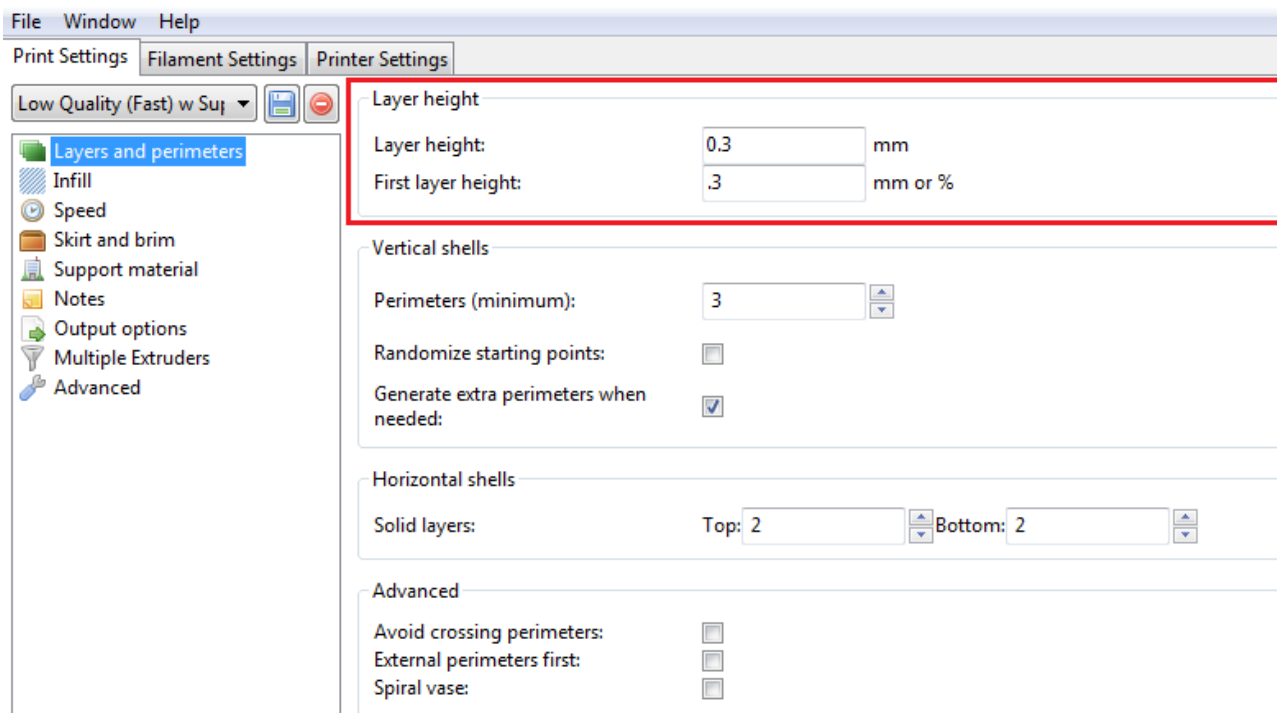
Pasvertos detalės masė – 5 g.



3.8 pav. Atspausdintos detalės užpildymas – 50%

3.4. Trečioji atspausdinta detalė

3.4.1 Atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametru nustatymas



3.9 pav. Parenkami trečios detalės sluoksnių aukščio parametrai

Trečiosios atspausdintos detalės sluoksnių aukščio parametrai pateikiami (3.9 pav.) programos lange. Sluoksnių aukščio (*Layer height*) parametrai buvo parinkti – 0,3mm, o pirmojo sluoksniu aukštis yra lygus visiems bendriems sluoksniams (*First layer height*). Daugiau nei 0,35mm negalima padaryti, nes plastiko viela nebesieks pado.

Atspausdintos detalės neišeina nufotografuoti, neturiu tokių priemonių, bet pateikiamas pavyzdys, kaip atrodo sluoksnių išsidėstymas (3.10 pav.).



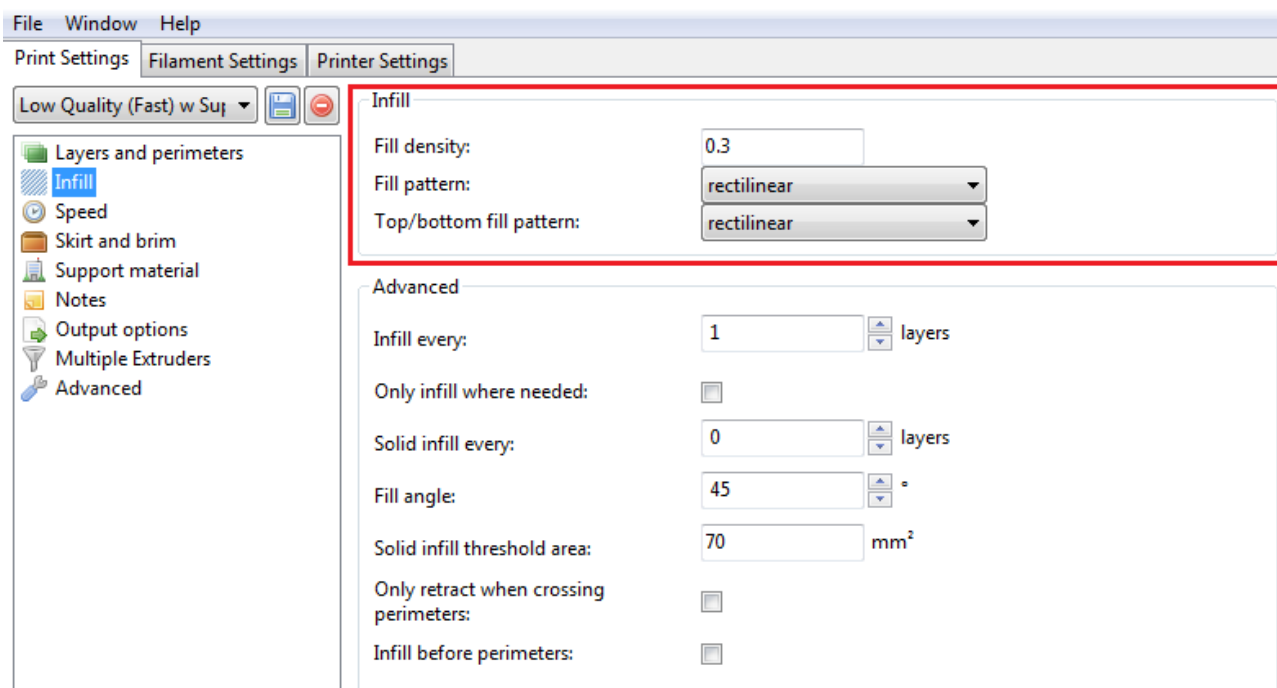
3.10 pav. Atspausdintos detalės sluoksnių aukštis – 0,3mm

3.4.2 Atspausdintos detalės užpildymo parametrų nustatymas

Nuo detalės užpildymo priklauso jos tvirtumas lenkimui ar glemžimui. Detalės užpildomi sluoksniai būna tik dviejų pasirinkimo tipų: pilnas sluoksnių užpildymas arba tik dalinis vidaus užpildymas.

