



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Žygimantas Kerza
Projekto autorius

Doc. Marius Rimašauskas
Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Žygimantas Kerza

Projekto autorius

Doc. Marius Rimašauskas

Vadovas

**Mokslo darbuotojas Valdas
Grigaliūnas**

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Žygimantas Kerza

Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo galimybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Žygimantas Kerza

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei) – Žygimantui Kerzai

1. Projekto tema –

Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo galimybių tyrimas

(Lietuviškai)

Investigation of 3D Printing Possibilities of High Temperature Polymers

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas: Praktiškai nustatyti aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo galimybes modifikuojant lydžios masės formavimo spausdintuvą.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti jau esamų ir naudojamų 3D spausdintuvų parametrus, konstrukciją skirtus aukštatemperatūriams polimerams spausdinti.
2. Išnagrinėti moksliniuose straipsniuose atliktų bandymų su PEI polimeru spausdinimo parametrus.
3. Praktiškai atlikti PEI polimero spausdinimą su surinkta kaitinimo galva.
4. Atlikti surinkto spausdintuvo ašių judėjimo tikslumo tyrimą.
5. Įvertinti ekonomiškai spausdintuvo savikainą bei spausdinimo proceso kainą naudojant PEI.

3. Pradiniai projekto duomenys –

Netaikoma

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Aukštatemperatūris polimeras PEI, FDM tipo 3D spausdintuvas.

Projekto autorius

Žygimantas Kerza

2022 10 17

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vadovas

Marius Rimašauskas

2022 10 17

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovė

Regita Bendikienė

2022 10 17

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Kerza Žygimantas. Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo galimybių 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, aukštatemperatūriai polimerai, PEI.

Kaunas, 2023. 62 p.

Santrauka

Darbe pristatyta aukštatemperatūrio polimero sąvoka ir atlikta bendra bei PEI polimero 3D spausdinimo technologijos analizė, apžvelgti rinkoje esantys populiariausi šiai medžiagai spausdinti tinkami 3D spausdintuvai, pateiktos parametrų lentelės, konstrukcijų ypatumai bei kainos, atliktas įrenginių tarpusavio palyginimas. Pagal atliktą analizę surinktas FDM tipo 3D spausdintuvas, kurį galima pritaikyti aukštatemperatūrių polimerų spausdinimui. Spausdintuve naudojami valdikliai – Arduino MEGA 2560, RAMPS 1.4 ir „Marlin“ programinė įranga. Darbe pateikta metodika, kaip tinkamai integruoti „Marlin“ programinę įrangą į spausdintuvą, nurodytos konkrečios kodo eilutės, kuriose keičiamos reikšmės ar aprašomi papildomi veiksniai. Spausdintuve integruoti 3 mechaniniai sensoriai, kurių pagalba yra nustatomi X, Y ir Z ašių judesio nuliniai taškai. Pateiktos suprojektuotos laikančiosios detalės bei jų įtvirtinimai atitinkamose vietose, kad mechaninių sensorių paskirtis būtų tinkama. Aukštatemperatūrės medžiagos bandomajam spausdinimui atlikti panaudota ULTEM 1010 medžiaga. Atspausdintas 35 x 20 x 2 mm bandinys ir įvertinta detalės kokybė, slankmačiu išmatuojant detalės matmenis. Aukštos temperatūros palaikymui kaitinimo bloke panaudotas PT1000 termistorius, kuris gali veikti ir prie 500°C temperatūros. Projekte išanalizuotas įrenginio ašinių judesių tikslumas, nustatyti spausdintuvo kritiniai taškai, kuriuose spausdinimas gali turėti didžiausias paklaidas. Taip pat išanalizuotas temperatūros pasiskirstymas kaitinimo bloke ir radiatoriuje naudojantis termovizoriumi bei „Pronterface“ programa. Rezultatai pateikti grafikais ir nuotraukomis. Suprojektuotas ir surinktas 3D spausdintuvui skirtas gaubtas, kuris leidžia palaikyti reikiamą aukštesnę spausdinimo erdvės temperatūrą. Darbe pateikta gaubto surinkimo eiga bei panaudotų detalių sąrašas. Galiausiai, nustatyta surinkto spausdintuvo savikaina, kuri palyginta su darbe analizuotais 3D spausdintuvais, skirtais aukštatemperatūriams polimerams spausdinti. Sudarytas matematinis modelis pačio proceso kainai apskaičiuoti spausdinant su PEI medžiaga bei atliktas palyginimas su galimais paslaugos variantais internete.

Kerza Žygimantas. Investigation of 3D Printing Possibilities of High Temperature Polymers. 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, high performance polymers, PEI.

Kaunas, 2023. 62 p.

Summary

The work presented the concept of high-temperature polymer and carried out a general and PEI polymer 3D printing technology analysis, reviewed the most popular 3D printers suitable for printing this material on the market, presented parameter tables, structural features and prices, and conducted a comparison of equipment with each other. According to the analysis carried out, a 3D printer of the type FDM was assembled, which can be adapted for printing high-temperature polymers. The controllers used in the printer are Arduino MEGA 2560, RAMPS 1.4 and Marlin software. The work provides a methodology for the proper integration of Marlin software into the printer, specifies specific lines of code in which values are changed or additional factors are described. The printer has 3 mechanical sensors, with the help of which the zero points of motion of the X, Y and Z axes are determined. The designed load-bearing parts and their anchorages at the appropriate locations shall be provided so that the mechanical sensors are fit for purpose. ULTEM 1010 material was used to carry out the test printing of the high-temperature material. A sample of 35 x 20 x 2 mm was printed and the quality of the part was assessed, measuring the dimensions of the part with a caliper. To maintain a high temperature in the heating unit, a PT1000 thermistor was used, which can also operate at a temperature of 500°C. The project analyzed the accuracy of the axial movements of the device, identified the critical points of the printer, where printing can have the greatest errors. The temperature distribution in the heating unit and radiator using a thermal imager and the Pronterface program were also analyzed. The results are presented in the form of graphs and photographs. The hood for the 3D printer is designed and assembled, which allows you to maintain the required higher temperature in the printing space. The work contains the process of assembling the hood and a list of parts used. Finally, the cost of the assembled printer was determined, which was compared with the 3D printers analyzed at work for printing high-temperature polymers. A mathematical model was compiled to calculate the cost of the process itself by printing with PEI material and a comparison with possible variants of the service on the Internet was made.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo spausdintuvai.....	13
1.2. Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo proceso techniniai parametrai.....	25
2. Darbo metodinė dalis	31
3. Darbo eksperimentinė dalis	35
3.1. Termistoriaus parinkimas	35
3.2. Kaitinimo elemento parinkimas	36
3.3. Nulinių taškų sensorių integravimas į sistemą ir ašių judėjimo kalibravimas.....	41
3.4. Ašinių judesių tikslumo tyrimas	47
3.4.1. X ašies judesio tikslumo nustatymas	47
3.4.2. Y ašies judesio tikslumo nustatymas	49
3.4.3. Z ašies judesio tikslumo nustatymas	50
3.5. Gaubto konstrukcijos projektavimas	50
3.6. PLA spausdinimas	53
3.7. PEI spausdinimas.....	54
4. Ekonominė dalis.....	56
4.1. Įrenginio savikainos skaičiavimas	56
4.2. Spausdinimo proceso su PEI savikainos skaičiavimas.....	57
Išvados	60
Literatūros sąrašas	61

Lentelių sąrašas

1 lentelė. „22IDEX“ 3D spausdintuvo parametrai [4]	13
2 lentelė. „AON-M2“ spausdintuvo parametrai [6]	15
3 lentelė. „FUNMAT PRO 610HT“ 3D spausdintuvo parametrai [7]	16
4 lentelė. „FUNMAT HT“ 3D spausdintuvo parametrai [8]	18
5 lentelė. „ARGO 500“ 3D spausdintuvo parametrai [9]	19
6 lentelė. „F421“ 3D spausdintuvo parametrai [11]	21
7 lentelė. „P220“ 3D spausdintuvo parametrai [12]	22
8 lentelė. „PEEK-300“ 3D spausdintuvo parametrai [13]	24
9 lentelė. Suprojektuotos detalės mechaniniams sensoriams laikyti	43
10 lentelė. Suprojektuotos detalės skirtos gaubto konstrukcijai	51
11 lentelė. Spausdintuvo ir jo gaubto savikaina	56
12 lentelė. Spausdinimo proceso matematinis modelis	57

Paveikslų sąrašas

1 pav. 3D spausdinimo procesas [2]	12
2 pav. Polimerų piramidė pagal savybes [3]	13
3 pav. „22IDEX" 3D spausdintuvas [4]	13
4 pav. „AON-M2“ spausdintuvas [6]	15
5 pav. „FUNMAT PRO 610HT" 3D spausdintuvas [7]	16
6 pav. „FUNMAT HT“ 3D spausdintuvas [8]	18
7 pav. „ARGO 500“ 3D spausdintuvas [9]	19
8 pav. „ARGO 1000" 3D spausdintuvas [10]	20
9 pav. „F421" 3D spausdintuvas [11]	21
10 pav. „P220" 3D spausdintuvas [12]	22
11 pav. „PEEK-300" 3D spausdintuvas [13]	23
12 pav. Detalės ant kaitinimo platformos orientacijos rezultatų variantai [14]	25
13 pav. Bandinių orientavimas ir užpildymo linijų kryptis [15]	26
14 pav. Detalių orientavimo vizualus paaiškinimas	27
15 pav. PEEK ir PEI bandinių sluoksniavimas [18]	28
16 pav. Tyrėjų sukonstruotas gaubtas [20]	29
17 pav. RAMPS 1.4 plokštės sujungimas su nurodytomis vietomis	32
18 pav. Arduino Mega 2560 plokštė	32
19 pav. Surinkta spausdintuvo schema kairėje ir surinkto spausdintuvo konstrukcija dešinėje	33
20 pav. Ant RAMPS 1.4 plokštės nurodyta vieta LCD ekranui	33
21 pav. „Arduin“ parinktys	34
22 pav. Termistoriaus įvedimas į kodą	35
23 pav. „Pronterface“ programos aplinka	35
24 pav. Creality 3D CR-10/CR-10S kaitinimo elementas ir termistorius surinkta kaitinimo bloke	36
25 pav. „Pronterface" programos nustatymų langas	36
26 pav. Kaitinimo elemento X temperatūros priklausomybė laike	37
27 pav. Surinktas Mosquito® 12V 50W Heater kaitinimo elementas kaitinimo bloke	37
28 pav. Mosquito® 12V 50W Heater temperatūros priklausomybė per 10 sekundžių	38
29 pav. Surinktas Bondtech HeatLink 12v 50W Heater kaitinimo elementas kaitinimo bloke	38
30 pav. Bondtech HeatLink 12v 50W Heater temperatūros priklausomybė per 10 sekundžių	39
31 pav. Termovizoriaus rodmenys ties 22°C	39
32 pav. Termovizoriaus rodmenys temperatūros generavimo metu	40
33 pav. Termovizoriaus rodmenys „Pronterface“ programoje pasiekus 450°C temperatūra	40
34 pav. Termovizoriaus rodmenys „Pronterface“ programoje pasiekus 450°C temperatūra ir kaitinimo bloką pasukus, kad būtų matomas tiesiogiai kaitinimo elemento galas	41
35 pav. Mechaniniai judesio sustojimo sensoriai	41
36 pav. „Marlin“ kodo judesio sustojimo sensorių suaktyvinimo eilutės	41
37 pav. Mechaninių sensorių loginis suaktyvinimas	42
38 pav. Mechaninių sensorių jungimas RAMPS 1.4 plokštėje	42
39 pav. Mechaninių sensorių jungimas į RAMPS 1.4 plokštę. Nurodytos trys naudojamos minimalios reikšmės jungtys	42
40 pav. Duotos komandos spausdintuvui rezultatų pateikimas komandų lange	43
41 pav. Kaitinimo platformos kalibravimo taškai	44
42 pav. Mechaninių sensorių pritvirtinimas konstrukcijoje	45

43 pav. „Simplify3D“ programoje duodama komanda spausdintuvui atlikti judesį iki nulinių taškų	45
44 pav. Standartinė Marlin kodo ašių judėjimo vertė milimetrais	46
45 pav. „Simplyify3D“ programoje užduodamos komandos atlikti ašims judesį po 100 mm	46
46 pav. Kairėje nurodyta X ir Y ašių skaičiuoklė [21], dešinėje Z ašių skaičiuoklė [22].....	46
47 pav. „Simplify3D“ programoje užduodama komanda išstumti 10 mm medžiagos	47
48 pav. Sukalibruotos motorų žingsnių vertės	47
49 pav. X ašies mechaninio matavimo sensoriaus įtvirtinimas.....	48
50 pav. X ašies judesio matavimo rezultatai	48
51 pav. Y ašies mechaninio matavimo sensoriaus tvirtinimo vietos pažymėtos raudonais x simboliais	49
52 pav. Y ašies judesio matavimo rezultatai	49
53 pav. Z ašies mechaninio matavimo sensoriaus įtvirtinimas	50
54 pav. Z ašies judesio matavimo rezultatai	50
55 pav. Stalo ir kojų sujungimas	52
56 pav. Izoliacinės medžiagos ir stiklo įstatymas į konstrukciją	52
57 pav. Pilnai surinkta gaubto konstrukcija	53
58 pav. Bandinys, skirtas spausdinti PLA.....	53
59 pav. PLA atspausdintas bandinys.....	54
60 pav. Atspausdinto bandinio iš PLA matavimas	54
61 pav. Pilnai surinktas spausdintuvas su gaubtu paruoštas PEI spausdinimui	54
62 pav. PEI spausdinimas	55
63 pav. Atspausdinta PEI detalė ir išmatuoti jos matmenys	55
64 pav. „Craftcloud3d“ svetainės PEI medžiagos kainynas 35 x 20 x 2 mm detalei	59

Įvadas

Šiame technologijų amžiuje, kuomet žmonija yra pratusi prie vis greitesnio ir geresnio jų poreikių patenkinimo, mokslininkai, technologai ir inžinieriai yra priversti kasdien ieškoti sprendimų, kaip tai pasiekti. Technologijos, kurios prieš dešimtmetį atrodė kaip didžiausia naujovė, šiai dienai yra savaime suprantamos ir kasdien naudojamos daugelyje skirtingų sričių. Viena naujovių – 3D spausdinimas. Pristatyta kaip inovatyvi, greitesnė ir mažiau tarši gamybos technologija, adityvioji gamyba greitai atrado savo vartotoją ir buvo pradėta naudoti skirtingose pramonėse, o vėliau pasiekė ir eilinio vartotojo namus. Vienas 3D spausdinimo privalumų – galimybė naudoti įvairiausias žaliavas, taip išplečiant šios technologijos panaudojimą nuo mados, aviacijos iki medicinos ar kosmoso pramonės.

3D spausdinimo sąvoka suprantama kaip trimačio, vientiso, praktiškai bet kokios formos objekto gaminimo procesas iš skaitmeninio modelio. 3D spausdinimo principas – skirtingomis formomis sudedami sluoksniai. Tai yra laikoma vienu iš tiksliausių ir greičiausių įvairių detalių, specifinių elementų ar junginių kūrimo būdų. Adityvioji gamyba plačiai paplitusi prototipų ar smulkia serijinėje gamyboje. Šis gamybos būdas padeda sutaupyti labai daug laiko, kadangi nėra reikalingi jokie brėžiniai ar papildomi darbininkai, kurie atlieka įvairias operacijas prie staklių. Susiprojektavus 3D modelį, išsaugojus failą .stl formatu ir pasinaudojus tam tikromis programomis gaunamas reikiamas G kodas, kurį nuskaito spausdintuvas. Labiausiai paplitęs 3D spausdinimo būdas – lydžiosios masės modeliavimas (FDM). Šis spausdinimo tipas yra pats paprasčiausias savo veikimo principu – medžiagos ritė eina per stipriai įkaitintą medžiagos purkštuką, o ašinių judesių pagalba yra formuojamas reikiamas objektas. FDM tipo spausdintuvams galima pritaikyti beveik visas spausdinti įmanomas medžiagas, nuo paprasčiausių plastikų iki betono namams statyti.

Aukštatemperatūriai polimerai – tai įvairiose pramonės šakose metalą keičiančios medžiagos, kurias galima naudoti kaip prototipus ar tam tikros paskirties detales. Šių plastikų didžiausias privalumas – atsparumas didelei temperatūrai. Kai kurie šių inžinerinių plastikų yra praktiškai nedegūs, todėl dažnai naudojami kosmoso ar aviacijos pramonėse. Taip pat šie inžineriniai polimerai turi geras mechanines ir chemines savybes. Nors šių polimerų kaina yra ženkliai didesnė lyginant su metalu, tačiau 3D spausdinimo pagalba galima gauti norimą ir reikiamą detalę, kas, šiuo atveju, su metalu būtų ženkliai sunkiau ir, atsižvelgiant į įrangos kainą, skirtą metalo spausdinimui, brangiau. Aukštatemperatūrinių polimerų spausdinimas nėra naujiena pasaulyje, tačiau tikrai nėra dažnai sutinkamas procesas. Norint atlikti spausdinimą reikia, kad visi spausdintuve esantys komponentai galėtų veikti prie 100°C ar net aukštesnės temperatūros, o dažnu atveju prie tokių temperatūrų pačio proceso tikslumas yra sunkiai išlaikomas.

Darbo tikslas: Praktiškai nustatyti aukštatemperatūrinių polimerų 3D spausdinimo galimybes modifikuojant lydžios masės formavimo spausdintuvą.

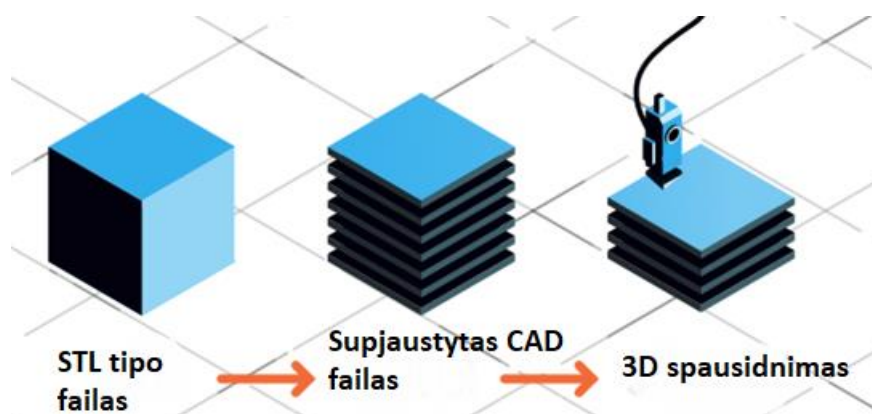
Uždaviniai:

1. Išanalizuoti jau esamų ir naudojamų 3D spausdintuvų parametrus, konstrukciją skirtus aukštatemperatūriams polimerams spausdinti.
2. Išnagrinėti moksliniuose straipsniuose atliktų bandymų su PEI polimeru spausdinimo parametrus.
3. Praktiškai atlikti PEI polimero spausdinimą su surinkta kaitinimo galva.
4. Atlikti surinkto spausdintuvo ašinių judėjimo tikslumo tyrimą.
5. Įvertinti ekonomiškai spausdintuvo savikainą bei spausdinimo proceso kainą naudojant PEI.

1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje bus apžvelgiamos aukštatemperatūrio polimero ir 3D spausdinimo technologijos sąvokos, nagrinėjami rinkoje taikomi 3D spausdintuvai ir analizuojamos jų konstrukcijos bei PEI polimero spausdinimo proceso analizė įvairiuose literatūriniuose šaltiniuose.

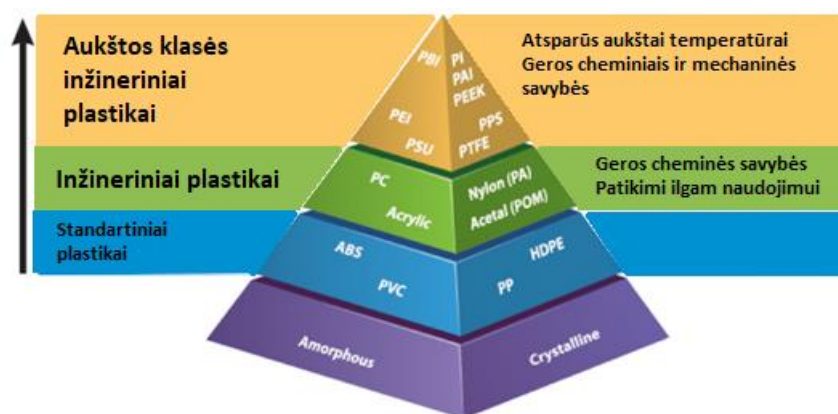
3D spausdinimo technologija sparčiai vystėsi per pastaruosius dvidešimt metų ir įrodė esanti technikos alternatyva, galinti pakeisti daugelio pramonės šakų gamybos procesus. Šios technologijos pritaikymas apima ne vieną sritį: medicina, aviacija, automobilių, kosmoso, statybų ar net mados pramonės. 3D spausdinimas dar vadinamas adityviaja gamyba – šį terminą galima suprasti kaip technologiją, kurios metu objektai yra kuriami nuoseklaus sluoksniavimo principu. Naudojant 3D spausdinimą pirmasis etapas yra norimo atspausdinti objekto suprojektavimas pasinaudojant kompiuterinio projektavimo (CAD) programine įranga. Rečiau sutinkama alternatyva – 3D skanavimas, kuris atliekamas specialiais tam skirtais skaitytuvais. Sudaryti objektai transformuojami į STL tipo failus, kurie 3D spausdintuve yra nuskaitomi kaip horizontaliais sluoksniais supjaustytas CAD failas. Daugybė horizontalių skersinių sluoksnių yra sujungiami arba sulydomi tam, kad būtų sugeneruojama galutinė norima objekto forma [1]. 1 paveiksle pavaizduota vaizdinė 3D proceso schema.



1 pav. 3D spausdinimo procesas [2]

Adityviają gamybą galima taikyti įvairiuose gamybos etapuose, pavyzdžiui, kurti prototipus prieš gamybinėje stadijoje. Pasinaudojus 3D spausdinimu greitai ir nebrangiai pagaminami reikiami prototipai – tam nereikalingos didelės investicijos ar sudėtingi įrankiai, o rezultatai leidžia įvertinti norimos detalės funkcionalumą. Taip pat, 3D spausdinimas naudojamas vystant vienetinę ar mažų apimčių serijinę gamybą – tai ženkliai pigesnė alternatyva lyginant su liejimu ar aliuminio išspaudimu, kuomet papildomi kaštai reikalingi liejimo formų pasiruošimui. Galiausiai, adityvioji gamyba gali būti naudinga ir po gamybinėje stadijoje, pagal poreikį norint atlikti papildomus apdirbimus.

Paprasčiausias aukštatemperatūrinių polimerų apibūdinimas skambėtų kaip plastiko, kuris yra atsparus sąlyginai aukštai temperatūrai. Polimerai, kurie lydosi prie didesnės nei 250°C temperatūros yra laikomi aukštatemperatūriais. Šių polimerų populiarumas ženkliai išaugo dėl sėkmingo jų panaudojimo 3D spausdinime. Pagrindė to priežastis – tinkamos cheminės ir mechaninės savybės, kurias galima pritaikyti skirtingose pramonės srityse, gaminant prototipus ar kitokias nedideles detales. 2 paveiksle pateikta polimerų piramidė, kurios viršūnėje nurodyti pagrindiniai aukštatemperatūriai polimerai, tokie kaip PEEK, PEI, PBI, PTFE ir kiti [3].



2 pav. Polimerų piramidė pagal savybes [3]

Piramidėje išskiriamos dvi rūšys: kristaliniai ir nekristaliniai (neturintys kristalinės sandaros) polimerai. Taip pat piramidėje polimerai suskirstyti į tris skiltis: standartinius plastikus, inžinerinius plastikus ir sudėtingesnius inžinerinius polimerus.

1.1. Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo spausdintuvai

Aukštatemperatūriams polimerams skirti 3D spausdintuvai nėra nauji rinka, tačiau tai dar nėra iki galo išvystyta technologija. Lietuvoje sunku rasti tokios technologijos pavyzdžių. Pagrindinė priežastis – sudėtingesnių procesų valdymo poreikis arba didesnės investicijos į pačio spausdintuvo konstrukciją. Šiame poskyryje pateikiama detalesnė pardavinėjamų pilnai sukomplektuotų 3D spausdintuvų, skirtų aukštatemperatūrių polimerų spausdinimui, analizė.

Pirmasis spausdintuvas yra „Vision Miner“ gamintojų sukurtas „22 IDEX“, kuris pavaizduotas 3 paveiksle. Amerikoje įsikūrusi kompanija sukūrė FDM/FFF tipo spausdintuvą, galintį spausdinti ne vieną aukštatemperatūrių polimerą. Visi pagrindiniai šio spausdintuvo parametrai pateikti 1 lentelėje.



3 pav. „22IDEX“ 3D spausdintuvas [4]

1 lentelė. „22IDEX“ 3D spausdintuvo parametrai [4]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuko parametrai	500°C (Dvigubas ekstruderis) Grūdinto plieno purkštukas kurio diametras yra 0,4 mm. Gamintojas taip pat siūlo galimybę integruotą purkštuko diametro variacijoms nuo 0,2 mm iki 1,2 mm (kas 0,2 mm) arba pasirinkti kitą medžiagą kaip žalvarinį ar nikeluotą varinį purkštuką
--	--

Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	200°C Grūdintas stiklas. Gamintojas taip pat siūlo atsparų aukštai temperatūrai anglies pluošto ar PEEK+CF kompozito kaitinimo platformas.
Spausdinimo erdvės temperatūra	Su integruota papildymo šildymo sistema pasiekia 90°C
Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	Cura; Simplify3D; Slic3r;
Gabaritai ir svoris	580 x 560 x 740 mm; Svoris: 73 kg;
Spausdinimo ribos	350 x 350 x 450 mm;
Galimos medžiagos	Reikalingas ritės storis – 1,75 mm. Medžiagos: PEEK, PEI, PEI mišiniai, PPSU, PA/CF, Nailono mišiniai (PA66, PA6, PA12, t.t.), PC, PC lydiniai, PA, ABS, ASA, Nailonas, PETG, ESD medžiagos, HIPS, TPU, PLA, PVA, ir daug kitų.
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	Spausdinimo maksimalus greitis galimas 500 mm/s, tačiau stabilus yra 300 mm/s. Naudojami HIWIN linijiniai bėgiai atsparūs aukštomis temperatūroms, 12 mm Kevlar diržai, žingsniniai varikliai ir trys Z ašies motorai.
Kaina	9600 \$
Tikslumas	X/Y ašimis: 10 μm Z ašimi: 7 μm

Detaliau panagrinėjus „22IDEX“ 3D spausdintuvą, matome, kad ekstruderio maksimali įsikaitinimo temperatūra yra 500°C. Svarbu paminėti, kad šis spausdintuvas turi dvi tokias spausdinimo galvas, kurios suteikia galimybę vienu metu spausdinti kelias detales. Gamintojai teigia, jog su dviejų ekstrudierių technologija, galima spausdinti vienodas ar net skirtingas detales, tokiu būdu darbo atlikimo procesą pagreitinant dvigubai. Kitas išskirtinis šio spausdintuvo bruožas – trys Z ašies motorai, dėl kurių kaitinimo platformą galima laikyti ne vien tik horizontaliai, tačiau tokiu kampu, kokio reikia spausdinimo procese. Ši technologija yra visiškai naujovė, kuria siekiama pagreitinti visą spausdinimo procesą bei, žinoma, dar labiau padidinti spausdinamų detalių kokybę. Turbūt svarbiausias „22IDEX“ spausdintuvo privalumas – išskirtinai didelis spektras medžiagų, kurias galima naudoti gamyboje. Gamintojų teigimu, įrenginys taip pat gali būti naudojamas su skirtingų gamintojų medžiagomis – tokiu būdu dar labiau padidinat jo galimybes ir universalumą bei suteikiant pasirinkimo galimybę vartotojui. Svarbu atkreipti dėmesį į maksimalų galimą „22IDEX“ spausdinimo greitį – net 500 mm/s, kai dažniau 3D entuziasto namuose sutinkami „Creality Ender 3“ ar „Prusa Mini“ pasiekia tik 200 mm/s greitį [5]. Tokio pasiekiamo greičio dėka „22IDEX“ spausdintuvas visą procesą gali atlikti ženkliai greičiau. Atsižvelgiant į visus spausdintuvo parametrus, galimus procesus, įdiegtas naujas technologijas ir pasiekiamą tikslumą, kaina yra itin palanki vartotojui. Nekainuodamas nei dešimties tūkstančių dolerių „22IDEX“ suteikia plačią medžiagų paletę ir įvairovę. Apibendrinant, tai puikus pasirinkimas įmonėms prototipų gamybai, kurios gamina ne itin didelius produktus skirtingoms sąlygoms ar reikalavimams.

Kitas nagrinėjamas spausdintuvas yra to paties gamintojo „Vision Miner“ 2015 metais sukurtas „AON-M2“. Tai yra pramoninis 3D spausdintuvas, galintis pagaminti aukščiausios kokybės detales iš termoplastiko. Pačio spausdintuvo nuotrauka pateikta 4 paveiksle. Šis įrenginys yra MEX/FFF tipo spausdintuvas, turintis du ekstrudierius. Visi pagrindiniai šio spausdintuvo parametrai pateikti 2 lentelėje.



4 pav. „AON-M2“ spausdintuvas [6]

2 lentelė. „AON-M2“ spausdintuvo parametrai [6]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuvo parametrai	500°C (Dvigubas ekstruderis) Grūdinto plieno purkštukas kurio diametras yra 0,6 mm. Taip galima integruotą purkštuko diametro variaciją nuo 0,2 mm iki 1,2 mm (kas 0,2 mm, bet yra išskirta ir tikslesni 0,25 mm ir 0,3 mm variantai)
Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	200°C Platformos medžiagos: PEKK, CF PEEK, PEI, PC, PPSU. Taip pat gamintojas prideda ir aliuminio platformą.
Spausdinimo erdvės temperatūra	Su integruota papildymo šildymo sistema pasieka 135°C
Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	Ultimaker Cura; Program Codes; Simplify3D;
Gabaritai ir svoris	1450 x 955x 1150 mm;
Spausdinimo ribos	450 x 450 x 640 mm;
Galimos medžiagos	Reikalingas ritės storis – 1,75 mm. ABS, ASA, Nylon (PA 6, 6/66, 12), PAEK, PC, PEEK, PEI (ULTEM™ 9085, 1010), PEKK, PETG, POM, PP, PPSU, PSU, PVDF, TPE, TPU.
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	Maksimalus spausdinimo greitis yra 500 mm/s.
Kaina	50 000 \$
Tikslumas	X/Y ašimi: 25 μm Z ašimi: 1 μm

Lyginant du „Vision Miner“ gamintojų spausdintuvus „22IDEX“ ir „AON-M2“ matome, kad jie turi didelių skirtumų. Pirmasis, ir labiausiai krentantis į akį, yra kaina – „AON-M2“ spausdintuvas yra daugiau kaip 40 tūkstančių dolerių brangesnis. Žinoma, „AON-M2“ dėl kainos turi atitinkamų privalumų lyginant su „22IDEX“ spausdintuvu: „AON-M2“ gali spausdinti net 10 centimetrų ilgesnes ir platesnes bei 20 centimetrų aukštesnes detales. Taip pat matome 45°C skirtumą „AON-M2“ naudai spausdinimo erdvės temperatūros parametre, kas leidžia spausdinti kokybiškiau ir

tiksliau storesnių sienų bei didesnių gabaritų prototipus. Greičiausiai pagrindinis „AON-M2“ privalumas – didelis spausdinimo tikslumas Z ašimi, kuris siekia net 1 mikroną. Tai yra itin preciziška, turint omenyje, kad šis įrenginys gali atspausdinti didesnes nei pusės metro detales. „AON-M2“ spausdintuvas turi du ekstruderius, kurie gali įkaisti iki 500°C temperatūros – tai leidžia spausdinti didelį ir skirtingą kiekį medžiagų, tarp kurių yra ir aukštatemperatūriai polimerai. Reiktų pabrėžti tai, kad abu nagrinėti „Vision Miner“ spausdintuvai gali spausdinti dideliu greičiu ir norimą rezultatą pasiekti sparčiau. Apibendrinant, tarp dviejų amerikiečių sukurtų spausdintuvų geriau būtų rinktis „22IDEX“ 3D spausdintuvą. Palyginus tiek „AON-M2“, tiek „22IDEX“ spausdintuvus nėra itin ryškaus skirtumo tarp šių spausdintuvų, išskyrus kainą ir tikslumą. Vis dėlto, norint preciziškesnio spausdintuvo reikalingos didesnės investicijos, kaip šiuo atveju yra ir su „Vision Miner“ gamintojų spausdintuvais.

Toliau analizuojami „INTAMSYS“ įmonės du 3D spausdintuvai. „INTAMSYS“ yra Kinijos įmonė, įsikūrusi Šanchajuje, kuri yra pasaulyje pirmaujanti aukštųjų technologijų gigantė, teikianti 3D spausdinimo ir adityviosios gamybos sprendimus aukštos kokybės medžiagoms. Didžiausią dėmesį skirdama aviacijos ir kosmoso, automobilių, gamybos, plataus vartojimo prekių, sveikatos priežiūros, tyrimų ir kitoms pramonės šakoms, bendrovė teikia visapusiškus adityviosios gamybos sprendimus nuo funkcinių bandymų prototipų kūrimo, įrankių ir armatūros gamybos iki tiesioginės masinės galutinių produktų gamybos, apimančios įrangą, programinę įrangą, aukštos kokybės medžiagas ir spausdinimo paslaugas. Pirmasis spausdintuvas yra „FUNMAT PRO 610HT“. Tai FDM/FFF tipo spausdintuvas, turintis du spausdinimo purkštukus, nuolatinę 300°C temperatūros spausdinimo patalpą ir galimybę spausdinti visomis ašimis daugiau kaip pusės metro atstumu. Pats spausdintuvas pavaizduotas 5 paveiksle. Visi pagrindiniai šio spausdintuvo parametrai pateikti 3 lentelėje.



5 pav. „FUNMAT PRO 610HT“ 3D spausdintuvas [7]

3 lentelė. „FUNMAT PRO 610HT“ 3D spausdintuvo parametrai [7]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuvo parametrai	500°C (Dvigubas ekstruderis) Galimybė keisti purkštuko diametrus: 0,25 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, 1,2 mm;
--	---

Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	300°C Vakuuminė sistema, kuri pritraukia detalę prie platformos.
Spausdinimo erdvės temperatūra	Nuolatinė 300°C erdvės temperatūra
Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	Priima visu .SLT ar .OBJ formato failus
Gabaritai ir svoris	720 x 670 x 1460 mm;
Spausdinimo ribos	610 × 508 × 508 mm;
Galimos medžiagos	Reikalingas ritės storis – 1,75 mm arba 2,85 mm. PEEK, PEEK+CF, PEKK, ULTEM (PEI), PPSU, PC, PC lydiniai, PA, PA+CF, ABS, anglies pluoštas, stiklo pluoštas, ASA, HIPS ir PVA.
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	Spausdinimo greitis nuo 30-300 mm/s. Aukšto tikslumo servo varikliai.
Kaina	150 000 \$
Tikslumas	X/Y ašimi: 12 μm Z ašimi: 7 μm Minimalus galimas sluoksnio storis 50 μm.

Detaliau panagrinėjus „FUNMAT PRO 610HT“ matome kelis stipriai į akį krentantčius parametrus – spausdinimo ribos, kaina, temperatūros bei tikslumas. Šio įrenginio spausdinimo tūris iš ties įspūdingas – visomis kryptimis galima spausdinti didesnes kaip pusės metro detales. Efektyvi temperatūros sistema leidžia platų medžiagų pasirinkimą. Tikriausiai kertinis šio spausdintuvo privalumas, tai itin tikslus ir ypatingai pačių gamintojų pabrėžiamas minimalus galimas sluoksnio storis. Turint omenyje, kad spausdintuvas geba spausdinti didesnes kaip pusės metro detales, 50 mikronų tikslumas sluoksnio atžvilgiu yra itin preciziška. Taip pat gamintojai specifikacijų apraše mini, kad pačiame spausdintuve yra integruotos automatinė purkštukų valymo, medžiagos klaidos, vandens ir oro vėsinimo, apsauginė perkaitimo ir esant galios praradimui – galios atnaujinimo sistemos. Visus šiuos privalumus ir itin gerus parametrus atspindi kaina, kuri yra 150000 JAV dolerių.

Kitas Kinijos gamintojų nagrinėjamas spausdintuvas yra „FUNMAT HT“. Šis įrenginys yra FDM/FFF tipo, nebrangus, didelio našumo 3D spausdintuvas, kurio tūris yra 260 x 260 x 260 mm. Juo puikiai galima atlikti pramoninės kokybės spausdinimo procesą. „FUNMAT HT“ gerai dirba su įvairiais aukštos kokybės termoplastikais, tokiais kaip PEEK, ULTEM, PEI ir PPSU. Mašina taip pat gali spausdinti tvirtus prototipus, pasižyminčius išskirtiniu cheminiu ir karščio atsparumu. Tai puikus sprendimas mažoms įmonėms, siekiančioms gaminti ilgaamžius pramoninius gaminius automobilių, medicinos, aviacijos arba itin chemiškai atsparias dalis naftos pramonėms. Jis taip pat gali būti naudojamas gaminant įvairias patvarias ir lengvas dalis, priedus, prototipus ir daug daugiau. Pačio spausdintuvo nuotrauka nurodyta 6 paveiksle. Visi pagrindiniai šio spausdintuvo parametrai pateikti 4 lentelėje.



6 pav. „FUNMAT HT“ 3D spausdintuvas [8]

4 lentelė. „FUNMAT HT“ 3D spausdintuvo parametrai [8]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuvo parametrai	450°C Galimybė keisti purkštuko diametrus: 0,1 mm, 0,25 mm, 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, 1,2 mm;
Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	160°C Kaitinamasis PI lakštas arba keramikinis stiklas.
Spausdinimo erdvės temperatūra	90°C
Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	Priima visu .SLT ar .OBJ formato failus
Gabaritai ir svoris	530 x 490 x 645 mm;
Spausdinimo ribos	260 × 260 × 260 mm;
Galimos medžiagos	Reikalingas ritės storis – 1,75 mm; PEEK, PEEK+CF, PEKK, ULTEM (PEI), PPSU, PC, PC lydiniai, PA, PA+CF, ABS, anglies pluoštas, stiklo pluoštas, ASA, HIPS, PVA ir kitas
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	Maksimalus spausdinimo greitis 300 mm/s. Aukšto tikslumo nepriklausomos pavaros.
Kaina	7500 \$
Tikslumas	X/Y ašimi: 12,25 μm Z ašimi: 1,25 μm Minimalus galimas sluoksnio storis 50 μm.

Detaliau panagrinėjus „FUNMAT HT“ spausdintuvą yra matomas vienas pagrindinių spausdintuvo plusų – kaina. Tik už 7500 dolerių sumą galima gauti geros kokybės spausdintuvą. Jei lygintume to paties gamintojo du spausdintuvus, „FUNMAT PRO 610HT“ ir „FUNMAT HT“, matome, kad skirtumų nėra tiek daug. Abejų spausdintuvų išgaunamas tikslumas ir medžiagų galimybės sutampa, nors ekstruderio temperatūra skiriasi per 50°C. Ryškiausi skirtumai yra spausdinimo ribos ir kaitinimo platformos temperatūra. „FUNMAT HT“ gali spausdinti tik iki 260 mm dydžio gaminius,

o kaitinimo platformos temperatūra skiriasi beveik per pusę. Taip pat tai yra pirmasis nagrinėtas spausdintuvas, turintis tik vieną ekstruderį. Kita vertus, šis spausdintuvas yra puikus pasirinkimas, norint spausdinti aukštos kokybės prototipus, nes tai yra aukštos kokybės ir itin nedidelės kainos derinys.

Dar vienas nagrinėjamas didelių spausdinimo gabaritų įrenginys yra „ARGO 500“. Tai italų įmonės „Roboze“ produktas, kurie save pristato kaip gaminančius vienus tiksliausių spausdintuvų pasaulyje, gebančių dirbti su aukščiausios kokybės medžiagomis. Pats „ARGO 500“ pavaizduotas 7 paveiksle, jo parametrai pateikti 5 lentelėje.



7 pav. „ARGO 500“ 3D spausdintuvas [9]

5 lentelė. „ARGO 500“ 3D spausdintuvo parametrai [9]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuko parametrai	550°C. Purkštuko diametras – 0,4 mm;
Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	300°C (naudojamas šiluminis spinduliavimas)
Spausdinimo erdvės temperatūra	180°C
Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	Priima visu .SLT ar .OBJ formato failus, tačiau gamintojas rekomenduoja naudoti Smplyfy3D programinę įrangą generuojant G kodus.
Gabaritai ir svoris	1935 x 1436 x 2375 mm; 1500kg
Spausdinimo ribos	500 x 500 x 500 mm;
Galimos medžiagos	PEEK, Anglinis PEEK, ULTEM™ AM9085F, Anglinis PA, Flex-TPU, PP, nailonas, sustiprintas-ABS, ULTRA-PLA, ABS-ESD, Helios™PEEK 2005;
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	40-80 mm/s. Apie judėjimo mechanizmus informaciją nepateikiama
Kaina	175 000 \$
Tikslumas	10 μm Z ašies kryptimi

„ARGO 500“ yra FDM/FFF 3D spausdinimo technologijos tipo įrenginys, galintis spausdinti su įvairiomis medžiagomis. Pagrindinis aspektas, kuriuo šis spausdintuvas gali didžiuotis – spausdinimo kokybė. Pasiekiamas itin didelis tikslumas, turint omenyje tai, kad „ARGO 500“ turi galimybę spausdinti net iki pusės metro detales. Dėl pasiekiamos kokybės šis spausdintuvas gali tarnauti kaip prototipų gamintojas tokiose srityse kaip aviacija, automobilių sportas, automatika, dujų ir naftos pramonės. Nagrinėjant panašių tipų spausdintuvus matome, kad „ARGO 500“ turi tik vieną ekstruderį, nors panašių kainų spausdintuvai gali pasigirti dvejais. Šis spausdintuvas neturi didelių išskirtinimų lyginant su kitais, tačiau gali pasiūlyti kokybišką spausdinimo procesą ir galimybę pasiekti aukščiausią tikslumą.

Kol kas didžiausią įspūdį keliantis 3D spausdintuvas yra tos pačios italų įmonės „Roboze“ sukurtas „ARGO 1000“, Pavadinimas leidžia spręsti, kad su šiuo spausdintuvu galima gaminti detales net iki vieno metro. Pačio spausdintuvo nuotrauka pavaizduota 8 paveiksle.