Paveikslėlyje (3.11 pav.) matome, kad detalių užpildymo pastraipoje (*Infill*) užpildymo tankis (*Fill density*) parinktas 0,3. Šiuo atveju buvo parenkamas detalės dalinis vidaus sluoksnių užpildymas, nes 0,3 yra lygus 30%.

Užpildymo modelio tipas (*Fill pattern*) ir pagrindinės plokštumos tipas (*Top/bottom fill pattern*) buvo pasirenkamas linijinis (*rectilinear*).



3.11 pav. Parenkami trečios detalės užpildymo parametrai

Spausdinant trečiąją detalę (3.12 pav.) išnaudojamos medžiagos (*PLA* plastiko viela, Ø1,75mm.) kiekis parodytas programoje buvo:

- 14,0 m medžiagos ilgio;
- 10,2 g medžiagos masė;
- 340 cm³ medžiagos tūrio;
- 912 s detalės spausdinimo laikas.

Pasvertos detalės masė – 4 g.



3.12 pav. Atspausdintos detalės užpildymas – 30%

3.5. Pasirinkta detalė iš atspausdintų – antroji

Kiekviena detalė tarp atspausdintų turi savų pliusų ar minusų, nors detalių aukščių sluoksniai ir užpildymo tankis skirtingi. Atlikus visus veiksmus supratau, kad brangiausiai gaminama detalė nėra pati geriausia visiems 3D spausdinimo atvejams.

Pirmoji detalė nesigavo graži, nes daug apdegusių paviršių nuo per didelės temperatūros. Ji buvo visiškai užpildyta viduje. Pagrindinis didžiausias jos pliusas – tvirtumas.

Antrosios detalės sunaudojamos medžiagos buvo mažesnės, palyginus su pirmąja detale. Jos išvaizda geriausia iš trijų detalių ir vidutinė pagal tvirtumą.

Trečioji detalė panaši savo kokybe ir išvaizda į antrąją. Sunaudojama mažiausiai medžiagos, dėl to, nėra tokia tvirta. Nors ir sluoksnio aukštis didžiausias, bet gavusi detalė tikrai pateisino medžiagos išnaudojimo ir išvaizdos santykį.

Įvertinus visas tris detales norėjosi pasirinkti trečiąją, bet temperatūrų tyrimui įdomesnė – antroji detalė, kurią ir rinkausi tolimesniajai analizei ir tyrimui.

3.6. Pasirinktos detalės temperatūrų tyrimas ir analizė

Tikslinamoji kreivė tiesiogiai priklauso nuo *kaitinimo elemento kreivės*. Tikslinamoji kreivė „sušvelnina“ spausdintuvo darbą, padeda saugiai junginėti variklius.

Laiko kreivė lygi praėjusiam laikui per tam tikrą kaitinimo ciklą. Kaitinimo elemento pradžios laikas nustatomas žiūrint į *laiko kreivę*. Ten kur kiekvienoje bandymo diagramoje ši kreivė kertasi su *tikslinamąją kreive*.

Diagramose tikslus laikas nematomas, tačiau esami laiko duomenys buvo pateikti programoje per kiekvieną spausdinimą. Perbraižyti tikslų diagramų nepavyksta, nes nėra skaitinių duomenų.

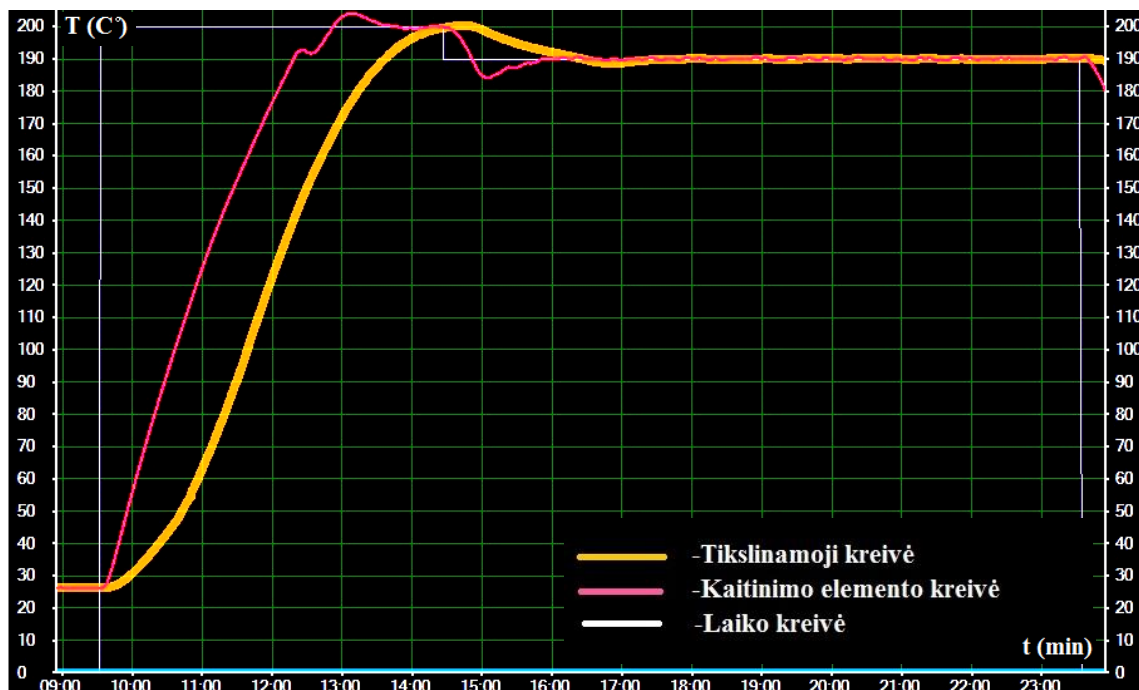
Visiems 3D spausdintuvams rekomenduojama pradinė darbinė temperatūra – 200°C . Bandymus pradėsiu nuo rekomenduojamos temperatūros ir žemėjančia tvarka mėginsiu sužinoti kokia mažiausia temperatūra galima atspausdinti detalę.

Pradinė temperatūra visada būna aukštesnė, nei tolimesnis spausdintuvo darbas. Pakilus iki reikiamos temperatūros išsijungia spausdintuvo kaitinimo elementas ir tuo laiku padaro kreivės nuosmūkį, kad jo išvengti pirmiausiai temperatūra pakeliama aukščiau 10°C . Šis temperatūros pakėlimas kompensuoja kaitinimo elemento išsijungimo nuosmūkį.

Visi skyrelių pavadinimai susieti su viršutine temperatūra (maksimumu) ar pradine darbine temperatūra. Spausdinimo metu palaikoma 10°C žemesnė vidutinė temperatūra, nei pradinė darbinė temperatūra, išskyrus (3.6.5) skyrelį, kuriame yra lygi.

3.6.1 Atspausdintos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia 200°C

Spausdinimo metu rodoma kaitinimo elemento pradžios temperatūros diagrama.



3.13 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai siekia 200°C temperatūrą

Pasirinktos detalės diagramoje (3.13 pav.) kaitinimo elementas pasiekė 200 laipsnių temperatūrą per $5\text{ min } 4\text{ s} = 304\text{ s}$.

Detalės spausdinimo laikas neskaičiuojant kaitinimo elemento įšilimo iki reikiamos temperatūros buvo – $13\text{ min } 58\text{ s} = 838\text{ s}$.

Visas bendras laikas iki pagamintos detalės yra:

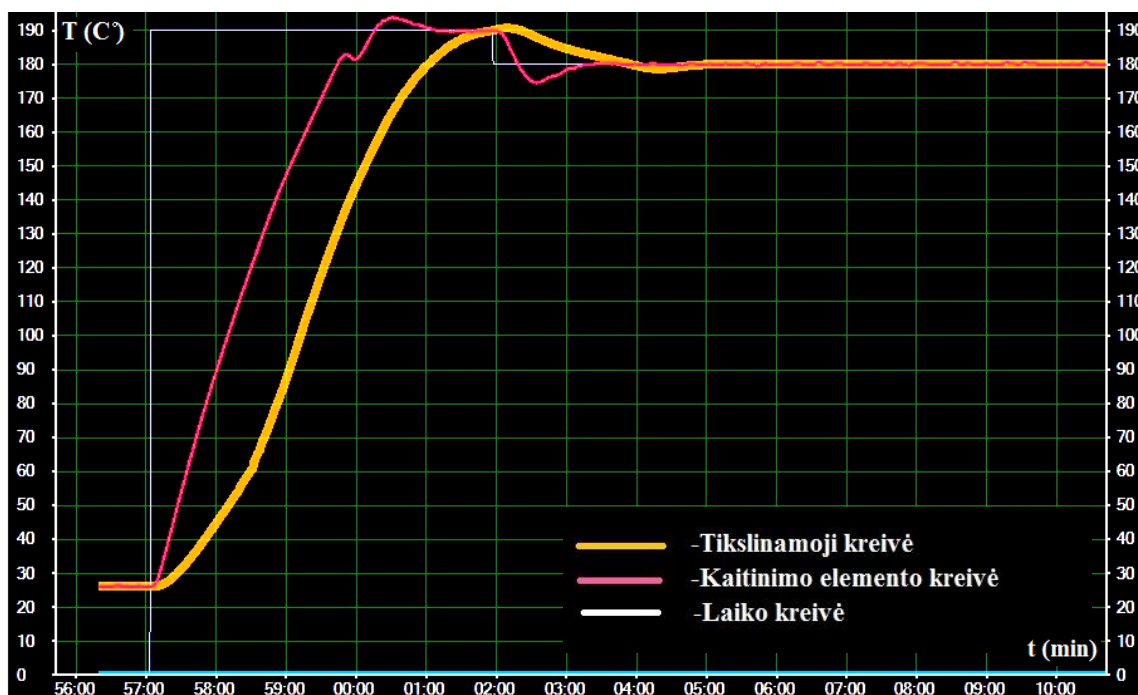
$$t_v = t_p + t_d; \quad (3.1)$$

$$t_v = 304s + 838s = 1142s = 19 \text{ min } 2s.$$

Čia t_p – įšilimo kaitinimo elemento laikas iki reikiamos temperatūros, s ; t_d – detalės gamavimo laikas, kai jau pašilęs kaitinimo elementas, s .

3.6.2 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia $190^\circ C$

Spausdinimo metu rodoma kaitinimo elemento pradžios temperatūros diagrama.



3.14 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai siekia $190^\circ C$ temperatūrą

Pasirinktos detalės diagramoje (3.14 pav.) kaitinimo elementas pasiekė 190 laipsnių temperatūrą per $4 \text{ min } 55 s = 295s$.

Detalės spausdinimo laikas neskaičiuojant kaitinimo elemento įšilimo iki reikiamos temperatūros buvo – $11 \text{ min } 48s = 708s$.

Visas bendras laikas iki pagamintos detalės yra:

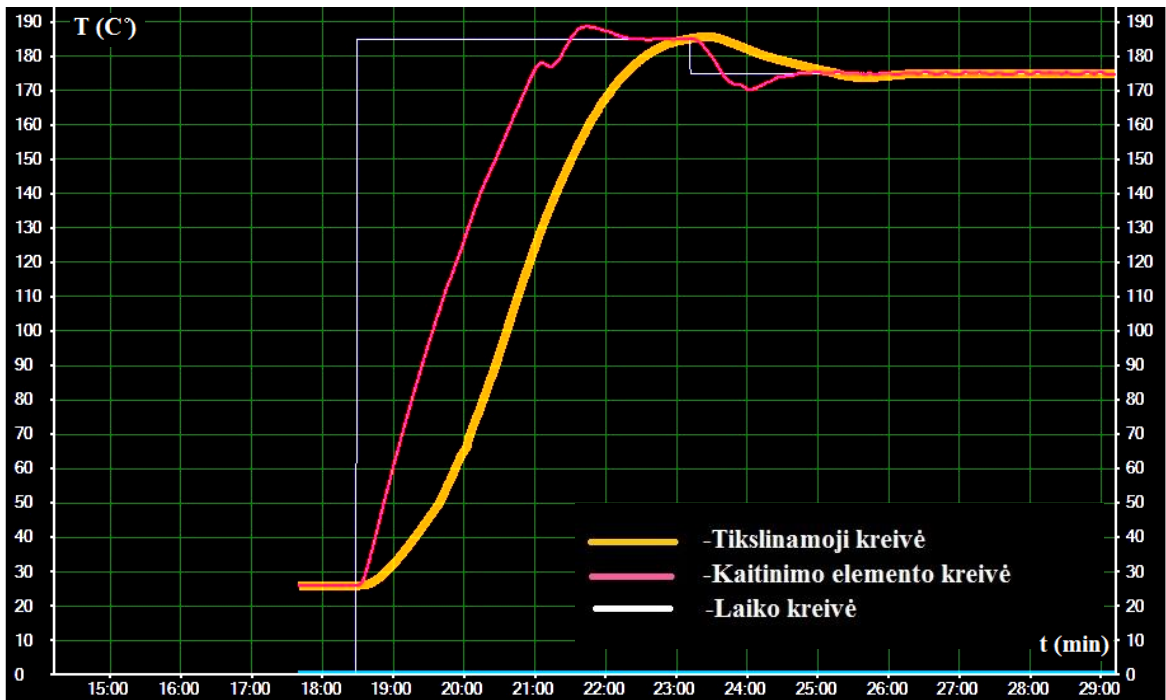
$$t_v = t_p + t_d; \quad (3.2)$$

$$t_v = 295s + 708s = 1003s = 16 \text{ min } 43s.$$

Čia t_p – įšilimo kaitinimo elemento laikas iki reikiamos temperatūros, s ; t_d – detalės gamavimo laikas, kai jau pašilęs kaitinimo elementas, s .