8 pav. „ARGO 1000“ 3D spaudintuvas [10]

„ARGO 1000“ yra didžiausias pasaulyje 3D spausdintuvas su šildoma kamera, skirta greitai pagaminti neįtikėtinai stiprias polimerines ir kompozitines dalis. „ARGO 1000“, galima teigti, pradeda išskirtinai didelių prototipų gamybos erą. Jis komplektuojamas su dvejais aukštos temperatūros ekstruderiais, kurie leidžia spausdinti su tokiomis medžiagomis kaip PEEK, PEI, anglinis PEEK ar PA mišiniais, ULTEM AM9085F ir daugeliais kitų. Vartotojai taip pat turės galimybę apdoroti tirpias ir atskiriamas pagalbines spausdinimo dalis. Pasak „Roboze“, sistemos proceso valdymas yra panašus į CNC apdirbimo ir liejimo įpurškimą, o tai, kaip pranešama, siūlo 99,96 % detalių pakartojamumą. „ARGO 1000“ taip pat veikia pagal įmonės patentuotą pavaru (be diržo) technologiją, kuri gali lemti šešis kartus tikslesnes dalis nei įprastų, diržu varomų 3D spausdintuvų, kurių valdymo tikslumas yra iki 10 mikronų [10]. „Roboze“ taip pat nusprendė įdiegti automatinį kaitinimo platformos ir purkštukų kalibravimą bei medžiagų valdymo sistemą pačios mašinos viduje. Vienu metu talpinant iki 8 kg gijų, „ARGO 1000“ gali automatiškai persijungti ritės spausdinimo viduryje ir netgi turi medžiagų džiovavimo ir išankstinio pašildymo funkciją. Kalbant apie programinę įrangą, 3D spausdintuvas turi ir nuotolinės diagnostikos priemones, ir nuspėjamą priežiūrą. Kiekviena dalis yra sertifikuota naudojant spausdinimo žurnalo sistemą, kuri padeda stebėti visus konstrukcijos parametrus. Galiausiai, „ARGO 1000“ taip pat puikiai sąveikauja su gamybos ERP sistemomis, leidžiančiomis nuotoliniu būdu stebėti ir valdyti spausdinimą. Apie „ARGO 1000“ spausdintuvo detalesnius parametrus tikslesnės informacijos nėra pateikta, pavyzdžiui, ekstruderio temperatūrą ar medžiagą, kaitinimo platformos tipą, medžiagas ar temperatūras, kaitinimo erdvės

temperatūrą bei tipą. Taip yra todėl, nes nurodyta, jog spausdintuvas bus išleistas 2022 metais. Kalbant apie kainą, tai nėra stebėtina, jog ji iš kol kas nagrinėtų spausdintuvų yra rekordinė – 450000 \$. Apibendrinant galima teigti, jog yra labai reali galimybė, kad šis spausdintuvas gali tapti naujos adityviosios gamybos eros pradžia.

Kitas nagrinėjamas 3D spausdintuvas yra Lenkijos įmonės „3DGence“ sukurtas „F421“. Šis spausdintuvas yra pramoninis aukštos temperatūros 3D spausdintuvas, galintis spausdinti aukščiausios kokybės polimerus, tokius kaip ULTEM™ ir PEEK. Spausdintuvo „F421“ vaizdas pateiktas 9 paveiksle, jo parametrai pateikti 6 lentelėje.



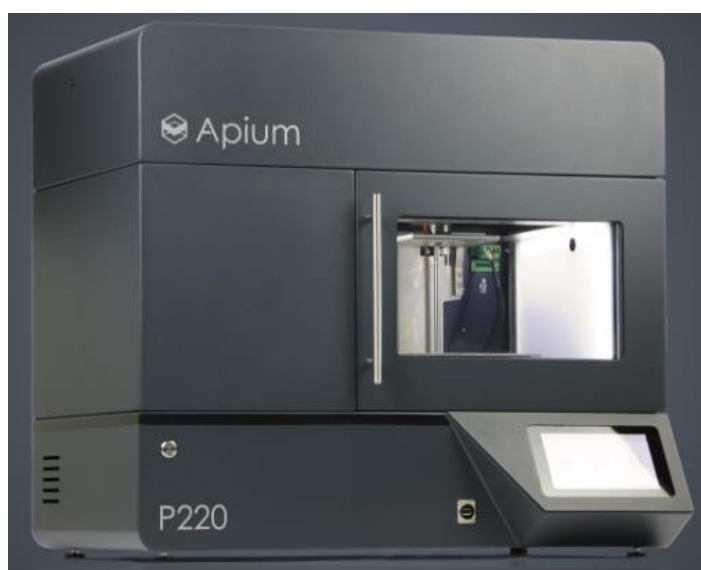
9 pav. „F421“ 3D spausdintuvas [11]

6 lentelė. „F421“ 3D spausdintuvo parametrai [11]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuvo parametrai	500°C (Dvigubas ekstruderis) su integruota purkštukų valymo sistema; Gamintojas purkštuko matmenys pateikia 0,5 mm arba 0,4 mm;
Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	180°C, borosilikatinis stiklas;
Spausdinimo erdvės temperatūra	180°C. Integruotas medžiagos ričių laikymo erdvės šildymas, kur ritės šildomos 50°C temperatūroje.
Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	3DGence SLICER 4.0
Gabaritai ir svoris	Gabaritai: 1900 × 940 × 900 mm; Svoris: 365 kg;
Spausdinimo ribos	380 × 380 × 420 mm;
Galimos medžiagos	Paduodamos medžiagos storis: 1,75 mm; Medžiagos: PEEK, PEKK, VICTREX AM™ 200, ULTEM™;
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	Spausdinimo greitis: iki 400 mm/s; Pats ekstruderis gali judėti 1000 mm/s greičiu.
Kaina	50 000 \$
Tikslumas	Minimalus sluoksnio aukštis: 50 μm su gamintojų deklaruojama 0,000 paklaida;

„F421“ yra FFF tipo spausdintuvas, kurio pagrindinis aspektas yra greitis. Įrenginio spausdinimo greitis iki 400 mm/s ir viso ekstruderio judėjimas 1 metro per sekundę greičiu daro „F421“ puikiu įrankiu. Tai patogi mašina greitam prototipų kūrimui, bet kartu ir visavertė adityviosios gamybos sistema. Pakankamai dideli spausdinimo erdvės gabaritai leidžia spausdinti įvairaus dydžio ar net po kelis mažesnius prototipus vienu metu. Dėl šildomos medžiagų laikymo kameros medžiagos laikomos stabilioje aplinkoje. Kameroje yra keturi medžiagų skyriai: du, skirti modelio medžiagoms, ir du, formuojantys pagalbines detalės dalis. Kuomet medžiaga baigiasi, ji ekstruderyje yra automatiškai pakeičiama. „3DGence“ didžiuojasi tuo, kad „F421“ filtravimo sistema siūlo precedento neturintį filtravimo efektyvumą tarp FFF adityviosios gamybos platformų, galinčių filtruoti makro dulkes, nano dulkes (LOJ, UFP), tirpiklio garus, kenksmingas dujas bei pašalines daleles. Apibendrinant, Lenkijoje sukurtas spausdintuvas „F421“ pasiekia stulbinančiai aukštą greitį. Negana to, atlikdamas spausdinimo procesą, jis išlaiko ir aukštą detalių kokybę bei tikslumą. Atsižvelgiant į kainą, tai puikus variantas turint poreikį prototipų ar kitokių detalių greitai gamybai, be to gamintojai užtikrina įvairiausių saugumo reikalavimus su įdiegtomis sistemomis.

Dar vienas nagrinėjamas spausdintuvas yra vokiečių įmonės „Apium“ sukurtas „P220“. Bendrovė prisistato kaip viena pirmųjų, pradėjusių pardavinėti PEEK medžiagai spausdinti tinkamą 3D įrenginį. „P220“ yra pramoninis 3D spausdintuvas, skirtas atlikti aukščiausios kokybės spausdinimo procesą, naudojant aukštatemperatūrius polimerus, tokius kaip PEEK, PEKK, PEI, CFR PEEK. Pats spausdintuvas pavaizduotas 10 paveiksle, o nagrinėjami parametrai pateikti 7 lentelėje.



10 pav. „P220“ 3D spausdintuvas [12]

7 lentelė. „P220“ 3D spausdintuvo parametrai [12]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuvo parametrai	540°C Purkštuko diametro variacija galima nuo 0,2 mm iki 0,8 mm; Keičiamas metalinis purkštukas;
Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	160°C Platformos medžiaga: borosilikatinis stiklas;
Spausdinimo erdvės temperatūra	180°C

Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	–
Gabaritai ir svoris	850 x 685 x 675 mm, 65 kg;
Spausdinimo ribos	205 x 155 x 150 mm
Galimos medžiagos	CFR PEEK, PEEK, PEI 9085, PVDF, POM-C ESD;
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	Pramoninio lygio judesio komponentai, skirti tikslumui, patikimumui ir stabiliam procesui;
Kaina	29 000 \$
Tikslumas	Galiams sluoksnio storis: nuo 0,05 mm iki 0,6 mm;

Nagrinėjant „P220“ 3D spausdintuvo parametrus buvo rastas ribotas kiekis informacijos, tačiau 7 lentelėje pateikta pakankamai parametrų, jog būtų galima paanalizuoti šį spausdintuvą. Pirmasis dalykas, patraukiantis dėmesį, yra galima net 540°C ekstruderio temperatūra. Reikia pabrėžti, kad „P220“ spausdintuvas turi tik vieną spausdinimo galvą, todėl tikėtina, kad pasiekti tokią temperatūrą yra paprasčiau nei tai būdavo anksčiau nagrinėtuose spausdintuvuose. Iš spausdinimo erdvės parametrų matome, kad galimi spausdinti prototipai, palyginus su jau nagrinėtais spausdintuvais, yra itin nedideli. Žinoma, mažų apimčių detalėms reikalingas didelis tikslumas, ką „P220“ gali ir pasiūlyti. Apibendrinant, tai puikus variantas spausdinant nedidelių gabaritų prototipus, nes kaina, sprendžiant iš parametrų, atitinka teikiamas įrenginio galimybes, tačiau atsiradus poreikiui spausdinti bent kažkiek didesnes detales bus susiduriama su problemomis.

Kitas nagrinėjamas 3D spausdintuvas Kinijos įmonės „CreatBot“ sukurtas „PEEK-300“. Spausdintuvo pavadinimas leidžia suprasti, jog jis yra pritaikytas spausdinti PEEK ir kitas aukštatemperatūros medžiagas. Pačio spausdintuvo vaizdas pateiktas 11 paveiksle, o spausdintuvo parametrai pateikti 8 lentelėje.



11 pav. „PEEK-300“ 3D spausdintuvas [13]

8 lentelė. „PEEK-300“ 3D spausdintuvo parametrai [13]

Ekstruderio temperatūra ir purkštuvo parametrai	500°C (Dvigubas ekstruderis) Purkštuko diametras 0,4 mm (galimybė rinktis 0,3~1,0 mm dydžio purkštukus);
Kaitinimo platformos temperatūra ir medžiaga	200°C Kaitinimo platformos medžiaga – anglies pluošto lakštas;
Spausdinimo erdvės temperatūra	120°C
Suderintos su spausdintuvu G kodų generavimo programos	Creatware, Simplify3D, Cura, Slic3r; Spausdintuvui prieinami failų formatai: STL, OBJ, AMF, Gcode;
Gabaritai ir svoris	650 x 600 x 750 mm, 100 kg;
Spausdinimo ribos	Spausdinimo metu naudojant vieną ekstruderį: 300 x 300 x 400 mm; Spausdinimo metu naudojant du ekstruderius: 240 x 300 x 400 mm;
Galimos medžiagos	PEEK,CF-PEEK, GF-PEEK, PEKK, UltraPA, UltraPA-GF, UltraPA-CF, PPSU, PEI(ULTEM), PLA, ABS, ASA, PC, Nylon, PETG, PVDF,TPU, anglies pluoštas;
Judėjimo sistema ir spausdinimo greitis	Spausdinimo greitis 10-120 mm/s; Aukštai temperatūrai atsparūs varikliai, linijiniai bėgiai, diržai ir grandinės, užtikrinančios ilgalaikį aukštoje temperatūroje spausdinimą.
Kaina	14 000 \$
Tikslumas	X ir Y ašimis 0,0127 mm, Z ašimi 0,00125 mm;

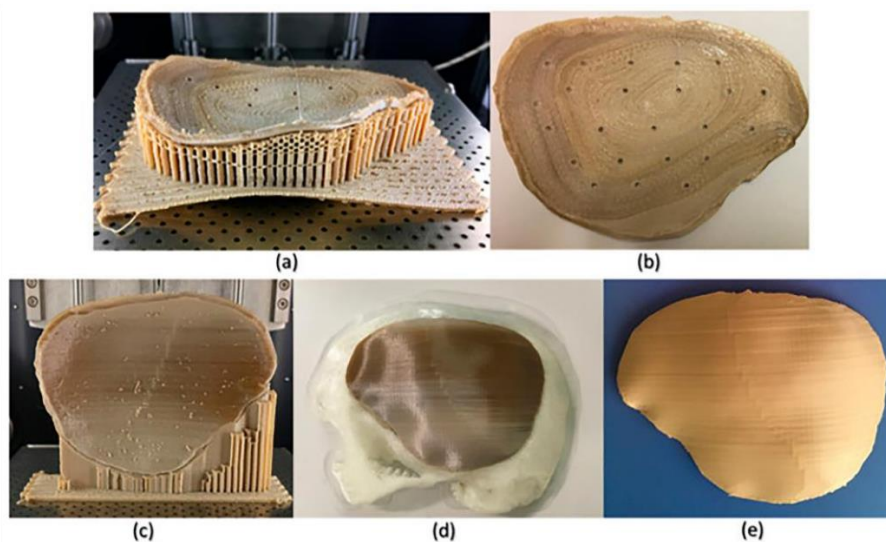
„PEEK-300“ yra pripažintas kaip geriausias 2022 metų spausdintuvas, skirtas spausdinti PEEK medžiagą, o tokį pripažinimą suteikė „ANIWAA“, kuri save pristato kaip įmonę, konsultuojančią adityviosios gamybos klausimais. Vienas didžiausių šio spausdintuvų pasiekimų yra tiesioginė atkaitinimo sistema, paremta pirmąją pasaulyje ir nepaprasta „CreatBot“ technologija. Atkaitinimo procesas yra akimirksniu valdomas spausdinant. Juo siekiama pateikti aukščiausios kokybės dalis vienu metu be deformacijos ir įtrūkimų, kuomet yra spausdinamos didelių matmenų detalės. Tiesioginio atkaitinimo sistema turi tris pagrindinius privalumus: nereikia jokio papildomo detalės apdorojimo kaitinimo krosnyje; sistema taikoma ne baigtam atspausdintam modeliui, o diegiama viso spausdinimo proceso metu visai vidinei struktūrai; galima temperatūros variacija svyruoja nuo 0 iki 200°C, ją pritaikant kiekvienai skirtingai medžiagai ir norimam detalės stiprumui. Taip pat šiame spausdintuve integruota ir vėsinimo sistema, kurią sudaro skysčio ir oro sistemos. Reiktų atkreipti dėmesį į pasiekiamą tikslumą, kuris yra itin preciziškas visomis ašimis. Vienintelis trūkumas, lyginant su kitais jau nagrinėtais 3D spausdintuvais, tai pakankamai lėtas spausdinimo greitis, kuris, norint atspausdinti didesnę kiekį prototipų, taptų bėda. Apibendrinant, šis spausdintuvas yra puikus variantas, kuomet reikia atspausdinti aukščiausios kokybės detales, o pačio įrenginio kaina tikrai nėra didelė.

Apibendrinant 3D spausdintuvus, skirtus aukštatemperatūriams polimerams spausdinti, galima teigti, kad jų kaina yra ganėtinai didelė, kuri gali siekti net iki 170 000 eurų, tačiau spausdintuvai geba pasiekti aukštą tikslumą. Didžioji dalis spausdintuvų jau yra su dviem spausdinimo galvomis, kurios sumažina spausdinimo laiką. Nors pramoniniai aukštatemperatūrių polimerų spausdintuvai nėra naujiena, tačiau yra retai naudojami dėl didelės jų kainos.

1.2. Aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo proceso techniniai parametrai

Šiame poskyryje bus nagrinėjama aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo proceso techniniai parametrai atliktuose tyrimuose ir eksperimentuose, detaliau apžvelgiama, kokie konkrečiai pasirenkami 3D spausdintuvo nustatymai, kaip sudaromas spausdinimo failas bei kaip pritaikomi įvairūs G kodo programos generavimo nustatymai.

Pirmasis nagrinėjamas tyrimas yra Hamptono universiteto tyrėjų atliktas tyrimas apie 3D PEEK medžiagos spausdinimą naudojant FDM/FFF tipo spausdintuvą. Darbo autoriai Rupakas Dua (angl. *Rupak Dua*), Zurė Rashad (angl. *Zuri Rashad*), Džojus Spirsas (angl. *Joe Spears*), Greicė Dan (angl. *Grace Dunn*) ir Mikeila Maksvel (angl. *Micaela Maxwell*) savo darbe „3D spausdinto PEEK taikymas naudojant lydytų gijų gamybą: sisteminė apžvalga“ (angl. „*Applications of 3D-Printed PEEK via Fused Filament Fabrication: A Systematic Review*“) siekia apžvelgti pagrindines PEEK naudojimo sritis, naudingas medžiagos savybes bei detaliau nagrinėja 3D atspausdintą gomurikaulio implantą, padedantį koreguoti naujagimių išsigimimus. Darbe yra aprašoma, jog buvo nagrinėta, kaip 3D spausdintuvu atspausdinto implanto galutinis rezultatas priklauso nuo spausdinamo sluoksnio storio, detalės medžiagos užpildymo procento ir išorinio sluoksnio kontūro. Spausdinimo rezultatai parodė, kad daugiausiai įtakos matmenų nuokrypiams turėjo medžiagos užpildymo pasirinktas raštas bei modelio orientacija ant kaitinimo platformos, kurios rezultatų variantai pateikti 12 paveiksle, kur (a) variante pateiktas horizontaliai atspausdintas kaukolės implantas, rodantis pagalbinės spausdinimo detalės deformacijos efektą; (b) variante pateiktas horizontaliai atspausdintas kaukolės implantas, turintis grubų vidinį paviršių; (c) variante pateiktas vertikaliai atspausdintas kaukolės implantas, pasižymintis skirtingu kristalizavimo lygiu; (d) variante pateiktas atspausdintas kaukolės biologinis modelis su vertikaliai atspausdintu implantu, pašalinus atraminę konstrukciją; (e) variante pateiktas atkaitintas vertikaliai atspausdintas kaukolės implantas, nepakeitęs spalvos. Mažiausiai įtakos matmenų nuokrypiams turėjo detalės medžiagos užpildymo procentas [14].

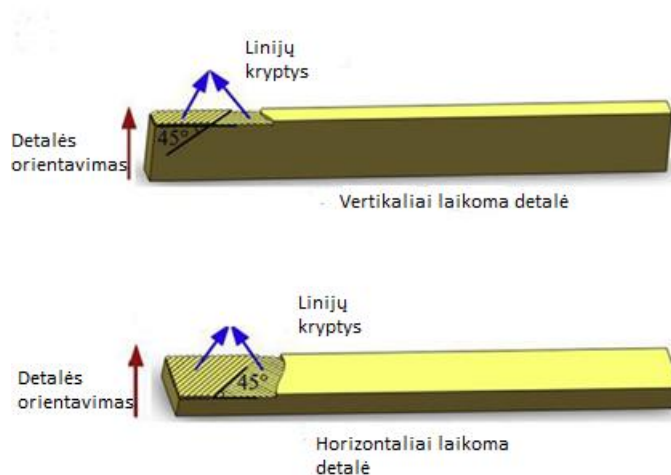


12 pav. Detalės ant kaitinimo platformos orientacijos rezultatų variantai [14]

Pagal tyrėjus optimaliausi spausdinimo parametrai PEEK medžiagai: sluoksnio storis 150 μm , detalės užpildymo procentas lygus 80 %, naudojamas tiesinis užpildo raštas, o išorinio sluoksnio kontūras lygus 2 linijoms. Darbe taip pat aprašomi ir temperatūriniai parametrai. Tyrėjams spausdinant PEEK ir hidroksiapatito kompozitą buvo nustatyta naudojama ekstruderio temperatūra, kuri buvo lygi 370°C, o spausdinimo erdvės temperatūra buvo lygi 200°C. Taip pat darbe aprašomas ir kitas

naudojamas kompozitas – PEEK ir sustiprinto anglies pluošto. Tyrėjai eksperimento metu nustatė reikiama ekstruderio temperatūra, kuri lygi 420°C, o pasirinktas spausdinimo greitis lygus 40 mm/s. Kompozitų spausdinimo rezultatai atskleidė, kad PEEK ir sustiprinto anglies pluošto kompozitas turėjo žymiai geresnį atsparumą tempimui ir lenkimui nei PEEK [14].