3.6.3 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia 185°C

Spausdinimo metu rodoma kaitinimo elemento pradžios temperatūros diagrama.



3.15 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai siekia 185°C temperatūrą

Pasirinktos detalės diagramoje (3.15 pav.) kaitinimo elementas pasiekė 185 laipsnių temperatūrą per $4 \text{ min } 36 \text{ s} = 276 \text{ s}$.

Detalės spausdinimo laikas neskaičiuojant kaitinimo elemento įšilimo iki reikiamos temperatūros buvo – $11 \text{ min } 54 \text{ s} = 714 \text{ s}$.

Visas bendras laikas iki pagamintos detalės yra:

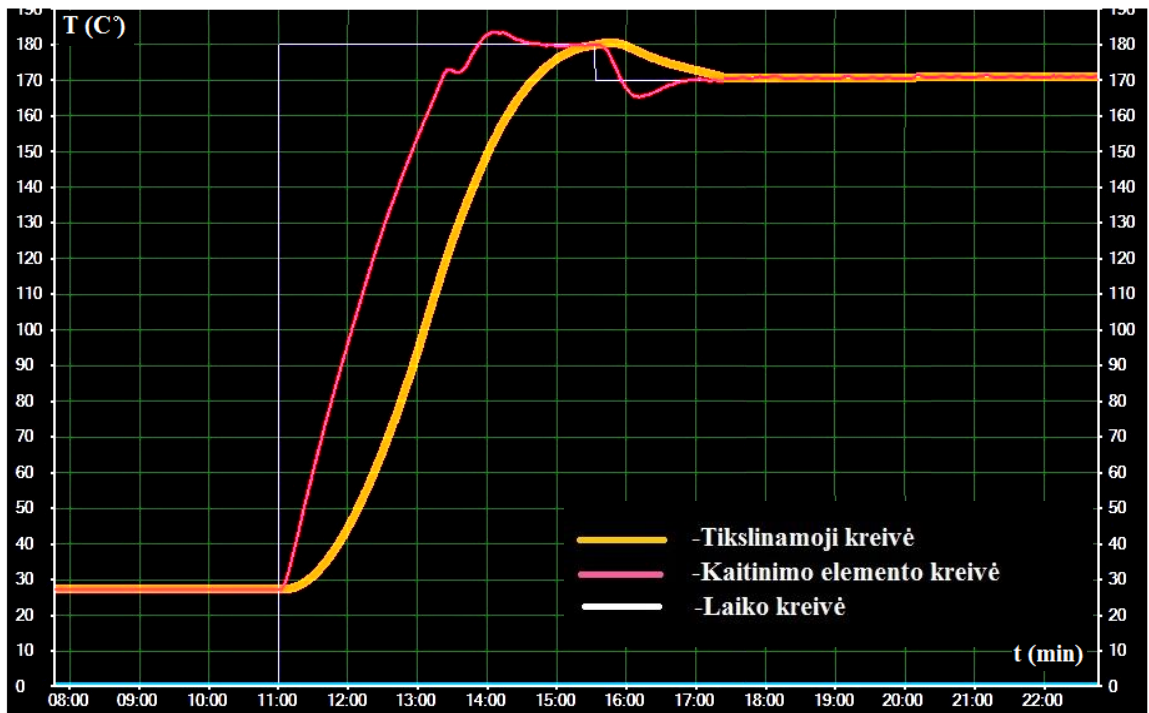
$$t_v = t_p + t_d; \quad (3.3)$$

$$t_v = 276 \text{ s} + 714 \text{ s} = 990 \text{ s} = 16 \text{ min } 30 \text{ s}.$$

Čia t_p – įšilimo kaitinimo elemento laikas iki reikiamos temperatūros, s; t_d – detalės gaminimo laikas, kai jau pašilęs kaitinimo elementas, s.

3.6.4 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas siekia 180°C

Spausdinimo metu rodoma kaitinimo elemento pradžios temperatūros diagrama.



3.16 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai siekia 180°C temperatūrą

Pasirinktos detalės diagramoje (3.16 pav.) kaitinimo elementas pasiekė 180 laipsnių temperatūrą per $4 \text{ min } 30 \text{ s} = 270\text{s}$.

Detalės spausdinimo laikas neskaičiuojant kaitinimo elemento įšilimo iki reikiamos temperatūros buvo – $11 \text{ min } 38\text{s} = 698\text{s}$.

Visas bendras laikas iki pagamintos detalės yra:

$$t_v = t_p + t_d; \quad (3.4)$$

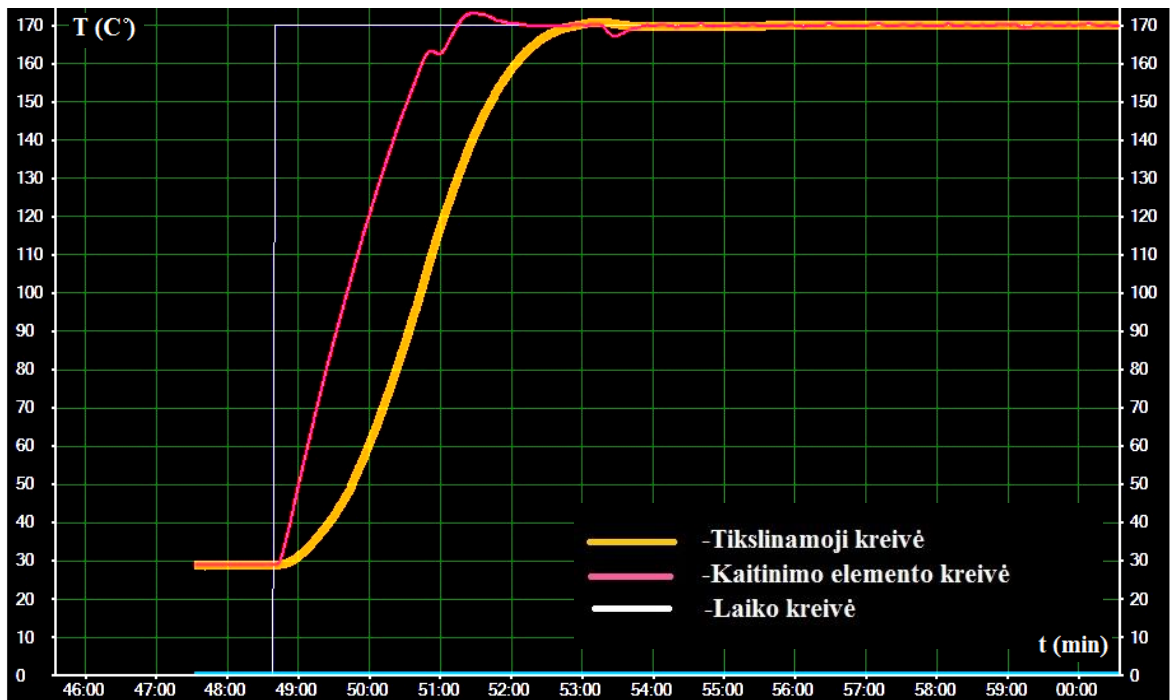
$$t_v = 270\text{s} + 698\text{s} = 968\text{s} = 16 \text{ min } 8\text{s}.$$

Čia t_p – įšilimo kaitinimo elemento laikas iki reikiamos temperatūros, s ; t_d – detalės gaminimo laikas, kai jau pašilęs kaitinimo elementas, s .

3.6.5 Spausdinamos detalės temperatūra, kai kaitinimo elementas lygus 170°C

Norėjau sužinoti esminius skirtumus spausdinimo metu, kai būna lygi kaitinimo elemento temperatūra ar visgi būtinai turi būti reikalingas pirmiausias temperatūros pakilimas iki 10°C .

Spausdinimo metu rodoma kaitinimo elemento pradžios temperatūros diagrama.



3.17 pav. Kaitinimo elemento diagrama, kai vienoda 170°C temperatūrą

Pasirinktos detalės diagramoje (3.16 pav.) kaitinimo elementas pasiekė 170 laipsnių temperatūrą per $4 \text{ min } 23 \text{ s} = 263 \text{ s}$.

Detalės spausdinimo laikas neskaičiuojant kaitinimo elemento įšilimo iki reikiamos temperatūros buvo – $12 \text{ min } 1 \text{ s} = 721 \text{ s}$.

Visas bendras laikas iki pagamintos detalės yra:

$$t_v = t_p + t_d; \quad (3.4)$$

$$t_v = 263 \text{ s} + 721 \text{ s} = 984 \text{ s} = 16 \text{ min } 24 \text{ s}.$$

Čia t_p – įšilimo kaitinimo elemento laikas iki reikiamos temperatūros, s ; t_d – detalės gaminimo laikas, kai jau pašilęs kaitinimo elementas, s .

4. GAUTŲ TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ IR LYGINIMAS

Gautų spausdinimo nustatymų duomenys surašomi į 4.1 ir 4.2 lenteles:

4.1 lentelė. Bendri detalių spausdinimo nustatymų duomenys

	Pirmo sluoksnio aukštis, mm	Kitų sluoksnių aukštis, mm	Detalės užpildymas, %
Pirmoji detalė	0,20	0,10	100
Antroji detalė	0,25	0,20	50
Trečioji detalė	0,30	0,30	30

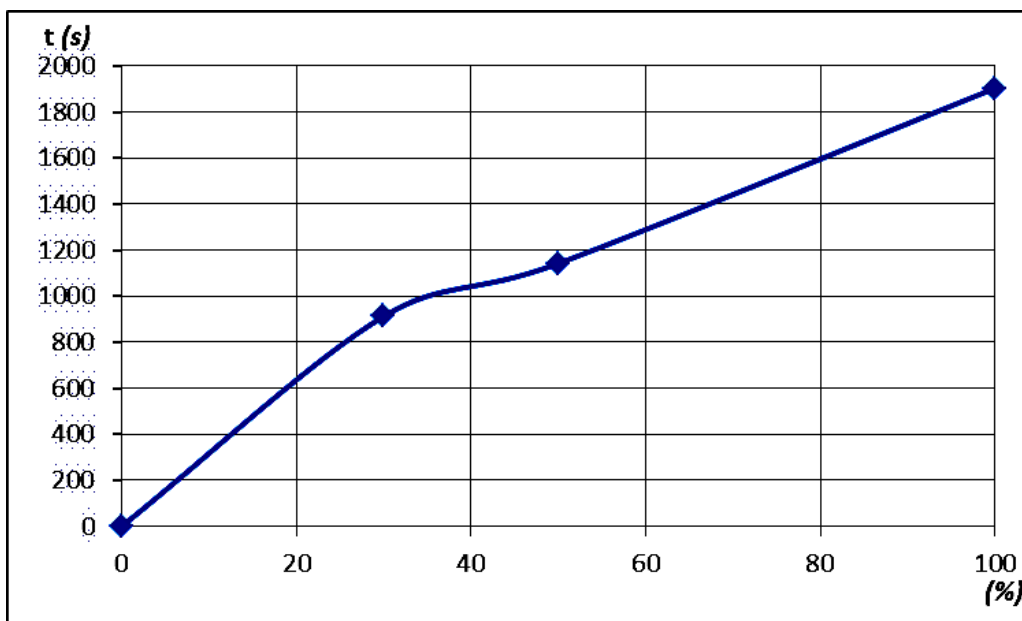
4.2 lentelė. Bendri detalių spausdinimo medžiagos ir laiko duomenys

	Išnaudotos medžiagos svoris, g	Pagamintos detalės svoris, g	Visas laikas iki pagamintos detalės, s
Pirmoji detalė	16,4	7	1903
Antroji detalė	13,5	5	1142
Trečioji detalė	10,2	4	912

Pasirinkta detalė – *antroji*. Ji tarsi „aukso viduriukas“, kuris tenkina mano norimos detalės kokybę. 4.1 ir 4.2 lentelėje labiau paryškintas pasirinkimo variantas ir programos parametų nustatymas su detalės medžiagos duomenimis. Pateiktos atspausdintų detalių nuotraukos po kiekvienų parametų keitimo, tad išsirinktą detalę atspausdinau, papildomai 4 kartus, su skirtingomis kaitinimo elemento temperatūromis.

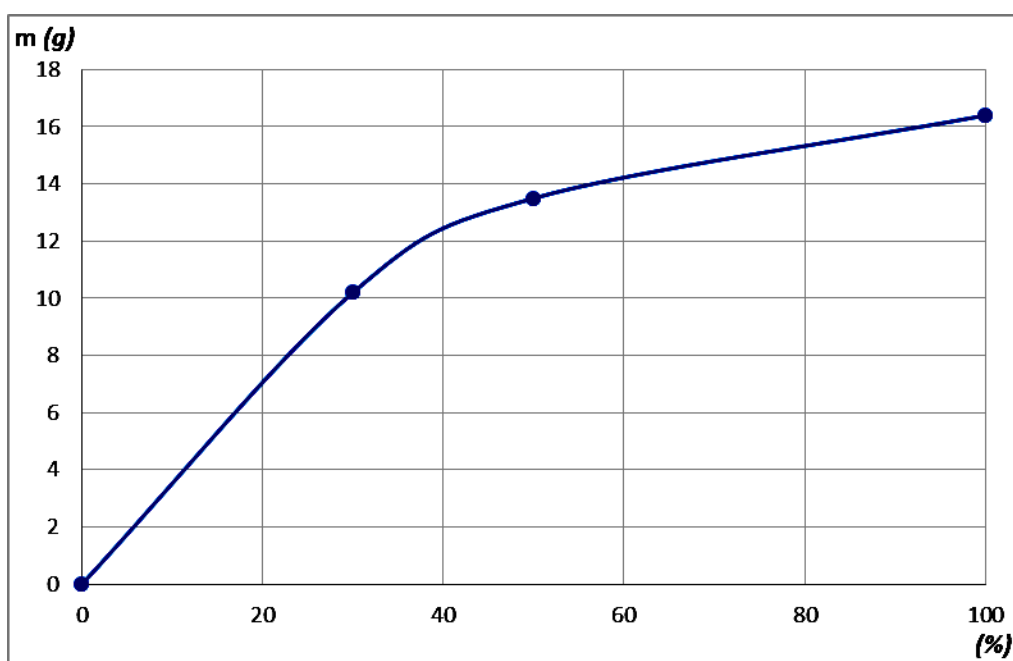
Pagal grafiką (4.1 pav.) matyti, kad spausdinimo laikas ilgėja, kai keičiamas detalės vidaus užpildymas.