Antrasis nagrinėjamas tyrimas yra Šandongo universiteto tyrėjų. Tyrėjai S. Dingas (angl. *Ding*), B. Žu (angl. *Zou*), P. Vangas (angl. *Wang*) ir H. Dingas (angl. *Ding*) savo tyrime „Purkštuko temperatūros ir kaitinimo platformos orientacijos poveikis PEEK ir PEI mechaninėms savybėms ir mikrostruktūrai, atspausdintiems 3D-FDM technologija“ (angl. „*Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM*“) atlieka dviejų aukštatemperatūrių medžiagų PEEK ir PEI analizę keičiant temperatūrą, prie kurios medžiagos yra spausdinamos, bei keičiant bandinių orientavimą ant kaitinimo platformos. Tyrėjai bandymuose naudojo tokius nustatymus: ekstruderio temperatūra nuo 360°C iki 420°C, didinat po 10°C; kaitinimo platformos temperatūra spausdinant PEEK medžiaga buvo lygi 270°C, o spausdinant PEI – 210°C; purkštuko diametras lygus 0,4 mm; sluoksnio storis lygus 0,2 mm; spausdinimo greitis 20 mm/s; pilnas bandinio užpildymas sluoksniais dedant 45° kampu bei nurodant programoje, jog kiekvienas sluoksnis dedamas pasukant į skirtingas puses. Vizualus bandinių orientavimas ant kaitinimo platformos pateiktas 13 paveiksle [15].

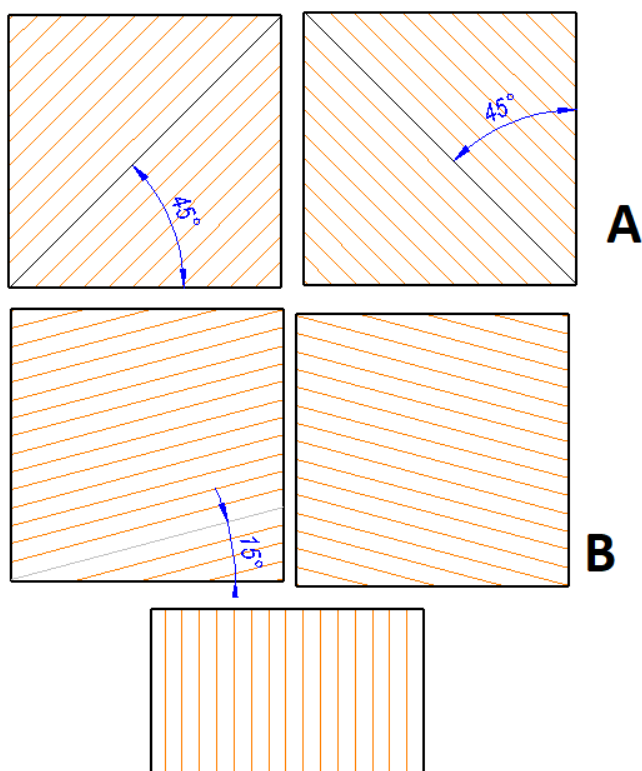


13 pav. Bandinių orientavimas ir užpildymo linijų kryptis [15]

Tyrėjai atlikus eksperimentą pateikia rezultatus ir išvadas, kurios teigia, kad didinant spausdinimo temperatūrą tiek PEEK, tiek PEI tankis padidėja, nes didesnėje temperatūroje oras, patenkantis spausdinimo metu tarp sluoksnių, daro mažiau įtakos, nes būna karštesnis. Orientavimas ant platformos kiekvienai medžiagai turi skirtingą poveikį: PEEK geriau atlaiko apkrovas, kai yra orientuojama horizontaliai ant kaitinimo platformos. Kalbant apie PEI, ši medžiaga yra ženkliai trapesnė nei PEEK, todėl tyrėjai išvadose mini, jog iš atlikto eksperimento rezultatų pateikti rekomendacijų apie PEI orientavimą negali [15].

Trečiasis analizuojamas tyrimas yra Euromed Fezo universiteto (UEMF) tyrėjų atliktas darbas apie PEEK ir PEI medžiagų paruošimą bei jų spausdinimą. Tyrėjai Anvar El Mažri (angl. *Anouar El Magri*), Kalilas El Mabrukiras (angl. *Khalil El Mabroukir*) ir Sebastianas Vaudrevilas (angl. *Sebastien Vaudreuil*) savo darbe „Poli(eterio, eterio ketono)/poli(eterio, imido) [PEEK/PEI] mišinių, skirtų lydytų gijų gamybai, paruošimas ir charakterizavimas“ (angl. „*Preparation and characterization of poly(ether, ether ketone)/poly(ether, imide) [PEEK/PEI] blends for fused filament*

fabrication“) nurodo naudojamus 3D spausdinimo parametrus nagrinėjamiems aukštatemperatūrems medžiagoms. Darbe pateikiami šie parametrai: ekstrudero temperatūra nuo 370°C iki 420°C, didinant po 10°C; spausdinimo greitis 30 mm/s; kaitinimo platformos temperatūra 100°C; spausdinimo erdvės temperatūra 30°C; 100 % bandinio užpildymas sluoksniais dedant 45° kampu bei nurodant programoje, jog kiekvienas sluoksnis dedamas pasukant į skirtingas puses (A variantas 14 paveiksle) arba 100 % bandinio užpildymas, varijuojant trimis skirtingais variantais per 15°, kur kiekviename sluoksnyje yra skirtingas būdas (B variantas 14 paveiksle); purkštuko diametras 0,4 mm [16]. Tyrėjai darbe nurodo, kad naudojo 1.1 skyriuje nagrinėtą 3D spausdintuvą „FUNMAT HT“, kurio parametrai yra pateikti 4 lentelėje.



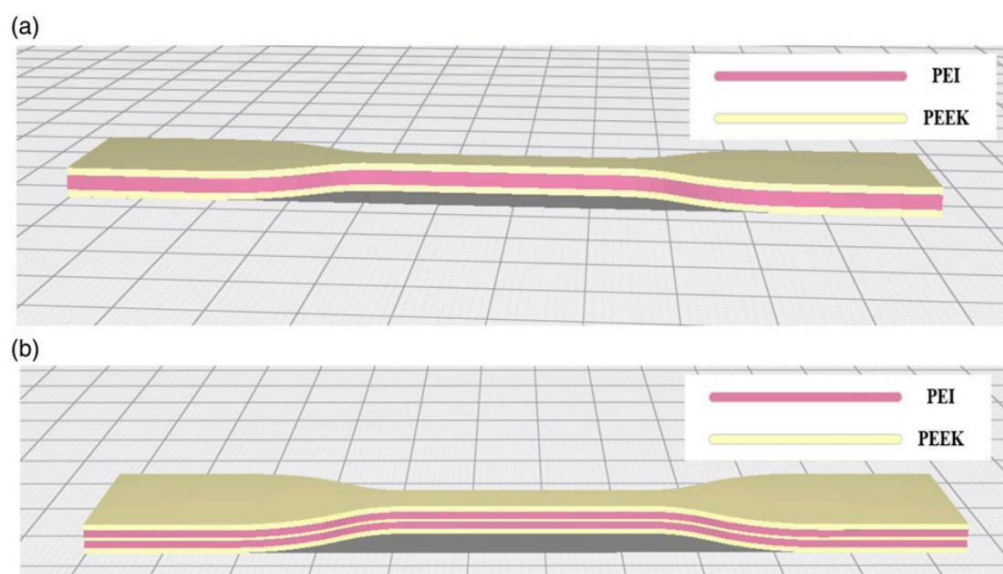
14 pav. Detalių orientavimo vizualus paaiškinimas

Darbo išvadose pateikiamos nagrinėtos atspausdintų bandinių savybės kintant temperatūrai ar keičiant užpildo tipą. Darbo autoriai optimaliausių spausdinimo parametrų spausdinti tiek PEEK, tiek PEI medžiagas nenurodo. Vis dėlto, tyrėjai savo darbe mini, kad pagal jų atliktą literatūrinę analizę optimaliausia aukštatemperatūros medžiagas spausdinti yra tuomet, kai ekstrudero temperatūra lygi 400°C, spausdinimo greitis lygus 30 mm/s, sluoksnio storis yra 0,15 mm, o užpildas yra maksimalus ir linijos kinta pakrypusios po 15°, taip kaip nurodyta 14 paveikslėlyje B variante [16].

Tyrėjai iš Daliano technologijų universiteto atliko panašų tyrimą, kur naudojamas tas pats „FUNMAT HT“ spausdintuvas. Darbo autoriai Veidži Li (angl. *Weijie Li*), Lina Sang (angl. *Lin Sang*), Ksigao Džianas (angl. *Xigao Jian*) ir Džinijan Vang (angl. *Jinyan Wang*) savo atliktame tyrime „Šlifavimo ir plazminio apdorojimo įtaka 3D spausdintų PEI, PEEK ir PEEK/CF šlyties sukibimo stiprumui“ (angl. *„Influence of sanding and plasma treatment on shear bond strength of 3D-printed PEI, PEEK and PEEK/CF“*) taip pat nurodo darbo metu naudotus spausdinimo parametrus. Straipsnyje minima, kad PEI medžiagai parinkta ekstrudero temperatūra lygi 365°C, kaitinimo platformos temperatūra lygi 160°C, o spausdinimo erdvės temperatūra lygi 80°C. PEEK medžiagai pasirinktos reikšmės yra: ekstrudero temperatūra 420°C, kaitinimo platformos temperatūra 110°C, spausdinimo erdvės

temperatūra 70°C. Taip pat darbe nurodomi ir kiti parametrai, tokie kaip purkštuko diametras, kuris lygus 0,4 mm, sluoksnio storis – 0,2 mm, spausdinimo greitis – 20 mm/s, pilnas detalės užpildymas naudojant 45° kampu išdėstytas linijas, kurios pavaizduotos 13 paveiksle A variante. Darbo rezultatuose tyrėjai pateikia gautus rezultatus atlikus tyrimus su bandiniais [17].

Kitas analizuotas tyrimas – Daliano jūrų universiteto tyrėjų atliktas darbas „Eksperimentinis PEEK-PEI sumuštinio konstrukcijų, pagamintų lydytų gijų metodu, tempimo savybių tyrimas“ (angl. „*An experimental investigation on the tensile properties of PEEK-PEI sandwich structures prepared via fused filament fabrication*“) nagrinėjant PEEK ir PEI bandinių tempimo atsparumą. Eksperimentas įdomus tuo, kad bandiniai yra ne iš vienos medžiagos, o sumuštinio principo – medžiagos yra keičiamos kas sluoksnį. Naudojami bandiniai pavaizduoti 15 paveiksle [18].



15 pav. PEEK ir PEI bandinių sluoksniavimas [18]

Pavaizduotame 15 paveiksle (a) variante bandinys sudarytas iš vieno PEI sluoksnio ir dviejų PEEK sluoksnių išorėje, o (b) variante visą bandinį sudaro jau penki sluoksniai, kur PEI yra du sluoksniai, o PEEK jau trys.

Tyrėjai Zihaugas Vangas (angl. *Zhaogui Wang*), Čiuzengas Jinas (angl. *Xiuzeng Yin*) ir Lihanas Vangas (angl. *Lihan Wang*) savo darbe pateikia naudojamus spausdinimo parametrus. PEEK sluoksniui naudojami spausdinimo parametrai: ekstrudero temperatūra 410°C, kaitinimo platformos temperatūra 160°C, spausdinimo erdvės temperatūra 90°C, 100 % bandinio užpildymas, naudojant 45° užpildymo raštą linijomis, spausdinimo greitis 40 mm/s, purkštuko diametras 0,4 mm, sluoksnio storis 0,2 mm. PEI sluoksniui naudojami šie spausdinimo parametrai: ekstrudero temperatūra 380°C, kaitinimo platformos temperatūra 160°C, spausdinimo erdvės temperatūra 90°C, 100 % bandinio užpildymas, naudojant 45° užpildymo raštą linijomis, spausdinimo greitis 60 mm/s, purkštuko diametras 0,4 mm, sluoksnio storis 0,2 mm. Matome, kad tarp medžiagų spausdinimo parametrų yra skirtumas tik ekstrudero temperatūros ir spausdinimo greičio vertėse. Darbe taip pat nurodoma, kad naudojamas „FUNMAT Pro 410“ 3D spausdintuvas, o G kodai generuojami su „IntamSuite 3.5.3“ programa. Darbo rezultatuose tyrėjai pateikia, kurie bandiniai turi geresnes ar blogesnes mechanines savybes bei atkreipia dėmesį paviršiaus kokybę [18].

Dar vienas nagrinėjamas mokslinis straipsnis – Kinijos mokslininkų atliktas tyrimas apie PEEK ir anglies pluošto bei PEI ir anglies pluošto kompozitų spausdinimą. Tyrėjai Pėjus Vangas (angl. *Pei Wang*), Hongjie Džangas (angl. *Hongjie Zhang*), Vaitejus Kao (angl. *Yitao Cao*), Aigangas Panas (angl. *Aigang Pan*) ir Veičao Vu (angl. *Weichao Wu*) savo darbe „Adityviai pagamintas trumpu anglies pluoštu sustiprintas polieteterketonas, padengiant polieteterimidu sąsajoje, naudojant lydytų gijų gamybą“ (angl. „*Additively manufactured short carbon fiber reinforced polyetheretherketone by coating polyetherimide at the interface using fused filament fabrication*“) taip pat pateikia savo bandinių spausdinimo parametrus. Skirtingai nei praeituose nagrinėtuose tyrimuose, šį kartą tyrėjai nustato visiems skirtingų medžiagų bandiniams vienodus spausdinimo parametrus, kurie yra: purkštuko diametras 0,4 mm, ekstrudero temperatūra 450°C, kaitinimo platformos temperatūra 120°C, spausdinimo greitis 20 mm/s, sluoksnio storis 0,1 mm, spausdinimo erdvės temperatūra 150°C ir 100 % bandinio užpildymas, naudojant 45° užpildymo raštą linijomis. Taip pat straipsnyje minima, kad naudojamas jau anksčiau darbe nagrinėtas „CreatBot“ spausdintuvas „PEEK-300“, kurio parametrai pateikti 8 lentelėje. Darbe tyrėjai atlieka cheminius, mechaninius bei terminius bandymus ir pateikia rezultatus [19].

Paskutinis nagrinėjamas tyrimas buvo atliktas Portugalijos tyrėjų. Straipsnio autoriai Tijagas Dominikesas (angl. *Tiago Domingues*), Antonijus Kašasas (angl. *António Cachaço*), Pedras J. Susas (angl. *Pedro J. Sousa*), Fernandas Karneiras (angl. *Fernando Carneiro*), Džobas Silva (angl. *Job Silva*), Šajanas Eslamis (angl. *Shayan Eslami*) bei Pedras M. G. P. Moreira (angl. *Pedro M. G. P. Moreira*) savo darbe „Pasirinktinės sąrankos, skirtos aukštos kokybės termoplastikų adityviajai gamybai, kūrimas“ (angl. „*Development of a custom setup for additive manufacturing of high-performance thermoplastics*“) atlieka tyrimą, kuriame bando spausdinti aukštatemperatūrius polimerus ir pateikia naudojamus 3D spausdinimo parametrus. Tyrėjai pateikia, kad jų PEEK ir PEI medžiagos yra gautos iš „3D4Makers“ gamintojo. Taip pat, straipsnyje yra nurodoma, kad naudojamas 3D spausdintuvas yra „CubeX“, tačiau šio spausdintuvo pagrindinis trūkumas, kad jo kaitinimo elementas gali pasiekti tik 280°C temperatūrą. Kita šio įrenginio problema – spausdintuvo kaitinimo platforma nėra kaitinama ir nėra jokios uždaros erdvės, kurioje būtų galima palaikyti aukštą temperatūrą. Tyrėjai šias problemas išsprendė išgydami „Titan Aqua“ ekstruderį, „E3D“ kaitinimo platformą ir sudarė 800 x 800 x 750 mm gaubtą iš aliuminio. Siekiant mažesnio šilumos pralaidumo, sienos buvo padengtos putų polistirenu. Gaubtas taip pat turėjo duris, kurios buvo padarytos iš 2 mm polikarbonato lakštų [20]. Sukonstruoto gaubto nuotrauka pavaizduota 16 paveiksle.



16 pav. Tyrėjų sukonstruotas gaubtas [20]

Naudojami pagrindiniai parametrai PEEK medžiagai spausdinti: ekstruderio temperatūra 380°C, kaitinimo platformos temperatūra 155°C, spausdinimo erdvės temperatūra 100°C. Taip pat nurodoma, kad spausdinamos detalės perimetro spausdinimo greitis yra 20 mm/s, o vidinės detalės dalies spausdinimo greitis 10 mm/s. Naudojamas 10 % detalės užpildymas, tačiau keturi pirmi ir paskutiniai sluoksniai yra pilnai užpildyti. Atitinkamai pateikiami spausdinimo parametrai ir PEI medžiagai: ekstruderio temperatūra 370°C, kaitinimo platformos temperatūra 200°C, spausdinimo erdvės temperatūra 100°C. Taip pat nurodoma, kad spausdinamos detalės perimetro spausdinimo greitis yra 30 mm/s, o vidinės detalės dalies spausdinimo greitis 30 mm/s. Naudojamas 10 % detalės užpildymas, tačiau keturi pirmi ir paskutiniai sluoksniai yra pilnai užpildyti. Tyrėjai nurodo, jog buvo spausdinamos 20 x 20 x 20 mm detalės. Darbo autoriai rezultatuose pateikia atspausdintų detalių kokybę nagrinėdami matmenų deviaciją [20].

Apibendrinant aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdinimo procesų techninius parametrus, galima teigti, kad naudojama kaitinimo elemento temperatūra prasideda nuo 370°C, o kaitinimo platformos temperatūra yra nuo 120°C iki 200°C intervale. Naudojamas spausdinimo greitis nėra didelis, apie 20-30 mm/s. Nagrinėtuose moksliniuose straipsniuose naudojami FDM tipo spausdintuvai ir be išimties visi jie yra su integruotu gaubtu.

2. Darbo metodinė dalis

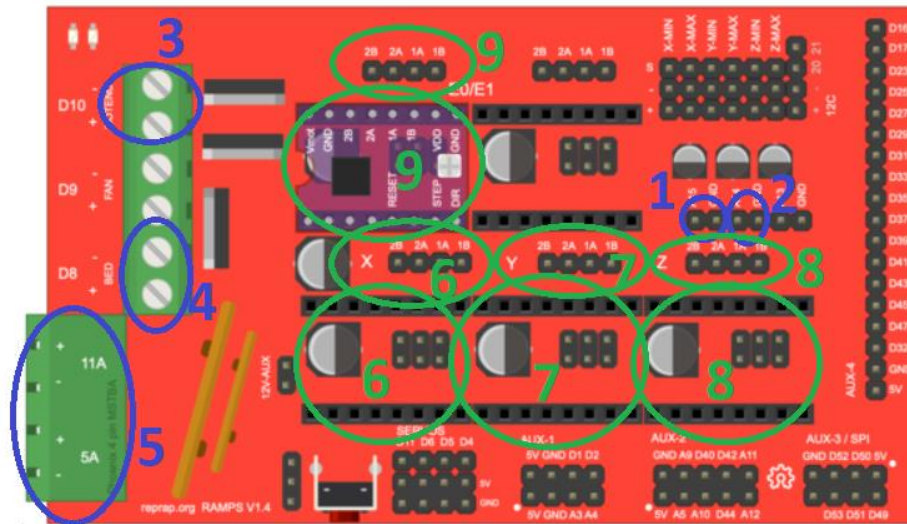
Šiame skyriuje nurodomos visos darbo priemonės, programos, skirtos tyrimo atlikimui, bei viso tyrimo darbo eiga.

Naudojamos darbo priemonės:

- 1) Aliuminio profilio surinkta konstrukcija su kreipiančiosiomis, skirtomis Z ašies judesiui, bei kaitinimo platformos (X ašies) judesiui;
- 2) Kaitinimo bloko termistorius;
- 3) Kaitinimo platformos termistorius;
- 4) Kaitinimo elementas, skirtas kaitinimo blokui;
- 5) Kaitinimo elementas, skirtas kaitinimo platformai;
- 6) Maitinimo šaltinis;
- 7) 5 servo varikliai;
- 8) Du diržai, skirti ašių judėjimui (diržinės pavaros);
- 9) LCD ekranas;
- 10) RAMPS 1.4 plokštė, Arduino Mega 2560 plokštė;
- 11) PEI medžiagos ritė;

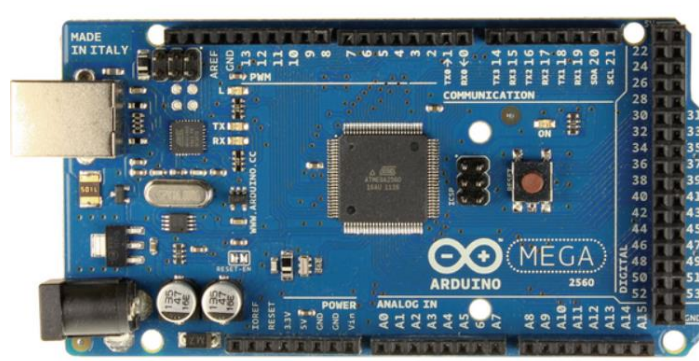
PEI – politeterimidais yra amorfinis aukštatemperatūris polimeras, pasižymintis geromis mechaninėmis savybėmis, plačiausiai naudojamas kosmoso ir aviacijos pramonėse. Pagrindinis šio polimero privalumas – jis beveik nėra degus. Dažnu atveju šis polimeras naudojamas kaip metalo alternatyva, kur reikia gerų mechaninių savybių, panašių į metalą, ir yra aktualus nedidelis detalės svoris.

Pirmiausia, įdiegiama „Arduino“ programa. Šiuo atveju naudojama naujausia galima „Arduino“ programos versija – Arduino IDE 2.0.1. Vėliau atsiunčiama „Marlin“ programinė įranga, kurią sudaro keturi kodai: Marlin.ino; Configuration.h; Configuration_adv.h; Version.h. Turint visas reikiamas programas kompiuteryje, toliau atliekami mikroschemų sujungimų su atitinkamomis jungtimis darbai. Pateiktame 17 paveiksle nurodytos vietos, kur koks komponentas turi būti jungiamas. Komponentai jungiami ant RAMPS 1.4 plokštės. Pati Arduino Mega 2560 plokštė pateikiama 18 paveiksle.



17 pav. RAMPS 1.4 plokštės sujungimas su nurodytomis vietomis

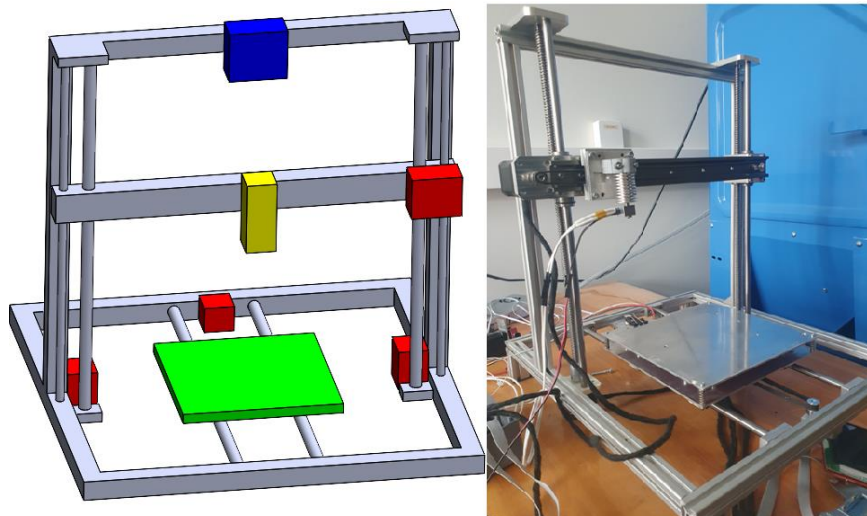
Pirmuoju numeriu nurodytoje vietoje jungiamas ekstruderio termistorius, kuris yra atsakingas už temperatūros stebėjimą kaitinimo bloke. Antruoju numeriu nurodytoje vietoje jungiamas kaitinimo plokštės termistorius, kuris yra atsakingas už kaitinimo plokštės temperatūros stebėjimą. Trečiuoju numeriu nurodytoje vietoje jungiamas kaitinimo elementas, kuris generuoja temperatūrą kaitinimo bloke. Ketvirtuoju numeriu nurodytoje vietoje jungiamas kaitinimo elementas, kuris generuoja temperatūrą ant kaitinimo platformos. Penktuoju numeriu nurodytoje vietoje jungiamas maitinimo šaltinis, kuris aprūpina visą spausdintuvą energija. 17 paveiksle žaliais apskritimais pažymėtos vietos, kuriose dedamos jungtys, atsakingos už X, Y ir Z ašis. Šeštuoju numeriu pažymėtos jungtys yra atsakingos už X ašies judėjimą, septintuoju numeriu pažymėtos jungtys – už Y ašies judėjimą, o aštuntuoju numeriu pažymėtos jungtys – už Z ašies judėjimą. Taip pat devintuoju numeriu pažymėta vieta, kuri yra atsakinga už plastiko ritės judėjimą link kaitinimo bloko. Sujungus visas jungtis RAMPS 1.4 plokštė sujungiama su naudojama motinine Arduino MEGA 2560 plokšte, kuri pavaizduota 18 paveiksle.



18 pav. Arduino Mega 2560 plokštė

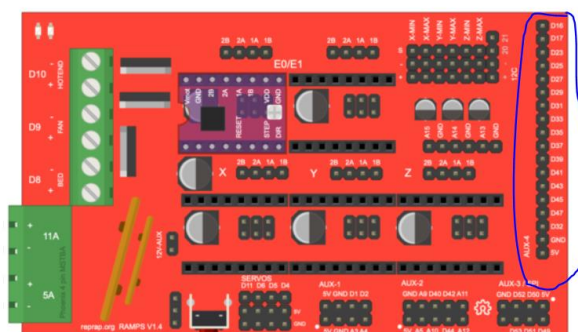
Kitas etapas – visos konstrukcijos surinkimas. Sutvirtinamas pagrindas iš aliuminio profilių, ant kreipiančiųjų įtvirtinama kaitinimo platforma. Taip pat integruojama kaitinimo bloko su radiatoriumi laikiklį ant Y ašies diržinės pavaros. Galiausiai, prijungiami visi servo varikliai. Surinkta konstrukcija pavaizduota 19 paveiksle, kuriame kairėje pusėje pavaizduota surinkto spausdintuvo schema, o dešinėje jau surinkta spausdintuvo konstrukcija. Kairiajame paveikslėlyje raudona spalva pavaizduoti

servo varikliai judesio ašims, mėlyna spalva pavaizduotas ekstruderis su integruotu servo varikliu, geltona spalva pavaizduotas kaitinimo blokas su integruotu radiatoriumi, žalia spalva pavaizduota kaitinimo platforma.



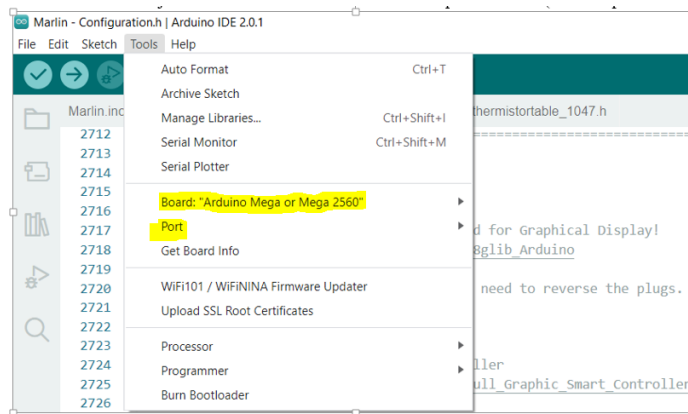
19 pav. Surinkta spausdintuvo schema kairėje ir surinkto spausdintuvio konstrukcija dešinėje

Dėl patogesnio konstrukcijos valdymo prijungiamas valdymo ekranas. Pateiktame 20 paveiksle, mėlynai apibrauktoje vietoje nurodyta, kur jungiamas naudojamas REPRAP DISCOUNT FULL GRAPHIC SMART CONTROLLER ekranas.



20 pav. Ant RAMPS 1.4 plokštės nurodyta vieta LCD ekranui

Turint visą surinktą konstrukciją ir sujungtas jungtis, per „Arduin“ programą paleidžiamas „Marlin“ kodas, prieš tai parinkus tinkamą plokštę ir naudojamą USB langą, kurių tikrinimo vieta pavaizduota 21 paveiksle.



21 pav. „Arduin“ parinktys

Parinkus tinkamą USB langą ir naudojamą motininę plokštę, sukompilijuojami failai, kurie perkeliama į naudojamą plokštę. Toliau atliekami eksperimentiniai darbai.

3. Darbo eksperimentinė dalis

Šiame skyriuje bus apžvelgiama ir nurodoma eksperimentinė dalis, atliekami skirtingi tyrimai.

3.1. Termistoriaus parinkimas

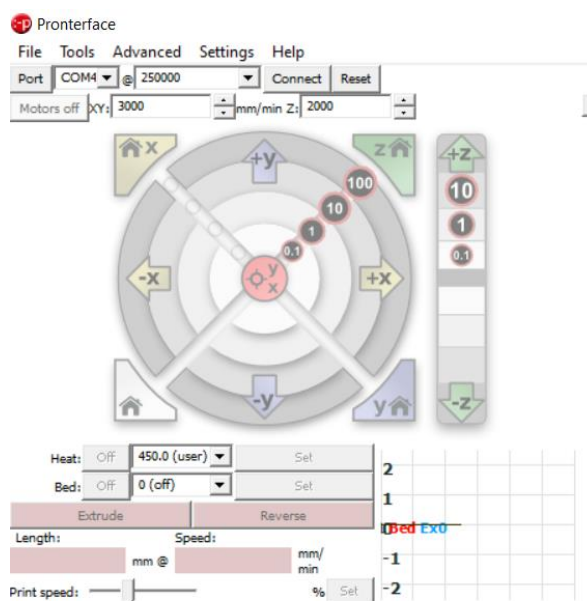
Parinkta naudojama aukštatemperatūre medžiaga yra PEI. Šis plastikas lydosi prie 340-360°C temperatūros. Standartinis „Marlin“ kode esantis termistorius EPCOS maksimaliai gali fiksuoti temperatūrą tik iki 300°C, todėl reikalingas kitas termistorius. Parenkamas naudoti PT1000 termistorius, kurio temperatūros jutiklis turi 4700 Ω varžą ir gali veikti maksimaliai iki 500°C temperatūros.

Turimame kode aprašomas naujai pasirinktas termistorius. Jis kode pateikiamas kaip vienas iš galimų variantų, todėl reikia pakeisti tik kelias eilutes, kurios nurodytos 22 paveiksle.

```
532 */
533 #define TEMP_SENSOR_0 1047
534 #define TEMP_SENSOR_1 0
535 #define TEMP_SENSOR_2 0
```

22 pav. Termistoriaus įvedimas į kodą

Į 533 eilutę įrašoma 1047 reikšmė, kuri kode suprantama kaip PT1000 termistorius. Toliau, 617 eilutėje, pateikta 275°C standartinė reikšmė pakeičiama į 485°C. Ši komanda reiškia, kad įvykus klaidai, ir kaitinimo elementui sugeneravus daugiau temperatūros negu buvo nustatyta, visas kaitinimas akimirksniu išjungiamas.



23 pav. „Pronterface“ programos aplinka

Naudojama „Pronterface“ programa, kurios aplinka pavaizduota 23 paveiksle, ir stebimas temperatūros kilimas. Programos lange matomas tinkamas temperatūros nusistovėjimas, o pats termistorius nesilydo ir nerūksta, todėl priimame, jog parinktas termistorius yra tinkamas ir atlieka savo funkcijas.

3.2. Kaitinimo elemento parinkimas

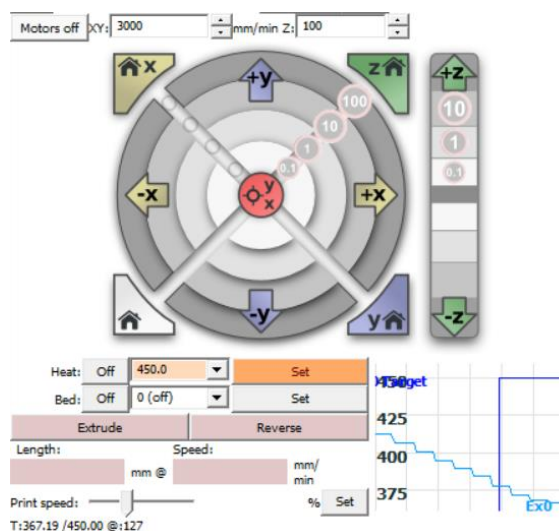
Atliekamas trijų skirtingų kaitinimo elementų norimos temperatūros nuo laiko priklausomybės tyrimas. Šio tyrimo metu nustatomas kaitinimo elementas, kuris greičiausiai padeda užkaitinti kaitinimo bloką iki norimos temperatūros. Pradinė temperatūra, nuo kurios pradedami atlikti skaičiavimai, yra kambario temperatūra, kuri lygi 22°C, o reikiama pasiekti temperatūra užduodama 450°C.

Atliekamas pirmojo Creality 3D CR-10/CR-10S kaitinimo elemento tyrimas. Pradžioje surenkamas kaitinimo blokas su naudojamu PT1000 termistoriumi ir Creality 3D CR-10/CR-10S kaitinimo elementu.



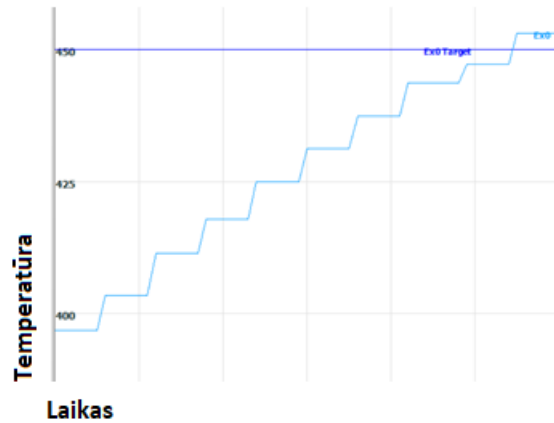
24 pav. Creality 3D CR-10/CR-10S kaitinimo elementas ir termistorius surinkta kaitinimo bloke

Užkraunamas „Marlin“ kodas *configuration.h* į naudojamas mikroschemas. Kuomet kodas yra perduotas, naudojantis „Pronterface“ programa nustatome norimą 450°C laipsnių ribą ir paleidžiame chronometrą laikui nustatyti.



25 pav. „Pronterface“ programos nustatymų langas

Praėjus 3min 20,51s gauname norimą temperatūrą. Taip pat tolygus temperatūros didėjimas kaitinimo bloke pavaizduotas 26 paveiksle. Grafike nurodytos dvi kreivės: Ex0 target – tai kreivė, kuri nurodo 450°C temperatūros ribą, ir Ex0 – tai kreivė, kuri nurodo temperatūrą realiu laiko momentu.



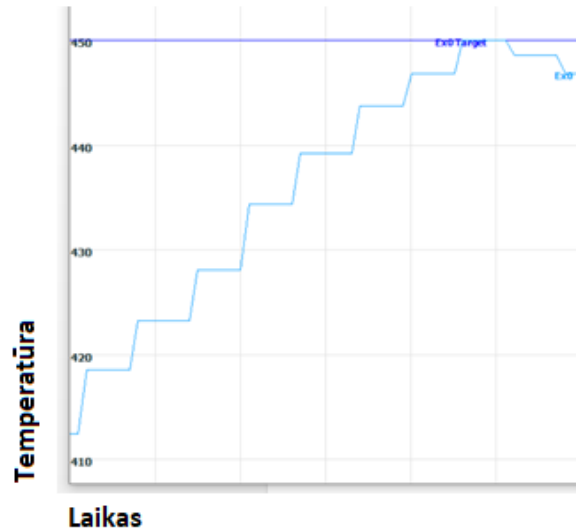
26 pav. Kaitinimo elemento X temperatūros priklausomybė laike

Antrasis tiriamas kaitinimo elementas yra Mosquito® 12V 50W Heater. Šio elemento parametrai: 12 V įtampa, 50 W galia, 22 mm ilgio kaitinimo elemento antgalio ilgis, kurio diametras yra 6 mm, užtikrinat H7 tikslumo klasę, o pačio laido ilgis lygus 1 metrui. Procesas atliekamas analogiškai, kaip su prieš tai tyrinētu kaitinimo elementu.



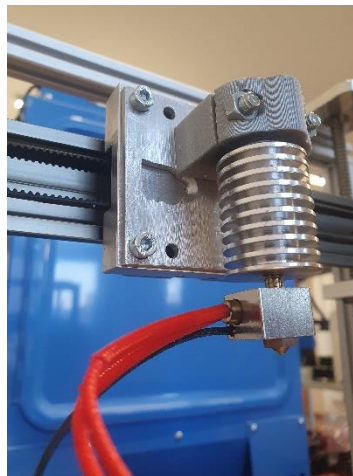
27 pav. Surinktas Mosquito® 12V 50W Heater kaitinimo elementas kaitinimo bloke

Praėjus 2min 40,05s gauname norimą temperatūrą. Šio elemento tolygus temperatūros didėjimas kaitinimo bloke pavaizduotas 28 paveiksle. Analogiškai praėjusiam tyrimui, grafike nurodytos dvi kreivės, kurių viena rodo norimą temperatūrą, o kita – atitinkamą temperatūrą tam tikru laiko momentu.



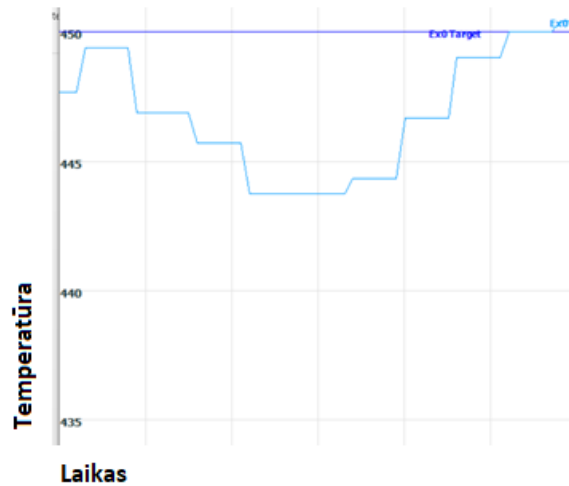
28 pav. Mosquito® 12V 50W Heater temperatūros priklausomybė per 10 sekundžių

Trečiasis tiriamas kaitinimo elementas yra Bondtech HeatLink 12v 50W Heater. Šio elemento parametrai: 12 V įtampa, 50 W galia, 6 mm diametro elemento antgalis, 1,5 m ilgio laidas su Molex micro-fit 3.0 jungikliu. Procesas atliekamas analogiškai, kaip su prieš tai tyrinėjtais kaitinimo elementais.



29 pav. Surinktas Bondtech HeatLink 12v 50W Heater kaitinimo elementas kaitinimo bloke

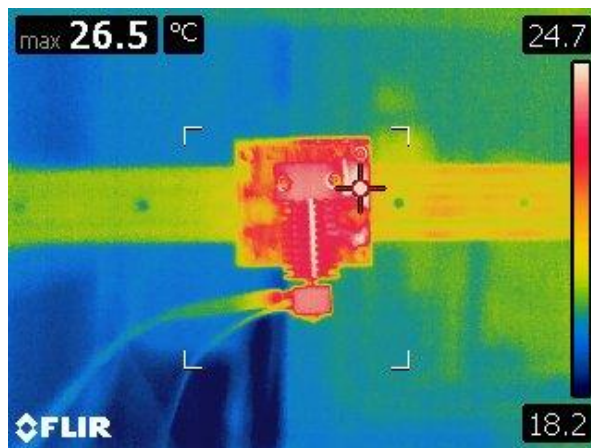
Praėjus 2min 56,35s gauname norimą temperatūrą. Šio elemento temperatūros didėjimas kaitinimo bloke pavaizduotas 30 paveiksle. Analogiškai praėjusiems bandymams, grafike nurodytos dvi kreivės, kurių viena rodo norimą temperatūrą, o kita – atitinkamą temperatūrą tam tikru laiko momentu.



30 pav. Bondtech HeatLink 12v 50W Heater temperatūros priklausomybė per 10 sekundžių

Pagal gautus tyrimo rezultatus parenkamas greičiausiai 450°C temperatūrą pasiekiantis kaitinimo elementas, kuris šiuo atveju yra Mosquito® 12V 50W Heater. Šis kaitinimo elementas naudojamas tolesniuose darbuose.

Parinkus kaitinimo elementą, dar kartą užstatoma, kad kaitinimo elementas sugeneruotų 450°C temperatūrą. Pradinė temperatūros reikšmė parenkama 22°C. Naudojantis termovizoriaus pagalba nustatoma, kaip visame kaitinimo bloke ir radiatoriuje pasiskirsto generuojama temperatūra. Pradinėje padėtyje temperatūros pasiskirstymas pateiktas 31 paveiksle.



31 pav. Termovizoriaus rodmenys ties 22°C

Pagal pateiktą paveikslą galima matyti, kad jokio temperatūros generavimo nėra ir visas ekstruderis yra vienodos temperatūros. Pradėjus kaitinti kaitinimo elementą užfiksuojamas esamas temperatūrinis pokytis, kuris nurodytas 32 paveiksle.



32 pav. Termovizoriaus rodmenys temperatūros generavimo metu

Nuotraukoje pateikti trys taškai, kuriuose fiksuojama temperatūra. Pirmajame taške pavaizduota, kad kaitinimo blokas jau yra užkaitęs iki 70,3°C temperatūros, o kiti du likę taškai, padėti ant radiatoriaus tam tikru atstumu nuo kaitinimo bloko, atitinkamai užkaitę 24,4°C ir 23,3°C. Galiausiai fiksuojama temperatūra, kai „Pronterface“ programoje yra pasiekama 450°C. Temperatūros pasiskirstymas visame kaitinimo bloke ir radiatoriuje pateikiami 33 paveiksle.



33 pav. Termovizoriaus rodmenys „Pronterface“ programoje pasiekus 450°C temperatūra

Pirmajame taške, kuris nurodytas ant kaitinimo bloko, termovizoriaus rodmenys rodo 406°C, o taškuose ties radiatoriumi, rodoma 68°C ir 66°C. Šie rezultatai parodo, jog temperatūros izoliacija yra tinkama ir radiatoriuje plastikas nepradės lydėtis. Priešingu atveju, jei nebūtų tinkamos temperatūros izoliacijos, plastikas lydėtis pradėtų anksčiau. Toks reiškinys apsunkintų plastiko spausdinimą, nes radiatoriuje esanti skylė, kuriuo plastikas eina, galiausiai užsikimštų.

Pastebėjus tai, kad programoje ir termovizoriaus rodmenyse maksimalios kaitinimo elemento reikšmės nesutampa, atliekama papildoma termovizoriaus rodmenų nuotrauka, kur visas kaitinimo blokas pasukamas taip, kad matytųsi išlindęs kaitinimo elemento galas.