Jei keičiamas detalės užpildymas didėjančia tvarka artėjant prie 100 % ir kartu sluoksnio aukštis mažėjančia tvarka artėjant prie 0, tai laikas tampa daug ilgesnis, nei pakeitus tik vieną parametą iš apžvelgtų.



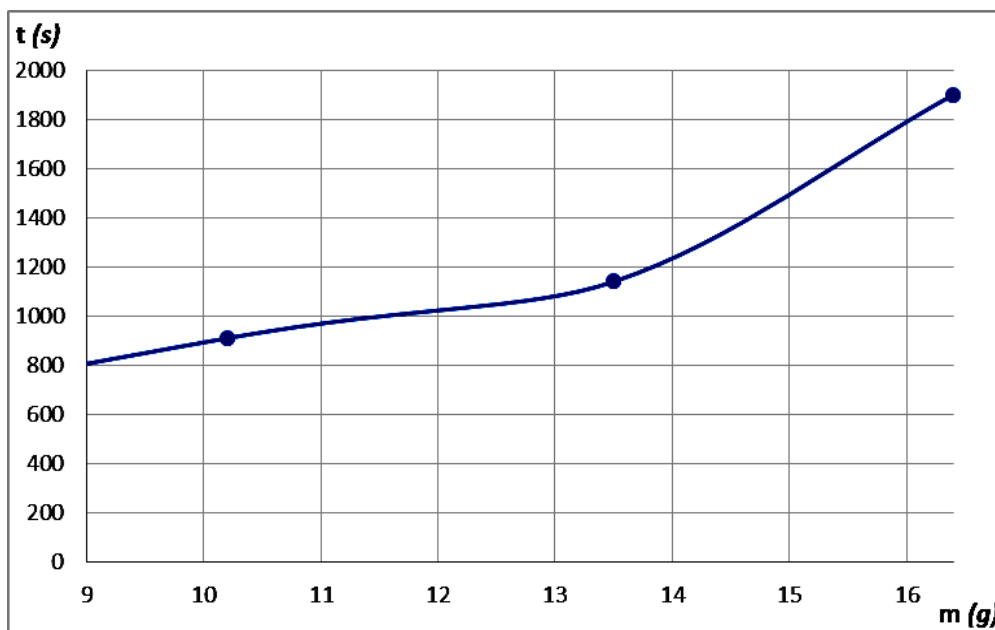
4.1 pav. Spausdinamos detalės pagaminimo laiko ir jos užpildymo (procentais) grafikas

Parenkant detalės užpildymą (procentais) ir atkreipiant dėmesį į išnaudojamą medžiagos masės kiekį gramais matome, kad grafike (4.2 pav.) sunaudojama daugiau medžiagos iki 38%, nei tuo tarpu tarp 38% iki 100%.



4.2 pav. Sunaudojamos medžiagos masės ir detalės užpildymo (procentais) grafikas

Grafike (4.3 pav.) matome, kaip keičiasi detalės pagaminimo laikas, ir atitinkamai pasiskirsto sunaudojamos medžiagos (PLA plastiko viela) masė.



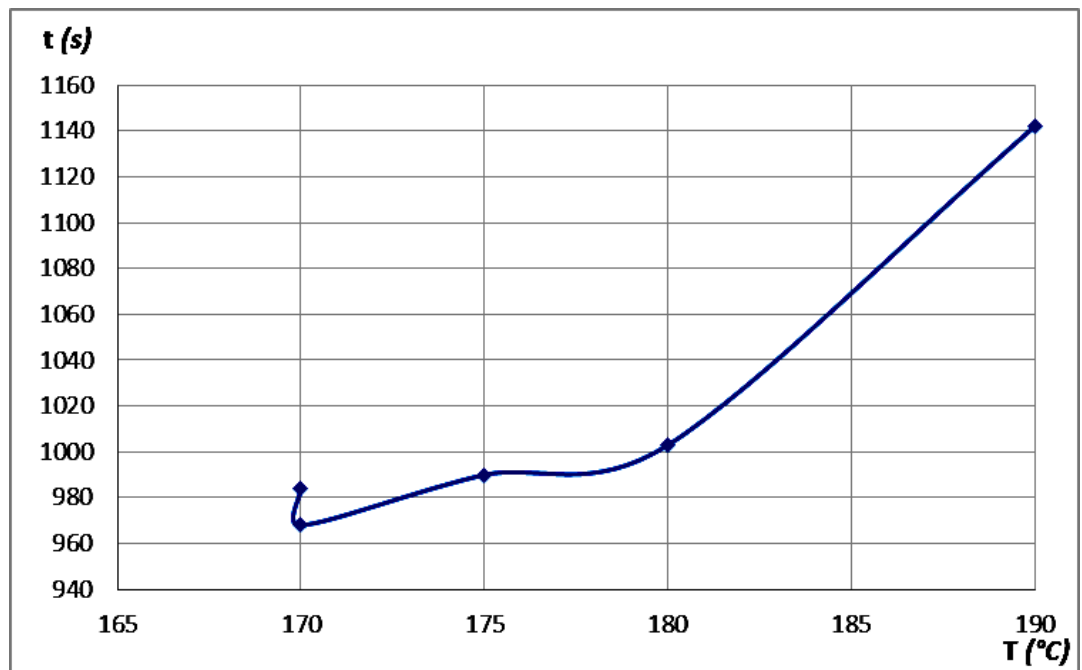
4.3 pav. Sunaudojamos medžiagos masės ir detalės pagaminimo laiko grafikas

Pasirinktų 3D spausdintuve temperatūrų parametrai pateikiami 4.3 lent. Viso buvo atlikti 5 bandymai su skirtingais nustatymais tiek darbine, tiek pradžios kaitinimo elemento temperatūra.

4.3 lentelė. Bendri temperatūrų ir laikų gauti duomenys

Bandymo Nr.	Pradžios kaitinimo elemento temperatūra, °C	Darbinė spausdintuvo temperatūra, °C	Laikas per kurį kaitinimo elementas sušyla, s	Spausdinamos detalės laikas, s	Visas laikas iki pagamintos detalės, s
1	200	190	304	838	1142
2	190	180	295	708	1003
3	185	175	276	714	990
4	180	170	270	698	968
5	170	170	263	721	984

Pagal 4.3 lent. Matome, kad pirmame bandymo numeryje pradžios kaitinimo elemento temperatūra pasirinkta didžiausia – 200°C , o darbinė spausdintuvo temperatūra – 190°C . Bandymo numeriuose 1 – 4 naudojami lygiai taip pat kaip ir pirmojo su 10°C didesne pradžios temperatūra. O penktu bandymo numeriu mažiausia temperatūra buvo priešinga didžiausiajai ir pasirinkta lygi – 170°C .