34 pav. Termovizoriaus rodmenys „Pronterface“ programoje pasiekus 450°C temperatūra ir kaitinimo bloką pasukus, kad būtų matomas tiesiogiai kaitinimo elemento galas

Iš nuotraukos matyti, kad maksimali temperatūra siekia 415°C, todėl daroma išvada, kad oras atvėsina išorėje esančias dalis, todėl termovizorius rodo mažesnes reikšmes nei yra iš tikrųjų, nes kiaurai objektus nustatyti temperatūros negali.

3.3. Nulinių taškų sensorių integravimas į sistemą ir ašių judėjimo kalibravimas

Vienas svarbiausių 3D spausdintuvo procesų yra ašių judėjimas ir nulinis taškas, todėl pradžioje nustatomas kaitinimo galvutės nulinis taškas.

FDM tipo spausdintuvuose, prieš kiekvieną spausdinimą, visi spausdintuvai naudodamiesi sensorių pagalba nusistato visų ašių nulinį tašką. Priešingu atveju spausdinimas yra neįmanomas, nes spausdintuvas pats negali suprasti savo galimos spausdinimo erdvės. Šiame darbe naudojami mechaniniai judesio sustojimo sensoriai, kurie pavaizduoti 35 paveiksle.



35 pav. Mechaniniai judesio sustojimo sensoriai

Iš viso reikia naudoti 3 tokius sensorius, kurių veikimo principas labai paprastas – prispaudžiant metalinį mygtuką užsidega raudonos šviesos lemputė, kuri ir signalizuoja, kad judesys yra sustabdomas. Norint sėkmingai integruoti sensorius, reikia juos tinkamai įtvirtinti konstrukcijoje, atlikti pakeitimus „Marlin“ kode ir tinkamai įjungti į RAMPS 1.4 plokštę. Pirmiausia, atliekami pakeitimai „Marlin“ kode. Susiradus skiltį „Endstop settings“ suaktyvinamos eilutės, kurios leis sensoriams suprasti, jog jie atsakingi už ašių padėties nulinius taškus. Suaktyvinamos eilutės pavaizduotos 36 paveiksle.

```
1032 #define USE_XMIN_PLUG
1033 #define USE_YMIN_PLUG
1034 #define USE_ZMIN_PLUG
```

36 pav. „Marlin“ kodo judesio sustojimo sensorių suaktyvinimo eilutės

Kadangi naudojami mechaniniai sensoriai, surandama atskira skiltis, skirta tik mechaniniams sensoriams. Šioje skiltyje yra aprašomos loginės sensorių sampratos. Pagal standartinį „Marlin“ kodą jos visos yra neigiamos, o tai reiškia, jog pajungus sensorių į plokštę ir paspaudus metalinį sensoriaus mygtuką jis neveiks, todėl iš „false“ pakeičiama į „true“, kaip nurodyta 37 paveiksle.

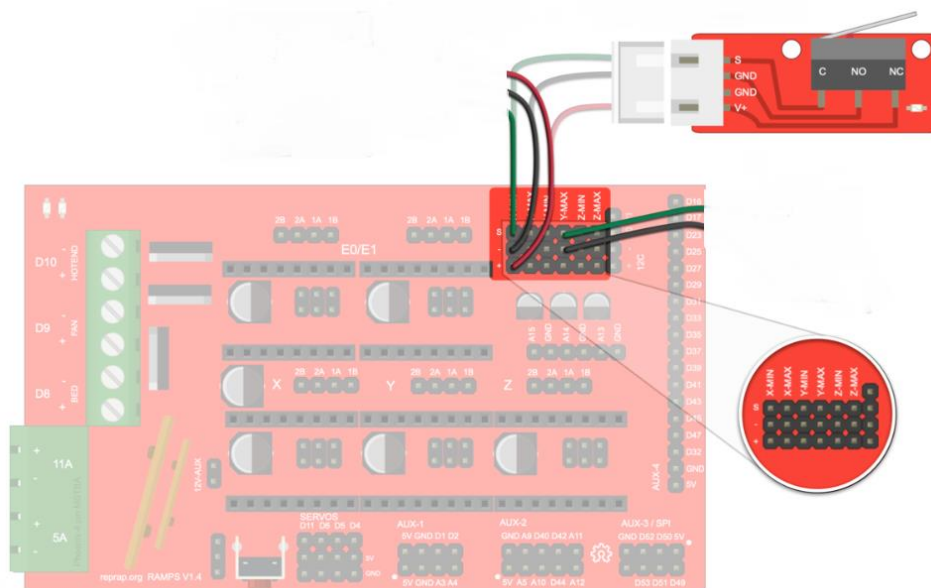
```

1101 // Mechanical endstop with COM to ground and NC to Signal uses "false" here (most common setup).
1102 #define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // Set to true to invert the logic of the endstop.
1103 #define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // Set to true to invert the logic of the endstop.
1104 #define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // Set to true to invert the logic of the endstop.
1105 #define I_MIN_ENDSTOP_INVERTING false // Set to true to invert the logic of the endstop.
1106 #define J_MIN_ENDSTOP_INVERTING false // Set to true to invert the logic of the endstop.
1107 #define K_MIN_ENDSTOP_INVERTING false // Set to true to invert the logic of the endstop.

```

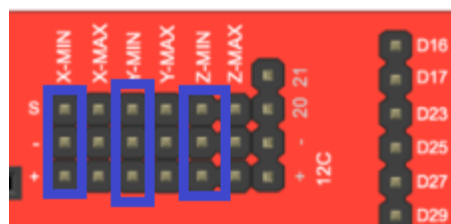
37 pav. Mechaninių sensorių loginis suaktyvinimas

Norint įsitikinti, jog sensoriai veikia, juos reikia tinkamai įstatyti į naudojamą RAMPS 1.4 plokštę. Sensoriai jungiami kaip pavaizduota 38 paveiksle.



38 pav. Mechaninių sensorių jungimas RAMPS 1.4 plokštėje

Raudonas laidas jungiamas į plusinę jungtį, juodas laidas jungiamas į minusinę jungtį, o likęs laidas – į signalui skirtą jungtį. Kaip parodyta paveiksle, yra šešios jungtys, kurios iš kairės į dešinę eina: X min, X max, Y min, Y max, Z min, Z max. Kadangi šiame darbe yra reikalingos tik minimalios reikšmės, sensorius jungiame tik į minimalioms reikšmėms skirtas jungtis kaip pavaizduota 39 paveiksle.



39 pav. Mechaninių sensorių jungimas į RAMPS 1.4 plokštę. Nurodytos trys naudojamos minimalios reikšmės jungtys

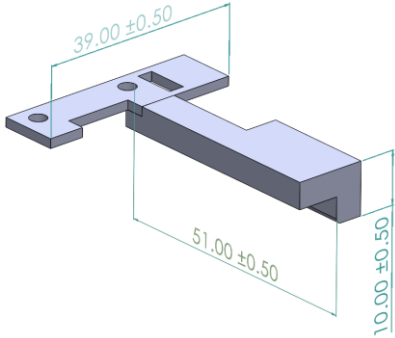
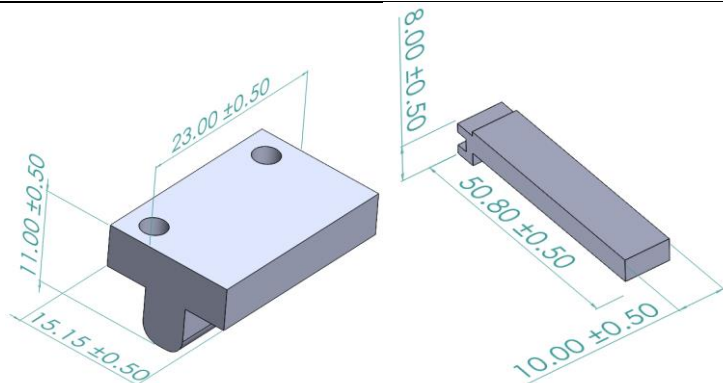
Sujungus sensorius į jiems skirtas vietas, sukompiliuojamas kodas ir duomenys įkeliami į plokštę. Norint patikrinti ar sensoriai veikia, reikia paspausti metalinį mygtuką. Jei užsidega raudona lemputė – sensoriai veikia. Taip pat atliekamas patikrinimas ir „Pronterface“ programoje. Programa susiejama su plokšte, komandų lange įrašoma M119 komanda, kuri parodo sensorių statusą. Įspaudžiami visi sensorių mygtukai bei duodama komanda spausdintuvui. Komandų lange gaunamas rezultatas, kad visi užsiduoti ašių minimalūs mechaniniai sensoriai suaktyvinti, rezultatų pateikimas komandų lange parodytas 40 paveiksle.

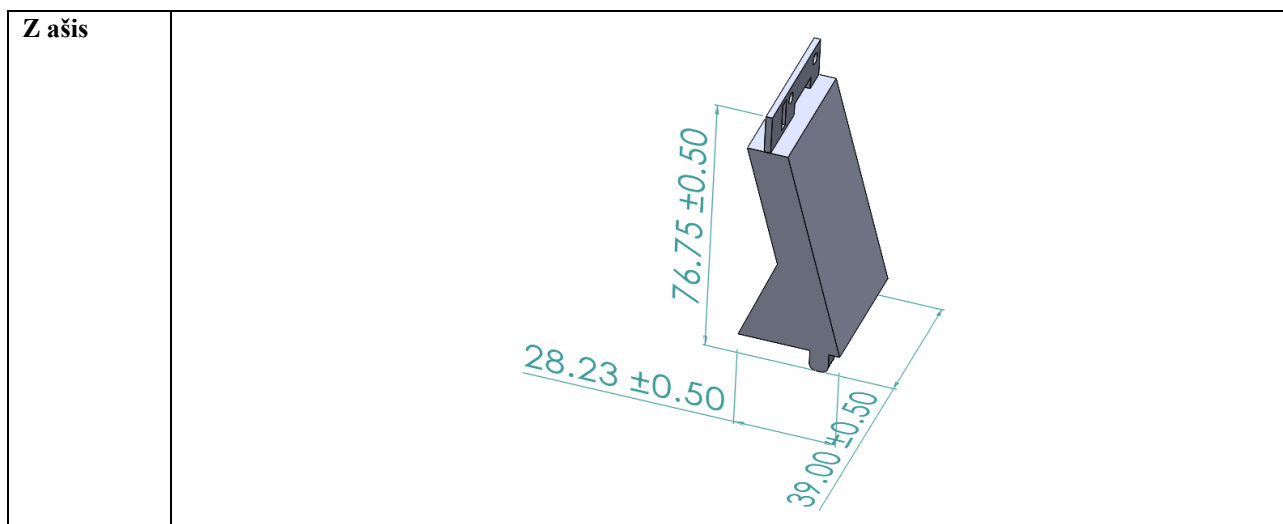
```
x_min: TRIGGERED
y_min: TRIGGERED
z_min: TRIGGERED
```

40 pav. Duotos komandos spausdintuvui rezultatų pateikimas komandų lange

Kitas žingsnis – tinkamas sensorių įtvirtinimas visoje konstrukcijoje. Greičiausias ir paprasčiausias būdas – suprojektuoti sensorius laikančias detales, kurias būtų galima atspausdinti panaudojant kitą turimą 3D spausdintuvą. Slankmačiu išmatuojami reikiami ir nežinomi konstrukcijos tarpai bei skylės. Kadangi žinoma, kokio dydžio yra naudojama kaitinimo plokštė, pagal jos dydį suprojektuojamos laikančiosios detalės, kurios apribos spausdinimo erdvę. Suprojektuotų detalių modeliai pateikiami 10 lentelėje.

9 lentelė. Suprojektuotos detalės mechaniniams sensoriams laikyti

Judesių ašys	Suprojektuotos detalės
X ašis	
Y ašis	



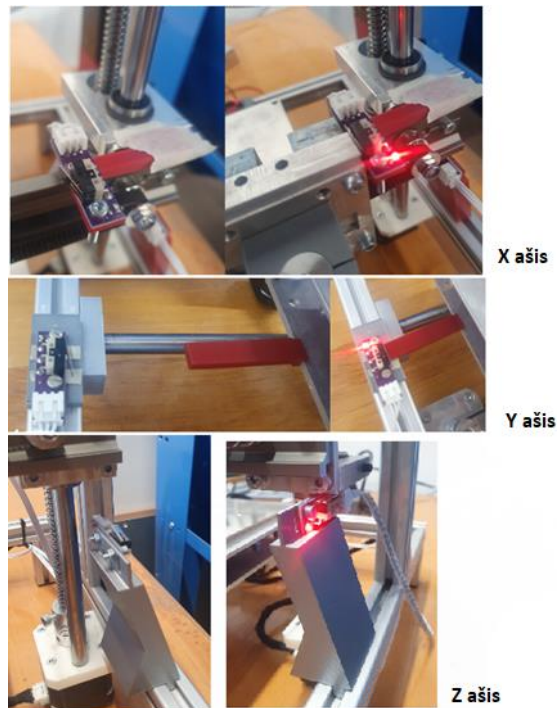
Šių detalių atspausdinimui naudojamas Prusa MK3S spausdintuvas. Detalės spausdinamos iš PLA medžiagos, o G kodai, kuriuos spausdintuvas skaito, sugeneruojami su „PrusaSlicer“ programa.

Projektuojant Z ašies mechaninio sensoriaus laikiklį reikia atkreipti dėmesį, kad sensoriaus mygtukas būtų reikiamame aukštyje purkštuko atžvilgiu. Šiuo atveju norimas taškas – atstumas tarp kaitinimo platformos ir purkštuko – turi būti pirmojo spausdinimo aukštis, kuris parenkamas 0,3 mm. Siekiant kuo aukštesnio spausdinimo tikslumo atliekamas kaitinimo platformos kalibravimas. Šio proceso metu reikia išsiaiškinti tinkamą Z ašies mechaninio sensoriaus laikiklio aukštį. Kaitinimo platforma yra sumontuota ant spyruoklių, kurias priveržiant ar atleidžiant galima reguliuoti platformos aukštį. Kadangi visų spyruoklių valdyti vienu metu negalima, pati platforma gali būti skirtingose vietose skirtingu atstumu nuo purkštuko. Keturiuose platformos kampuose, kaip nurodyta 41 paveiksle, valdant Z ašies judėjimą ir naudojantis metaline plokšte, kurios storis yra 0,3 mm, artinant purkštuką prie kaitinimo platformos surandamas reikiamas mechaninio sensoriaus aukštis, kuris tinka sukalibruotai kaitinimo platformai.



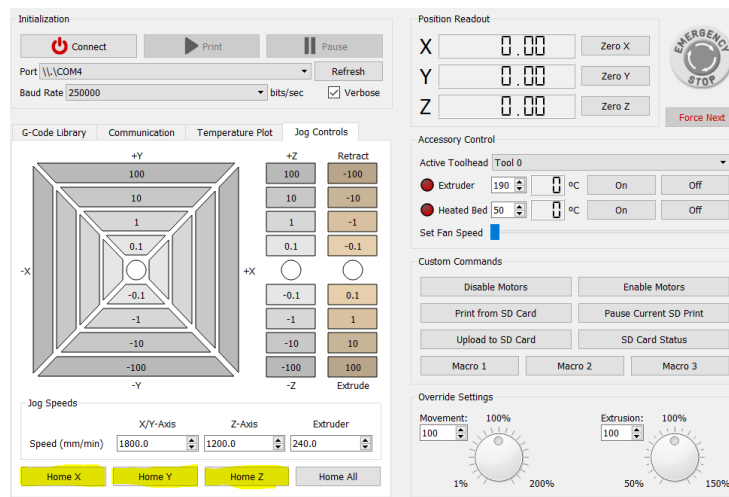
41 pav. Kaitinimo platformos kalibravimo taškai

Suprojektuotos detalės pritvirtinamos prie spausdintuvo konstrukcijos. Sensorių laikikliai tvirtinami tose vietose, kuriose yra atliekamas atitinkamos ašies judesys, jog sensorius tinkamai sureaguotų. Pritvirtinti ir suaktyvinti sensoriai pavaizduoti 42 paveiksle.



42 pav. Mechaninių sensorių pritvirtinimas konstrukcijoje

Panaudojant „Simplify3D“ programą tikrinamas sensorių veikimas simuliuojant ašių judėjimą. Programoje spaudžiama „Home X“, „Home Y“ ir „Home Z“, kaip pavaizduota 43 paveiksle paryškintose vietose.



43 pav. „Simplify3D“ programoje duodama komanda spausdintuvui atlikti judesį iki nulinių taškų

Rezultatuose gaunama, kad mechaniniai sensoriai veikia ir jų pagalba nustatomas nulinis visų ašių taškas.

Standartiškai „Marlin“ kode pateikiamos tik motorų žingsnio vertės milimetrais. Dabartinės nustatytos reikšmės yra pateikiamos 44 paveiksle, kurios lygios: X = 80, Y = 80, Z = 400, E0 (E0 tai ekstruderio paduodamos medžiagos kiekis) = 500.

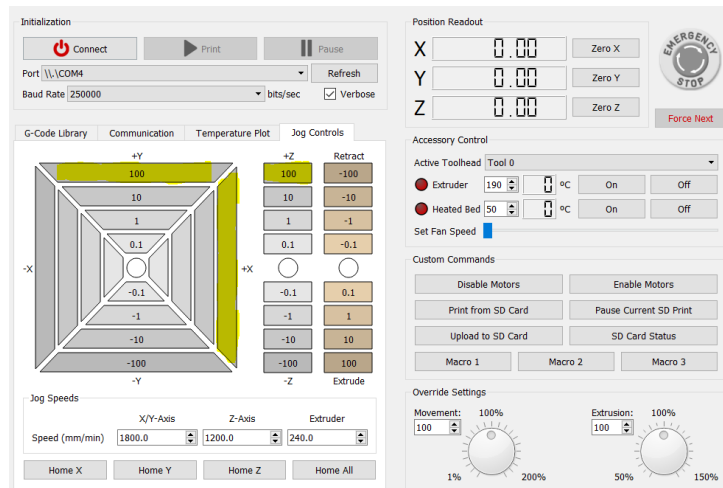
```

*
*/
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80, 80, 400, 500 }

```

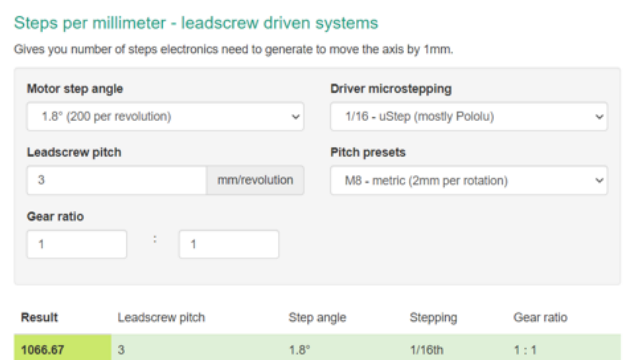
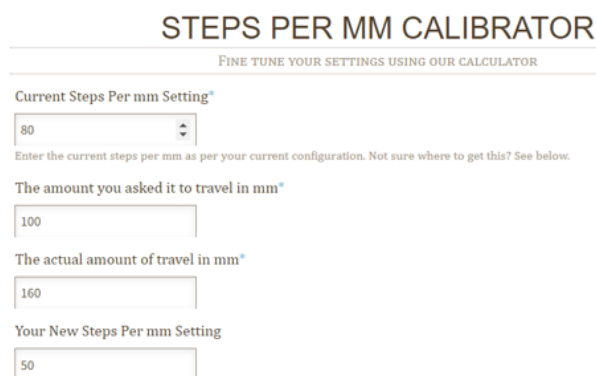
44 pav. Standartinė Marlin kodo ašių judėjimo vertė milimetrais

Panaudojant „Simplify3D“ programą patikrinama, ar parinktos vertės yra tinkamos. Prijungus prie 3D spausdintuvo duodama komanda visos ašims atlikti judesius, kurie lygūs 100 mm.



45 pav. „Simplyfy3D“ programoje užduodamos komandos atlikti ašims judesį po 100 mm

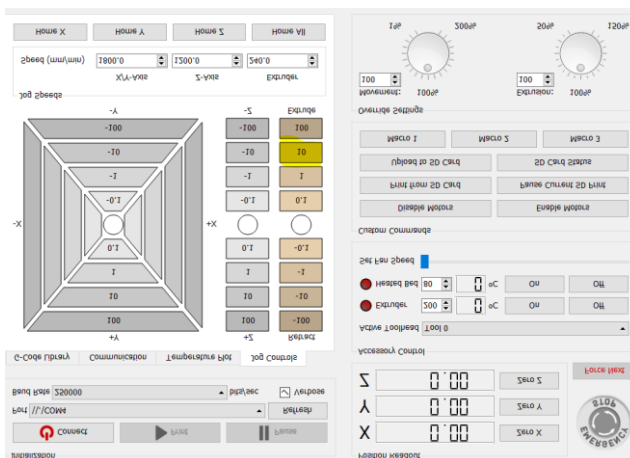
Atlikus judesius slankmačiu išmatuojamos gautos realios nueitos vertės. Slankmačiu išmatuotos reikšmės: X ašis = 160; Y ašis = 160; Z ašis = 37,5. Judėjimas visomis ašimis ženkliai neatitinka realybės, todėl jos apskaičiuojamos iš naujo. Tinkamai apskaičiuoti žingsnio vertes naudojamos dvi skaičiuoklės, kurių darbiniai langai pateikti 46 paveiksle.



46 pav. Kairėje nurodyta X ir Y ašių skaičiuoklė [21], dešinėje Z ašių skaičiuoklė [22]

Įvedamos skaičiuoklėse apskaičiuotos reikšmės į „Marlin“ kodą, atitinkamai pakeičiant visas vertes, kurios nurodytos 44 paveiksle. Atliekami pakartotiniai ašių judesio bandymai, kurių rezultatai vėl apskaičiuojami slankmačio pagalba. Užduodama 100 mm judesio komanda visomis kryptimis nuo nulinio ašių taško. Rezultate gaunama, kad užduotos 100 mm reikšmės yra tokios pačios, kaip ir išmatuotos slankmačiu.

Kol kas nėra tiksliai žinoma, ar ekstruderio motoras yra teisingai sukalibruotas, todėl atliekamas identiškas bandymas, koks buvo atliktas su judesio ašimis. „Simplify3D“ programoje, paspaudžiama komanda, kad būtų išstumta 10 mm medžiagos.



47 pav. „Simplify3D“ programoje užduodama komanda išstumti 10 mm medžiagos

```

1165 * Override with M92
1166 *                               X, Y, Z [, I [, J [, K...]]], E0 [, E1[, E2...]]
1167 */
1168 #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 50, 50, 1066.67, 94.06 }

```

48 pav. Sukalibruotos motorų žingsnių vertės

Išstumtas kiekis yra pamatuojamas slankmačiu. Gaunamas rezultatas, kad realus išstumtas kiekis yra 53,16 mm. Panaudojant tą pačią skaičiuoklę, kuri buvo naudota X ir Y ašių motorų žingsniams apskaičiuoti, randama nauja ekstruderio reikšmė, kuri lygi 94,06 mm. Gauta reikšmė įrašoma į „Marlin“ kodą ir 44 paveikslėlyje nurodytą vietą. Atliekamas identiškas bandymas, siekiant įsitikinti, ar nustatyta reikšmė yra tinkama. „Simplify3D“ platformoje atliekamas tas pats veiksmas, kuris nurodytas 44 paveiksle. Su slankmačiu išmatuojamas išstumtas medžiagos kiekis, kuris atitinka užsiduotą vertę – 10 mm. Pilnai sukalibruotų visų motorų žingsnių vertės pateiktos 48 paveiksle.

3.4. Ašinių judesių tikslumo tyrimas

Šiame poskyryje yra tikrinamas X, Y ir Z ašių judėjimo tikslumas. Kiekviena detalė turi savo toleranciją, todėl atliekant šį procesą reikia įsitikinti, ar atliekamo judesio tikslumas yra patenkinamas.

Tyrimo proceso eiga: tinkamai įtvirtinus mechaninį matavimo sensorių, spausdintuvui per „Simplify3D“ programą užduodama komanda nueiti konkretų atstumą. Matuoklis įtvirtintas taip, kad užduotame judesio taške sudarytų 1 mm įvaržą – tai yra atliekama tam, kad būtų galima matyti tikslesnius rezultatus. Spausdintuvui atvažiavus į užduotą tašką mechaniniame matavimo sensoriuje išmatuojama gauta reikšmė ir duodama komanda spausdintuvui grįžti į skaičiuojamos ašies nulinių tašką. Taip atliekama po 20 matavimų trijose skirtingose ašies padėtyse.

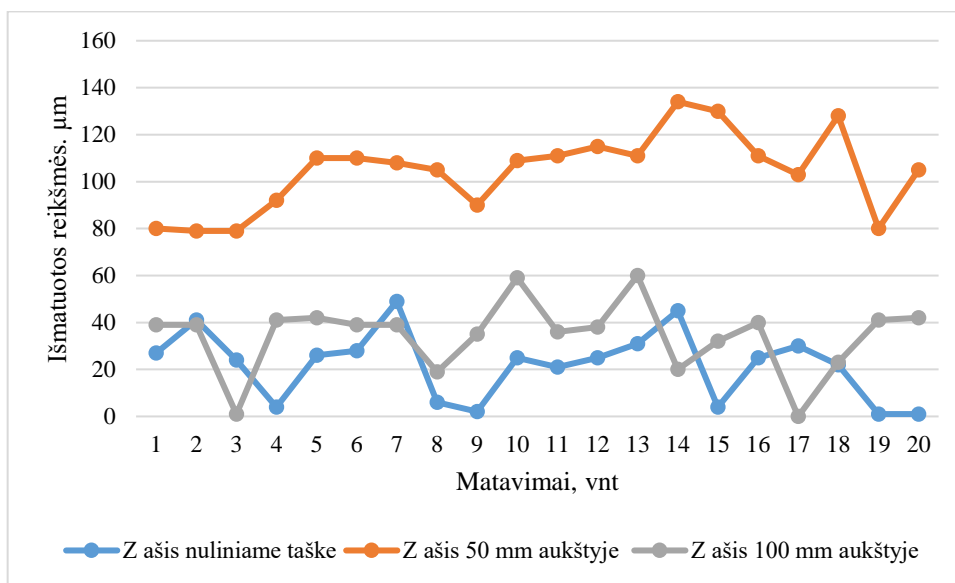
3.4.1. X ašies judesio tikslumo nustatymas

Pirmiausia, atliekamas X ašies tikslumo nustatymas. Matuojant šio ašies tikslumą naudojamos trys skirtingos padėtyse: kai Z ašis yra nuliniame taške, kai Z ašis yra 50 mm aukštyje, kai Z ašis yra 100

mm aukštyje. Spausdintuvui užduodama komanda – 100 mm nuo nulinio X ašies taško. Mechaninio matavimo sensoriaus įtvirtinimas pavaizduotas 49 paveiksle. Atlikto matavimo reikšmės grafiko forma pateiktos 50 paveiksle.



49 pav. X ašies mechaninio matavimo sensoriaus įtvirtinimas



50 pav. X ašies judesio matavimo rezultatai

Pagal 49 paveikslą galima daryti išvadą, kad didžiausias X ašies judesio netikslumas yra tuomet, kai visa kaitinimo galva pakelta 50 mm nuo kaitinimo platformos, kurioje netikslumas pasiekiamas iki 134 μm nuo užsiduoto matavimo taško pradžios. Kita vertus, judėjimo tikslumo variacija nėra didelė – didžiausias matomas pokytis yra tuomet, kai X ašies judesys atliekamas 100 mm pakėlus nuo kaitinimo platformos, kuomet gaunama variacija yra 60 μm .

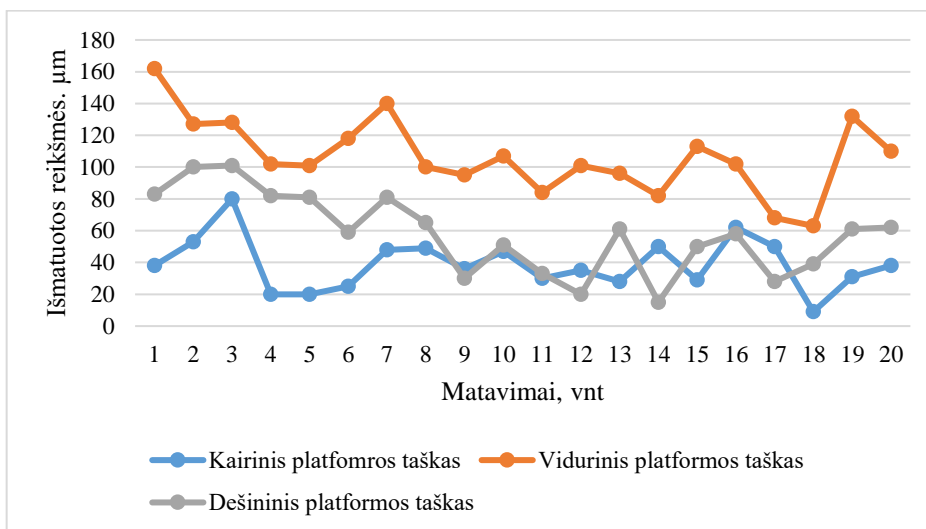
3.4.2. Y ašies judesio tikslumo nustatymas

Y ašies judesio tikslumo nustatymas atliekamas identišškai, tačiau tik mechaninio matavimo sensoriaus vietos yra kitokios, kaip pateikta 51 paveiksle.



51 pav. Y ašies mechaninio matavimo sensoriaus tvirtinimo vietos pažymėtos raudonais x simboliais

Dėl sudėtingesnio sensoriaus tvirtinimo, šį kartą judesį spausdintuvui užduodame 50 mm nuo nulinio Y ašies taško. Rezultatai pateikiami 52 paveiksle grafiko forma.

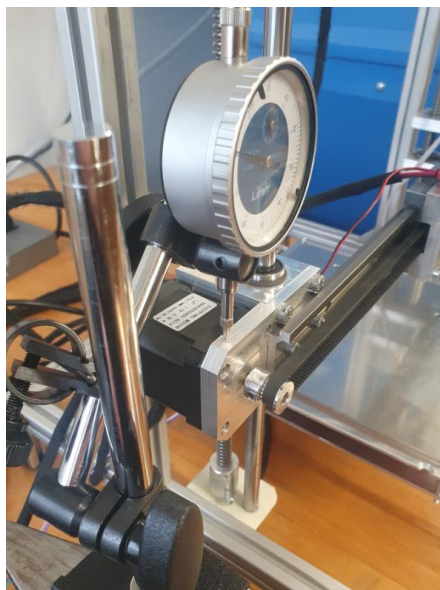


52 pav. Y ašies judesio matavimo rezultatai

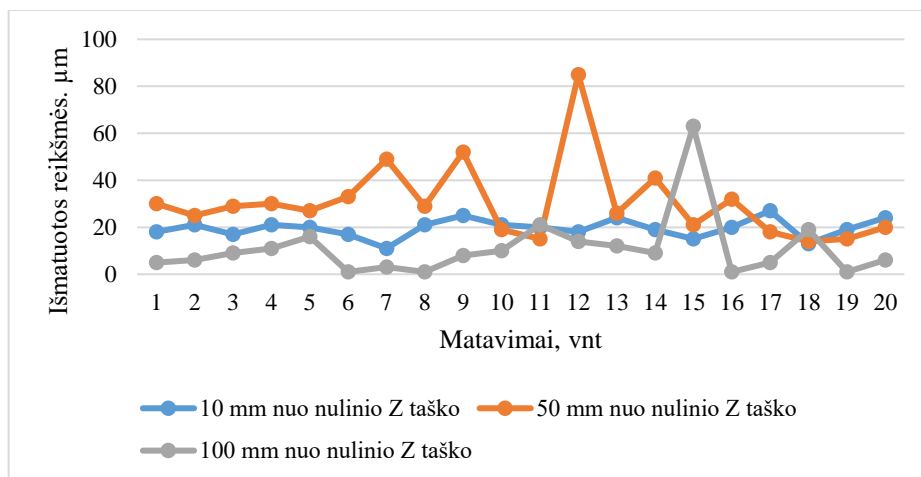
Iš pateikto grafiko 52 paveiksle, galima daryti išvadą, kad didžiausias Y ašies judesio netikslumas yra per vidurį. Taip yra todėl, nes toje vietoje patiriamos didžiausios vibracijos ir pati kaitinimo platforma yra vienoje plokštumoje kaip ir judesio motoras su diržu.

3.4.3. Z ašies judesio tikslumo nustatymas

Nustatant paskutinės Z ašies judesio tikslumą atliekamas analogiškas procesas, tik matuojami taškai nuo nulinio Z ašies taško šiuo atveju yra 10 mm, 50 mm ir 100 mm. Mechaninio matavimo sensoriaus įtvirtinimas pavaizduotas 53 paveiksle. Matavimų rezultatai grafiko forma pateikiami 54 paveiksle.



53 pav. Z ašies mechaninio matavimo sensoriaus įtvirtinimas



54 pav. Z ašies judesio matavimo rezultatai

Pagal 54 paveiksle pateiktą grafiką galima daryti išvadą, kad kiekvienoje padėtyje Z ašis veikia vienodai, turėdama iki 40 µm paklaidą. Matavimo metu buvo užfiksuoti keli didesni tolerancijos šuoliai, kurie taip pat pavaizduoti grafike. Didžiausias netikslumas sutampa su X ašies atveju – kuomet visas kaitinimo blokas yra pakeltas 50 mm nuo kaitinimo platformos – tad galima daryti prielaidą, jog toje vietoje konstrukcija yra ne tokia tiksli kaip kitose vietose, bei spausdinant tokiam aukštyje potencialiai gali iškilti problemų.

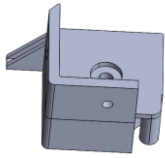
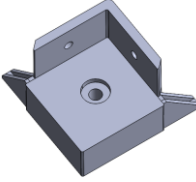
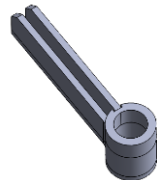
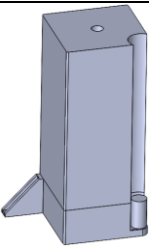
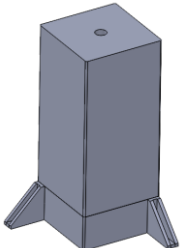
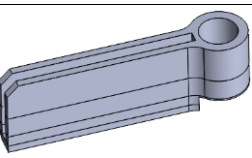
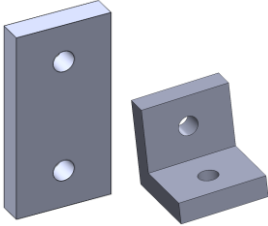
3.5. Gaubto konstrukcijos projektavimas

Spausdinant PEI medžiagą reikia palaikyti ženkliai aukštesnę aplinkos temperatūrą, kuri būtų ne mažesnė nei 90°C. Tam, kad būtų galima bandyti pasiekti šią temperatūrą, spausdintuvui sudaromas

gaubtas. Projektuojamą gaubtą sudarys šios detalės: kaip laikančioji konstrukcija bus panaudotas stalas; 5 skaidraus organinio stiklo lakštai; spausdintos detalės; izoliacinė guma; savisriegiai 4,5 x 20.

Pirmiausia, įsigyjamos visos reikiamos detalės, kurių kainos pateiktos 4 skyriuje. Turint visas įsigytas detales, suprojektuojamos ir atspausdinamos detalės, kurios pateiktos 11 lentelėje.

10 lentelė. Suprojektuotos detalės skirtos gaubto konstrukcijai

Detalė	Naudojimo paskirtis	Kiekis
	Viršutinė jungiamoji dalis tarp stalo paviršiaus ir stalo kojos, kartu su integruota vieta vyriui. Taip pat ši detalė turi stiklo lakšto laikiklius. Detalių gabaritiniai matmenys: 72 x 55 x 47 mm;	2
	Viršutinė jungiamoji dalis tarp stalo paviršiaus ir stalo kojos. Taip pat ši detalė turi stiklo lakšto laikiklius. Detalių gabaritiniai matmenys: 72 x 72 x 47 mm;	2
	Viršutinis stiklo lakšto vyris, kartu su integruota vieta stiklo lakštui laikyti. Detalių gabaritiniai matmenys: 60 x 7 x 18.5 mm;	2
	Apatinė jungiamoji dalis, kuri jungiama prie stalo kojos. Kartu su integruota vieta laikyti stiklo lakštą bei įstatyti apatinį durų vyrį. Naudojamos dvi identiškos detalės, kurios skiriasi tik atvirkštinėmis durų vyro ir stiklo lakšto padėtimis. Detalių gabaritiniai matmenys: 72 x 55 x 121.5 mm;	2
	Apatinė jungiamoji dalis, kuri jungiama prie stalo kojos. Kartu su integruotomis dvejomis stiklo lakšto laikiklio vietomis. Detalių gabaritiniai matmenys: 72 x 72 x 121.5 mm;	2
	Apatinis stiklo lakšto vyris, kartu su integruota vieta stiklo lakštui laikyti. Detalių gabaritiniai matmenys: 60 x 7 x 20 mm;	2
	Papildomos tvirtinimo detalės Detalių gabaritiniai matmenys (stačiakampės detalės): 40 x 20 x 5 mm; Detalių gabaritiniai matmenys (kampinės detalės): 20 x 20 x 20 mm;	12

Prieš pradėdant gaubto surinkimą, paruošiami trys 540 x 440 x 3 mm ir du 540 x 220 x 3 mm dydžio neorganinio stiklo lakštai.

Pirmiausia, prisukamos viršutinės laikančiosios detalės prie stalo, o prie jų pritvirtinamos stalo kojos. Siekiant didesnio stabilumo prisukamos papildomos tvirtinimo detalės, atitinkamose vietose įstatomi viršutiniai durų vyriai. Surinktas etapas pavaizduotas 55 paveiksle.



55 pav. Stalo ir kojų sujungimas

Toliau atitinkamais dydžiais supjaustoma izoliacinė medžiaga, kuri klijuojama prie kojų šonų, bei įstatomas stiklas, kaip nurodyta 56 paveiksle.



56 pav. Izoliacinės medžiagos ir stiklo įstatymas į konstrukciją

Galiausiai, įstatomos durelės lygiai tokiu pačiu principu, viršuje stalo platformoje pragręžiama skylė, kuri skirta atlikti temperatūros matavimus ar prakišti medžiagos ritę. Pilnai užbaigtas gaubtas pateiktas 57 paveiksle.

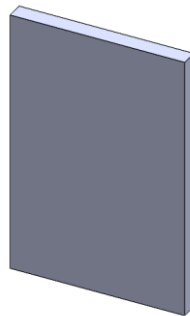


57 pav. Pilnai surinkta gaubto konstrukcija

Surinkus spausdintuvo gaubtą atliekamas bandomasis PLA medžiagos spausdinimas.

3.6. PLA spausdinimas

Norint įsitikinti, kad visa konstrukcija sujungta ir sukalibruota teisingai, prieš PEI medžiagos spausdinimą atliekamas PLA plastiko spausdinimas. Pradžioje suprojektuojamas bandinys, kuris pateiktas 58 paveiksle.



58 pav. Bandinys, skirtas spausdinti PLA

Bandinys yra kubo formos, kurio matmenys 35 x 20 x 2 mm. Suprojektuojamas kuo paprastesnis bandinys, siekiant neapkrauti pačio spausdintuvo ir neapsunkinti viso spausdinimo. „Solidworks“ platformoje sugeneruojamas .stl formato failas, kuris patalpinamas į „Simplify3D“ programą. Spausdintuvą sujungus su kompiuteriu parenkami PLA medžiagai spausdinti skirti parametrai: 210°C kaitinimo elemento temperatūra bei 65°C kaitinimo platformos temperatūra. Tai pat pakoreguojamas medžiagos išspaudimo koeficientas, kuris iš standartinės 0,9 reikšmės pakeičiamas į 1,15. Sluoksnio aukštis parenkamas 0,25 mm, o užpildo procentas – 20 %. „Simplify3D“ programoje perduodama komandą pradėti spausdinimą. Kaitinimo elementui ir kaitinimo platformai pasiekus reikiamas temperatūras pradedamas spausdinimas. Atspausdintos galutinės detalės variantas pateiktas 59 paveiksle. Slankmačiu išmatuojami atspausdinto bandinio matmenys pateikiami 60 paveiksle.



59 pav. PLA atspausdintas bandinys



60 pav. Atspausdinto bandinio iš PLA matavimas

Pagal gautus rezultatus priimama, kad bandinys atsispausdino tinkamai ir sėkmingai, kadangi kokybės rodikliai yra tenkinami.

3.7. PEI spausdinimas

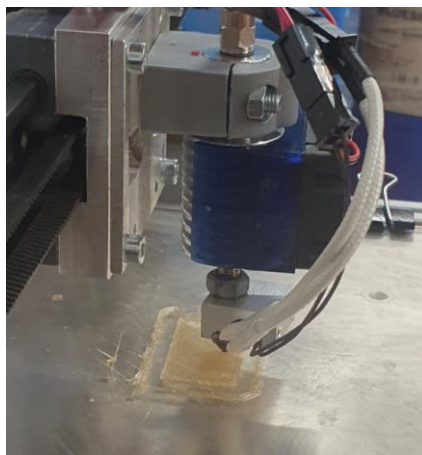
Prieš pradėdant spausdinimą, pradžioje suprojektuojamas bandinys, kurio matmenys yra 35 x 20 x 2 mm. Sukonstruotas gaubtas uždedamas ant spausdintuvo, išpakuojiama medžiaga ir padedama ant gaubto viršaus, medžiagos ritė prakišama į ekstruderį. Šiam spausdinimui naudojama ULTEM 1010 PEI medžiaga.

Spausdintuvas yra sujungiamas su kompiuteriu ir atidaroma „Simplify3D“ programa, kurioje parenkami spausdinimo parametrai. Nustatomos parinktys: kaitinimo elemento temperatūra lygi 370°C; kaitinimo platformos temperatūra lygi 120°C; sluoksnio aukštis lygus 0,25 mm; medžiagos išspaudimo koeficientas lygus 0,9; spausdinimo greitis lygus 20 mm/s; taikomas 100 % medžiagos užpildymas. Prieš perduodant spausdintuvui komandą atlikti spausdinimą, kaitinimo platforma patepama specialiai 3D spausdinimui skirtais klijais, taip užtikrinama, kad pirmas sluoksnis prilips ir neatkibs nuo platformos. Pilnai paruoštas spausdintuvas pavaizduotas 61 paveiksle.



61 pav. Pilnai surinktas spausdintuvas su gaubtu paruoštas PEI spausdinimui

Davus spausdintuvui komandą pradedamas spausdinimas. Pradžioje užkaitinama kaitinimo platforma, vėliau kaitinimo elementas pasiekia reikiamą temperatūrą. Spausdintuvui susiradus nulinius taškus pradedamas spausdinimas, kurio eiga pavaizduota 62 paveiksle. Galiausiai spausdinimas yra baigtas ir detalė yra išmatuojama.