4.4 pav. Spausdinamų detalių laiko priklausomybė nuo liejimo temperatūros grafikas

Laikas per kurį katinimo elementas sušyla yra palyginus proporcingas visiems atvejams ir atitinkamai mažinant pradinę temperatūrą – kaitinimo elementas greičiau pašyla iki reikiamos temperatūros (4.4 pav.). Spausdinamos detalės laikas ilgiausias kai užduodama didžiausia plastiko lydimosi temperatūra. Pasirodo, temperatūros poveikis turi įtakos detalės spausdinimo laikui.

Spausdinamos detalės temperatūros diapazone $190^{\circ}C$ – $175^{\circ}C$ dar pavyksta kokybiškai atspausdinti detalę, nes išlieka beveik tos pačios spausdinimo ir plastiko savybės. Žemutinė riba spausdintuvo yra ties $175^{\circ}C$ ir jokių būdu ne mažesnė, tai parodė mano atlikti tyrimai ir gauti rezultatai. 4 – 5 bandymai, kurie yra paryškinti 4.2 lent., neatitinka reikalingai spausdinimo temperatūrai, nes atspausdinama detalės kokybė – labai bloga.

IŠVADOS

Darbe buvo aptarta pagaminto 3D spausdintuvo konstrukcija ir palyginta atspausdintų detalių kokybė su skirtingais parametrais. Atliekant darbą buvo išspręsti uždaviniai ir iš gautų duomenų padariau tokias išvadas:

1. Darbe buvo apžvelgtos įvairių 3D spausdintuvų konstrukcijos.
2. Išanalizuota tiriamo trimačio spausdintuvo konstrukcija.
3. Programa “SolidWorks” nubrėžtas detalės modelis, kurį atspausdinau.
4. Paruošiau ir sukaliavau pagamintą 3D spausdintuvą spausdinimui.
5. Atspausdinau tris detales skirtingais spausdintuvo parametrais.
6. Išsirinkau geriausiai atspausdintą detalę – antrąją. Kai užliejama detalė 50 % ir sluoksnių aukštis *0,2 mm*.
7. Išanalizuoti ir palyginti gauti rezultatai. Spausdintuvo sklandus darbas ir detalės kokybė tiesiogiai priklauso nuo temperatūros pasirinkimo. Gauti rezultatai parodė, kad minimali detalės spausdinimo darbinė temperatūra – *175°C*.

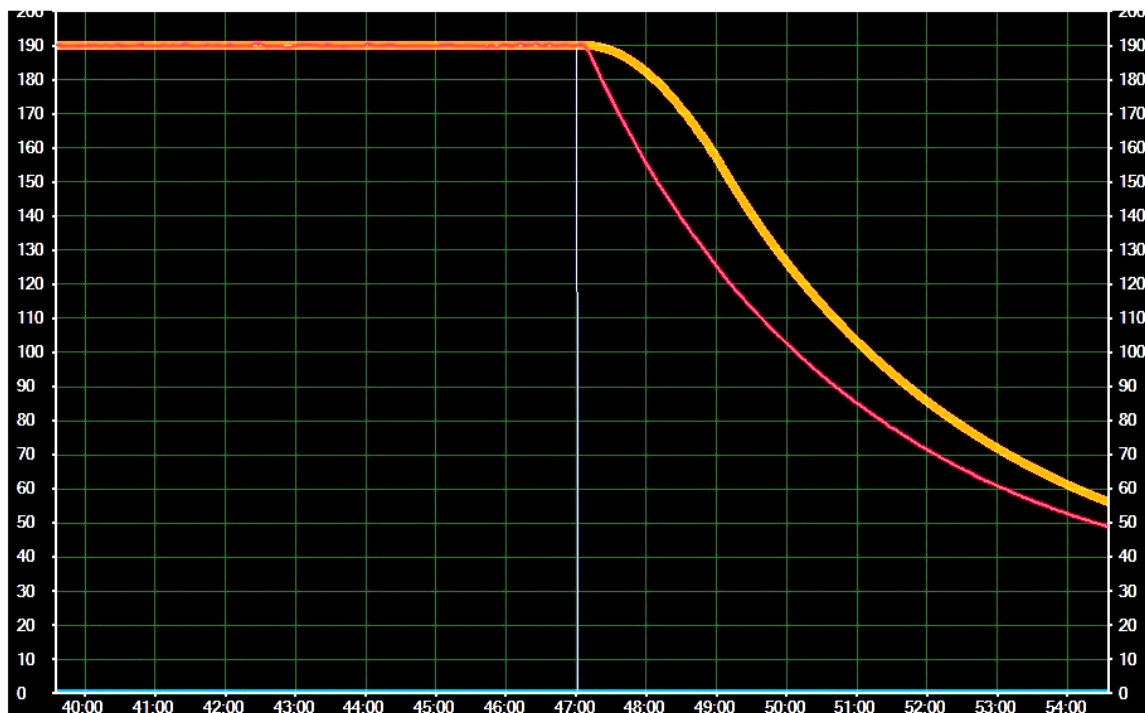
LITERATŪRA

1. Spausdintuvas „RepRap Mendel“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.03.07]. Prieiga per internetą: < <http://www.makergear.com/> >.
2. Spausdintuvas „RepRap Huxley“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.03.15]. Prieiga per internetą: < <http://reprappro.com/> >.
3. Spausdintuvas „MakerBot“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.03.16]. Prieiga per internetą: < <http://store.makerbot.com/> >.
4. Spausdintuvas „MakerGear Mosaic M1“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.03.16]. Prieiga per internetą: < <http://store.makergear.com/products/m-series-3d-printers/> >.
5. Spausdintuvas „Ultimaker“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.03.17]. Prieiga per internetą: < <http://shop.ultimaker.com/> >.
6. Spausdintuvas „MendelMax and A0-100“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.03.18]. Prieiga per internetą: < <http://mendelmax.com/> >.
7. 3D spausdintuvas, kuris gamina pyragus [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.04.25]. Prieiga per internetą: < <http://tv.lrytas.lt/?id=13965354441395416837> >.
8. KELLY FLOYD, James; DANIEL – HOOD. *Printing in Plastic: Build You Own 3D Printer*. 2011. 423 p. ISBN 978-1-4302-3443-9.
9. KELLY FLOYD, James. *3D Printing: Build You Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects*. 2014. 177 p. ISBN 978-0-7897-5235-2.
10. BARNATT, Christopher. *3D Printing: The Next Industrial Revolution*. 2013. 254 p. ISBN 978-1-484-181768.
11. LIPSON Hod; KURMAN Melba. *Fabricated: The new world of 3D Printing*. 2013. 289 p. ISBN 978-1-118-35063-8.
12. Pagamintas 3D spausdintuvas Lietuvoje [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.04.08]. Prieiga per internetą: < <http://www.siloaidas.lt/?p=3424/> >.
13. Parduodamas spausdintuvas Lietuvoje [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.04.24]. Prieiga per internetą: < <http://www.topocentras.lt/> >.
14. Spausdintuvo technologija FDM [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.04.25]. Prieiga per internetą: < <http://inre.lt/spausdinu3d/pagrindinis/> >.
15. 3D spausdintuvo programa [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.05.02]. Prieiga per internetą: < <http://www.repetier.com/download/> >.
16. ABS ir PLA plastiko skirtumai [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.05.10]. Prieiga per internetą: < <http://www.3d-cad.lt/3d-spausdintuvai.html> >.