62 pav. PEI spausdinimas



63 pav. Atspausdinta PEI detalė ir išmatuoti jos matmenys

Pagal 63 paveikslą galima teigti, kad šio projekto spausdintuvu įmanoma spausdinti aukštatemperatūrį polimerą PEI, tačiau reiktų atlikti keletą papildomų tyrimų ar patobulinti pačią konstrukciją, norint padidinti matmenų tikslumą.

4. Ekonominė dalis

Šiame skyriuje apskaičiuojama viso spausdintuvo savikaina, vieno spausdinimo kaina bei tiek spausdintuvo, tiek proceso kainos palyginimas su galimais kitais rinkoje prieinamais variantais.

4.1. Įrenginio savikainos skaičiavimas

Pirmiausia, apskaičiuojama viso spausdintuvo savikaina. Įrenginio savikainą sudaro visos naudojamos dalys, reikalingos spausdintuvui veikti, bei žmogaus darbas surenkant ir tinkamai paruošiant jį veikti. Spausdintuvo savikainos skaičiavimas pateikiamas 12 lentelėje.

11 lentelė. Spausdintuvo ir jo gaubto savikaina

Detalės pavadinimas	Kiekis, vnt.	Kaina, Eur.
Spausdintuvas		
Bėgis WSQ-06-30, L=400 mm	1	19,43
Karietėlė WW-06-30-06	1	31,85
Aliuminio profilis 5x20x20	1	2,55
Standartinis sujungimo elementas 5 bright zinc-plated 1 set	6	4,35
Dangtelis 5x40x20	4	1,92
Sraigtinis velenas TR 10x2 L=1000 mm from C15 steel PTGSG-10x2-01-R-1000	1	6,84
Trapecinio sriegio veržlė WFRM-2525 TR 10x2	1	12,57
Slydimo kreipiančioji WS-10-80 L=1000 mm	1	70,68
Trapecinio sriegio veržlė WSRM-2215 TR 10x2	1	11,29
Karietėlė WWE-10-80-10	1	50,89
Aliuminio profilis 8x40x40	5 (skirtingai atpjauti profilių ilgiai)	87,12
Termistorius E3D PT1000 Temperature Sensor	1	22,99
Kaitinimo elementas Mosquito® 12V 50W Heater	1	23,99
Varikliai 42BYGH47-401A	5	37,50
Radiatorius E3D-v6	1	7,69
Ventiliatoriai Creality Ender-5	2	14,20
RepRap E3D V5 V6 purkštukas	1	9,00
Ekstruderis 1.75MM plastikui	1	8,00
Stiklinis šildymo padas	1	18,00
Kontroleris RepRap Ramps 1.4 priedėliui su ekranu 128x64 LCD	1	27,60
RAMPS 1.4 3D spausdintuvo kontroleris	1	12,90
Arduino Mega 2560 valdymo plokštė	1	46,13
Mechaninis ENDSTOP jungiklis RAMPS priedėliui	3	10,20
Žingsninio variklio valdiklis A4988 RepRap	4	18,80
BIQU 3D B1 maitinimo šaltinis 24V 360W 15A	1	33,70
Šildomo pado kalibravimo varžtas M3 su spyruokle	4	4,40
Anet ET4 šildomas padas	1	25,30
Spausdintos detalės iš PLA	5	2,00
Iš viso		621,89
Gaubtas		
IKEA stalas	1	9,00
Organinis stiklas PLEXIGLASS	5 (skirtingų matmenų lakštai)	36,79
Spausdintos detalės iš PLA	15	10,00
Savisriegiai 4.5x20	20	3,49

11 lentelės tęsinys

Izoliacinė medžiaga 7 metrai	1 (supjaustyta skirtingų matmenų)	12,51
Iš viso		71,79

Skaičiuojant bendrą įrenginio savikainą įvertinamas ir žmogaus atliekamas darbas. Darbuotojo, kuris surinks ir gebės sujungti visą spausdintuvą, atlyginimas priimamas 1250 eurų per mėnesį – tai vidutinis inžinieriaus projektuotojo atlyginimas Lietuvoje šiuo metu [23]. Įvertinama tai, kad darbuotojui reikės dirbti visą darbo savaitę tik prie šio spausdintuvo, jog būtų galima pilnai juo naudotis. Taigi, gaunama, kad darbuotojui už šį darbą reikia sumokėti 312,5 eurus.

Pagal 14 lentelę įvertinant spausdintuvo ir gaubto savikainas bei prie šių sumų pridėdant darbuotojo darbo užmokestį gaunama, kad pilna viso įrenginio savikaina yra 1006,18 Eurų.

Lyginant šio projekto spausdintuvą su jau nagrinėtais pirmajame skyriuje, galima teigti, jog projekto spausdintuvas yra daugiau kaip 7 kartus pigesnis už patį pigiausią nagrinėtą „FUNMAT HT“ įrenginį. Reiktų atkreipti dėmesį, kad projekto spausdintuvui įvertinamas darbuotojo užmokestis, kuris sudaro trečdalį visos kainos.

4.2. Spausdinimo proceso su PEI savikainos skaičiavimas

Turint įrenginio savikainą, toliau apskaičiuojama spausdinimo proceso savikaina, naudojant PEI medžiagą. Norint apskaičiuoti proceso savikainą „Excel“ platformoje sudaromas matematinis modelis, kuriuo naudojantis galima gauti norimą reikšmę, keičiant detalės kiekį, matmenis ar kitus parametrus. Matematinio modelio išraiška pateikiama 13 lentelėje.

12 lentelė. Spausdinimo proceso matematinis modelis

Proceso pavadinimas, vienetai;	Aprašymo simbolis	Reikšmės
Spausdinimas, Eur;	P_2	0,58
Medžiagos sunaudojimo kaina, Eur;	A_1	0,53
Spausdinimo įrangos elektros sunaudojimas, Eur;	A_2	0,046
Spausdinamos medžiagos kaina PEI, Eur/kg;	S_1	297,98
Spausdinimo įrangos elektros sunaudojimas kaina, Eur/kWh;	S_2	0,33
Spausdinamos detalės geometriniai ypatumai, koeficientas;	S_3	1
Spausdinamos detalės vidaus užpildymas (infill), %;	S_4	1
Spausdinamos detalės gabaritai, mm^3 ;	D_1	1400
Spausdinamos detalės medžiagos tankis, kg/m^3 ;	D_2	$1,27 \cdot 10^{-6}$
Medžiagos kiekis reikalingas detalei, kg;	S_5	$1,78 \cdot 10^{-3}$
Spausdinimo trukmė, h;	S_6	0,59
Spausdinimo sluoksnių skaičius;	L_1	13,34
Vieno sluoksnio trukmė, s;	L_2	23,34
Spausdinimo greitis mm/s;	S_7	30
Sluoksnio plotas, mm^2 ;	S_8	700
Spausdinimo įrangos maitinimo šaltinio galia, kW;	W_1	0,24
Detalių skaičius, vnt.	D_3	1
Detalės ilgis, mm;	B_1	35
Detalės plotis, mm;	B_2	20
Detalės aukštis, mm;	B_3	2

Matematinio modelio paaiškinimas:

- Spausdinimas (P_2) – apskaičiuota galutinė spausdinimo proceso kaina, kuri gaunama: $(A_1+A_2)*D_3$;
- Medžiagos sunaudojimo kaina (A_1) – apskaičiuota kaina sunaudojamam medžiagos kiekiui, kuri gaunama: $S_1*S_3*S_4*S_5$;
- Spausdinimo įrangos elektros sunaudojimas Eurais (A_2) – apskaičiuota įrenginio sunaudojama elektros energija, kuri gaunama: $S_2*W_1*S_6$;
- Spausdinimo medžiagos kaina PEI (S_1) – naudojamo polimero kaina [24];
- Spausdinimo įrangos elektros sunaudojimas kaina (S_2) – parinkta elektros kaina [25];
- Spausdinamos detalės geometriniai ypatumai (S_3) – parinkti trys galimi modelio geometriniai ypatumai: 1 – spausdinama be pagalbinių konstrukcijų; 1,5 – spausdinama su dalinėmis pagalbinėmis konstrukcijomis; 2 – pagalbinės konstrukcijos generuojamos visur, kur programa to reikalauja;
- Spausdinamos detalės vidaus užpildymas (S_4) – detalės užpildas procentais;
- Spausdinamos detalės gabaritai (D_1) – apskaičiuoti detalės gabaritai, kurie gaunami: $B_1*B_2*B_3$;
- Spausdinamos detalės medžiagos tankis (D_2) – polimero reikšmė [26];
- Medžiagos kiekis reikalingas detalei (S_5) – apskaičiuojama reikšmė, kuri gaunama: D_1*D_2 ;
- Spausdinimo trukmė (S_6) – apskaičiuojama reikšmė, kuri gaunama: $(L_1*L_2+(60*30))/60/60$;
- Spausdinimo sluoksnių skaičius (L_1) – apskaičiuojama reikšmė, kuri gaunama: $B_3/0,15$. Čia 0,15 – priimamas sluoksnio aukštis;
- Vieno sluoksnio trukmė (L_2) – apskaičiuojama reikšmė, kuri gaunama: S_8/S_7 ;
- Spausdinimo greitis (S_7) – užsiduota spausdinimo greičio reikšmė visai detalei;
- Sluoksnio plotas (S_8) – apskaičiuojama reikšmė, kuri gaunama: B_1*B_2 ;
- Spausdinimo įrangos maitinimo šaltinio galia (W_1) – parinkta maitinimo šaltinio galia [27];
- Detalių skaičius (D_3) – reikalingas atspausdinti detalių skaičius;
- Detalės ilgis (B_1) – norimas detalės ilgis;
- Detalės plotis (B_2) – norimas detalės plotis;
- Detalės aukštis (B_3) – norimas detalės aukštis.

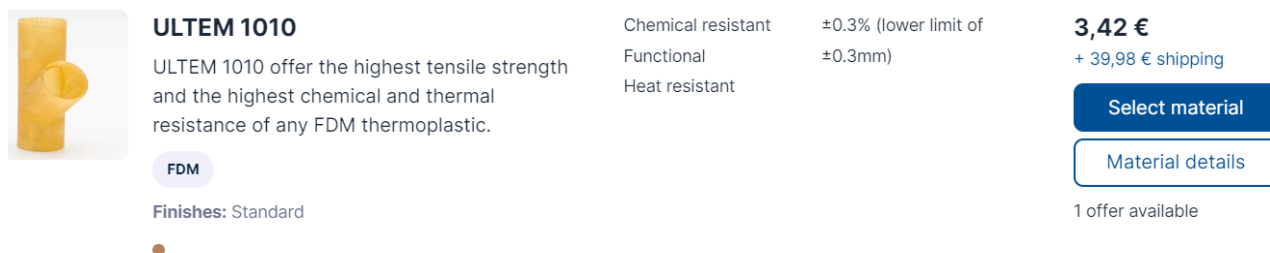
Proceso matematinio modelio formulė:

$$P_2 = \left((S_1 * S_3 * S_4 * B_1 * B_2 * B_3 * D_2) + \left(S_2 * W_1 * \left(\frac{\left(\frac{B_3}{0,15} \right) * \left(\frac{B_1 * B_2}{S_7} \right) + (60 * 30)}{60 * 60} \right) \right) \right) * D_3 \quad (1)$$

Jei detalė yra apskrita ar su įvairesnėmis sudėtingomis formos, į matematinį modelį įrašomi pačios detalės gabaritai. Taip yra todėl, nes virš detalių ar pilnai šalia jų spausdinti kitų detalių negalima.

Kaip pavyzdinę detalę parenkame 10 x 10 x 10 mm kubą ir pagal šį matematinį modelį gauname, kad detalės savikaina yra 0,58 euro centai. Bendram proceso pelnui pridėdama ir pelno maržą, kurią įvertinant kaip sudėtingą paslaugą, parenkama 200 %, tad galutinė gaunama viso proceso savikaina yra 1,74 Euro.

Atliekant palyginimą, panaudojama „craftcloud3d“ platforma, kurioje parenkama projekte naudojama medžiaga bei atliekamas 35 x 20 x 2 mm kubo kainų skaičiavimas. Rezultatai pateikiami 64 paveiksle.



ULTEM 1010

ULTEM 1010 offer the highest tensile strength and the highest chemical and thermal resistance of any FDM thermoplastic.

FDM

Finishes: Standard

Chemical resistant ±0.3% (lower limit of
Functional ±0.3mm
Heat resistant

3,42 €
+ 39,98 € shipping

Select material

Material details

1 offer available

64 pav. „Craftcloud3d“ svetainės PEI medžiagos kainynas 35 x 20 x 2 mm detalei

Paveiksle pateiktas pigiausias ir galimas vienintelis variantas šios detalės spausdinimui yra Meksikoje už 3,42 eurus plus prisideda siuntimo mokestis, kuris lygus 39,98 euro. Keičiant detalės matmenis atsiranda daugiau galinčių variantų atspausdinti pasirinktą ULTEM 1010 aukštatemperatūri polimerą tokiose vietose kaip: Jungtinės Amerikos Valstijose, Kinijoje ar Latvijoje. Šiaurinėje Europoje vienintelė įmonė „Baltic3d.EU“ įsikūrusi Latvijoje užsiima aukštatemperatūrių polimerų spausdinimu. Galima teigti, jog tokios detalės spausdinimas konkrečiose įmonėse yra finansiškai nenaudingas, nes uždedama labai didelė paslaugos pelno marža.

Apibendrinant galima sakyti, kad spausdintuvą, skirtą aukštatemperatūrių polimerų spausdinimui, pačiam susikonstruoti yra daugiau nei 7 kartus pigiau. Be to, pradėjus teikti paslaugą, atsižvelgiant į rinkos pasiūlymus, būtų galima užsidėti didelę paslaugos pelno maržą, tokiu atveju spausdintuvui atsiperkant per itin trumpą laiką.

Išvados

1. Projekte buvo išanalizuoti skirtingų gamintojų aukštatemperatūrių polimerų 3D spausdintuvai. Apžvelgti galimi spausdinimo parametrai bei įvairūs konstrukciniai ypatumai. Kiekvienam spausdintuvui sudarytos parametų lentelės, kuriose pateikti pagrindiniai ir didžiausią įtaką spausdinimui darantys parametrai. Atkreiptas dėmesys, jog aukštatemperatūrių polimerų spausdintuvų kainos yra ganėtinai aukštos.
2. Išnagrinėta keletą mokslinių straipsnių, kuriuose atliekami bandymai su PEI medžiaga. Nustatytos naudojamos kaitinimo elemento ir kaitinimo platformos temperatūros, spausdinimo greitis ir kiti parametrai. Pastebėta, kad beveik visi spausdintuvai, kurie buvo naudojami moksliniuose tyrimuose, turi gaubtą. Nustatyta, kad kaitinimo elemento temperatūra svyruoja nuo 370-420°C, kaitinimo platformos temperatūra svyruoja 130-160°C, o spausdinimo erdvės temperatūra vyrauja 70-90°C intervale.
3. Surinkta 3D spausdintuvo konstrukcija, sujungtos Arduin Mega 2560 ir RAMPS 1.4 valdymo plokštės, įdiegta „Marlin“ programinė įranga į spausdintuvą, kurios padėjo atspausdinti norimą detalę iš PEI polimero. Užsiduoti pagrindiniai spausdinimo parametrai: kaitinimo elementas 370°C, kaitinimo platforma 120°C.
4. Atliktas surinkto spausdintuvo ašių judėjimo tikslumo tyrimas, jo metu pastebėta, kad Y ašies judėjimas yra netiksliausias per kaitinimo platformos vidurį, kur įmontuotas Y ašies variklis. X ašies judėjimo tikslumas varijuoja apie 60 μ, tačiau pakėlus X ašį į 50 mm aukštį nuo Z ašies nulinio taško pastebėtas didžiausias tirtas ašies netikslumas. Z ašies tikslumas, lyginant pagal grafikus, yra ganėtinai panašus į X ašies grafiką – Z ašis yra pasiekia didžiausią netikslumą, kuomet jai tenka atlikti judesį 50 mm atstumu nuo savo nulinio taško.
5. Atlikta ekonominė spausdintuvo ir pačios spausdinimo kainos analizė. Sudėjus visas įsigytas dalis bei įvertinus žmogaus darbą, gaunama, kad spausdintuvo savikaina yra apie 1000 eurų. Skaičiuojant spausdinimo proceso kainą, kuomet naudojama PEI medžiaga, buvo sudarytas matematinis modelis, kurio pagalba galima apskaičiuoti įvairių detalių spausdinimo paslaugos kainą. Buvo skaičiuojama 35 x 20 x 2 mm bandinio kaina ir gauta, kad atspausdintos detalės savikaina būtų 0,58 euro centai. Buvo atliktas palyginimas su galimais paslaugos tiekėjais rinkoje ir išsiaiškinta, kad gauta detalės savikaina yra 7 kartus mažesnė.

Literatūros sąrašas

1. PALMARA G., FRASCELLA F., ROPPOLO I., CHIAPPONE A., A. CHIADO. Functional 3D printing: Approaches and bioapplications. *Biosensors and Bioelectronics*. 2020. Vol. 175, no. 112849. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112849>.
2. What is the role of Slicing in 3D printing? [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://fabheads.com/blogs/what-is-the-role-of-slicing-in-3d-printing/>
3. DASA A., CHATHAMA C. A., FALLONA J. J., ZAWASKIA C. E., GILMERA E. L., WILLIAMS C. B., M. J. BORTNERA. Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers. *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 34, no. 101218. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101218>
4. 22IDEX [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://visionminer.com/products/22idex>
5. O'NEILL, Benedict. 3D print speed: What it is and why it matters [interaktyvus]. 2022-07-25 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://www.wevolver.com/article/3d-print-speed-what-it-is-and-why-it-matters>
6. AON M2+ [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://www.aon3d.com/aon-m2-industrial-3d-printer/>
7. FUNMAT PRO 610HT [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://www.intamsys.com/funmat-pro-610-ht-3d-printer/>
8. FUNMAT HT [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://www.intamsys.com/funmat-ht-3d-printer/>
9. ARGO 500 [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/roboze-argo-500/>
10. SERTOGLU, Kubi. ROBOZE LAUNCHES THE ARGO 1000 3D PRINTER – TECHNICAL SPECIFICATIONS AND PRICING [interaktyvus]. 2021-07-13 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://3dprintingindustry.com/news/roboze-launches-the-argo-1000-3d-printer-technical-specifications-and-pricing-192736/>
11. INDUSTRY F421 [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://3dgence.com/3d-printers/industry-f421/>
12. Apium P220 [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://apiumtec.com/en/industrial-3d-printer>
13. PEEK-300 [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://www.creatbot.com/en/creatbot-peek-300.html>
14. Dua R., Rashad Z., Spears J., Dunn G., M. Maxwell. Applications of 3D-Printed PEEK via Fused Filament Fabrication: A Systematic Review. *Polymers (Basel)*. 2021, vol. 13, no. 4046. [žiūrėta 2022-10-10]. ISSN 2073-4360.
15. DING S., ZOU B., WANG P., H. DING. Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM. *Polymer Testing*. 2019, vol. 78, no. 105948. [žiūrėta 2022-10-10]. ISSN 0142-9418
16. EL MAGIRI Anouar, VANAEI Saeedeh, Sébastien VAUDREUIL. Preparation and characterization of poly(ether ether ketone)/poly(ether imide) [PEEK/PEI] blends for fused

- filament fabrication. *Journal of Materials Science*. 2021, vol. 56, no. 25, p. 14348–14367, [žiūrėta 2022-10-11]. ISSN 0022-2461.
17. WEIJIE LI, LIN SANG, XIGAO JIAN, JINYAN WANG. Influence of sanding and plasma treatment on shear bond strength of 3D-printed PEI, PEEK and PEEK/CF. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020, vol. 100, no. 102614. [žiūrėta 2022-10-10]. ISSN 0143-7496
 18. WANG Z., YIN X., L. WANG. An experimental investigation on the tensile properties of PEEK-PEI sandwich structures prepared via fused filament fabrication. *High Performance Polymers*. 2022, [žiūrėta 2022-10-10]. Prieiga per: doi:10.1177/09540083221126623.
 19. PEI WANG, HONGJIE ZHANG, YITAO CAO, AIGANG PAN, WEICHAO WU. Additively manufactured short carbon fiber reinforced polyetheretherketone by coating polyetherimide at the interface using fused filament fabrication. *JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE*. 2022, vol. 139, no. e52438. [žiūrėta 2022-10-10]. ISSN 0021-8995.
 20. DOMINGUES T., CACHAÇO A., SOUSA P. J., CARNEIRO F., SILVA J., ESLAMI S., P. M. G. P. MOREIRA. Development of a custom setup for additive manufacturing of high-performance thermoplastics
 21. Steps Per mm Calculator [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-26]. Prieiga per: <https://www.maxzprint.com.au/stepps-per-mm-calculator/>
 22. Stepper Motors Calculator [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-27]. Prieiga per: <https://zalophusdokdo.github.io/StepperMotorsCalculator/en/index.html>
 23. Projektuotojas inžinierius. Elektros ir energetikos inžinerija [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://www.manoalga.lt/atlyginimu-informacija/elektros-ir-energetikos-inzinerija/projektuotojas-inzinerius?search=1>
 24. ULTEM 1010 [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://www.3djake.com/intamsys/ultem-1010>
 25. Visuomeninio tiekėjo elektros planai [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-29]. Prieiga per: <https://ignitis.lt/lt/elektros-kainos>
 26. Polyetherimide [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-29]. Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyetherimide>
 27. PSU 24V 240W (assembly) [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-29]. Prieiga per: <https://www.prusa3d.com/product/psu-24v-240w-assembly/>