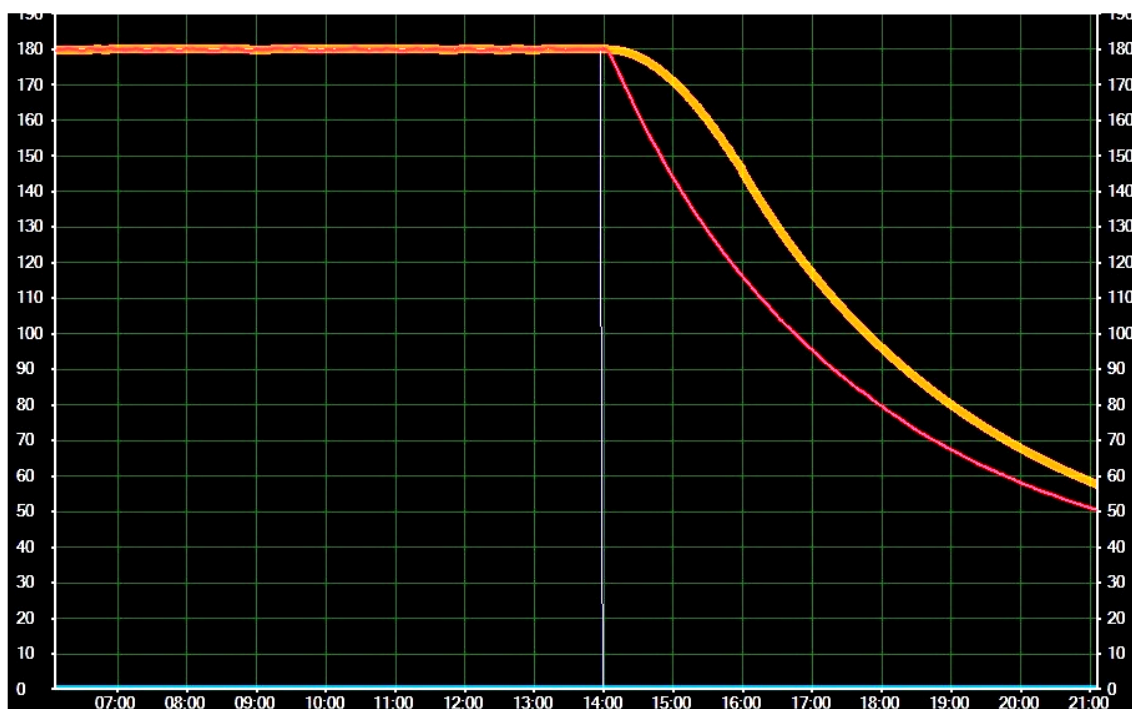
17. PLA plastikas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014.05.12]. Prieiga per internetą: <
<http://www.iliustruotasmokslas.lt/?PublicationId=6F513B48-DF2C-48E6-9033-7A8CFF7C04F3&SiteId=9FDC3F0A-9B39-4F3F-940C-47A484F2613E> >.
18. SABALIAUSKAS, Artūras; MINGAILIENĖ, Aušra; ČIKOTIENĖ, Dalia. *Magistro baigiamojo darbo rengimo metodiniai nurodymai*. Šiauliai, 2010.

PRIEDAI

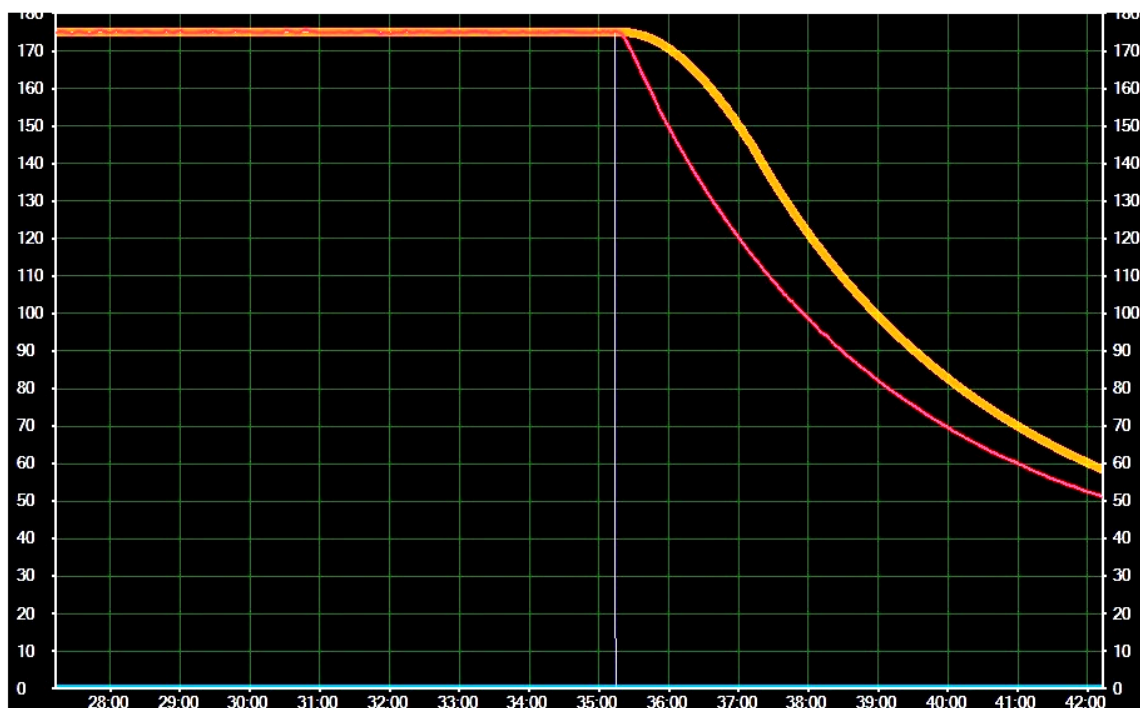
1 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo 190°C iki 56°C .



2 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo 180°C iki 58°C .



3 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo 185°C iki 58°C .



4 PRIEDAS. Spausdinamos detalės temperatūros diagrama, kai kaitinimo elementas vėsta nuo 170°C iki 57°C .



5 PRIEDAS. Mokslinėje konferencijoje skaityto pranešimo sertifikatas