



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybių
tyrimas plastiko prototipams X įmonėje gaminti**

Baigiamasis magistro projektas

Živilė Marčionienė

Projekto autorė

Asist. dr. Laura Gegeckienė

Vadovė

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybių tyrimas plastiko prototipams X įmonėje gaminti

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Živilė Marčionienė
Projekto autorė

Asist. dr. Laura Gegeckienė
Vadovė

Asist. dr. Darius Pauliukaitis
Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Živilė Marčionienė

Adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybių tyrimas plastiko prototipams X įmonėje gaminti

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.

Živilė Marčionienė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei) – Živilei Marčionienei

1. Projekto tema –

Adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybių tyrimas plastiko prototipams X įmonėje gaminti

(Lietuviškai)

Research of Application Possibilities of Additive Manufacturing Technologies for Producing Plastic Prototypes at Company X

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybes plastiko prototipams X įmonėje gaminti.

Uždaviniai:

- įvertinti esamą technologiją prototipams gaminti ir jos efektyvumą įmonėje X;
- sudaryti adityviosios gamybos proceso technologinių operacijų seką, tinkamą plastiko prototipams gaminti;
- įvertinti tradiciniu ir adityviosios gamybos būdu pagamintų detalių matavimų rezultatus;
- įvertinti ekonominę naudą ir kaštų mažinimo galimybes.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Palyginimui naudojami tos pačios rūšies plastikai arba plastikai, kurių parametrai yra panašūs. Matavimai atliekami detalėms be papildomo paviršiaus apdirbimo. Matavimo metu neatsižvelgiama į prototipų bandymus esant tam tikroms apsvukoms. Tradiciniam CNC frezavimui naudojama HASS VF 3SS frezavimo staklės. Adityviajai gamybai naudojamas Original Prusa Mini+ spausdintuvas. Paviršiaus deviacija matuojama naudojant Creaform MetraScan Black Elite 3D skenerį.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorė

Živilė Marčionienė

2024-09-30

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vadovė

Laura Gegeckienė

2024-09-30

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovė

Regita Bendikienė

2024-09-30

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Marčionienė Živilė. Adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybių tyrimas plastiko prototipams X įmonėje gaminti. Magistro baigiamasis projektas, vadovė asist.dr. Laura Gegeckienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: adityvi gamyba, plastiko prototipai, CNC frezavimas, 3D spausdinimas, FDM spausdinimas, efektyvumas, matavimai, kokybė, sąnaudos, ekonominis vertinimas, procesai, AM pritaikymas.

Kaunas, 2025. 69 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame darbe vertinamos adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybės plastiko prototipams X įmonėje gaminti. Šiuo tikslu siekiama iširti, ar AM gali būti efektyvi alternatyva esamai prototipų gamybos technologijai, kurioje naudojamos CNC frezavimo staklės *HASS VF 3SS*. Galimybės vertinamos atsižvelgiant į gamybos laiką, gaminių kokybę, projektavimo lankstumą ir gamybos kaštus bei medžiagų panaudojimo efektyvumą. Pirmoje darbo dalyje atlikta literatūros apžvalga, kurioje nagrinėjamos tradicinės ir hibridinės gamybos technologijos bei AM privalumai ir trūkumai. Taip pat aprašoma įmonėje X naudojama CNC frezavimo technologija ir jos operacijų seka. Nustatyta, kad nors CNC technologija gaminami prototipai atitinka aukštus kokybės reikalavimus, jai reikia didelių sąnaudų ir lankstumo. AM technologija, tokia kaip FDM spausdinimas, siūlo alternatyvą, leidžiančią sumažinti medžiagų švaistymą, pagreitinti procesus ir kartu išlaikyti kokybę. Darbo metu sudaryta AM proceso technologinių operacijų seka, pritaikyta plastiko prototipams gaminti. Ši seka apima 3D modelio kūrimą CAD aplinkoje, modelio optimizavimą *PrusaSlicer* programine įranga ir detalės gamybą naudojant *Original Prusa Mini+ 3D* spausdintuvą. Darbe naudojami eksperimentiniai tyrimai parodė, kad AM technologija gali užtikrinti pakankamą prototipų kokybę, o joms gaminti trukmė ir kaštai yra daug mažesni nei gaminant CNC frezavimo staklėmis. Be to, projekte pateikiamas bendrasis CNC frezavimo įrangos efektyvumo skaičiavimas, naudojant pastarųjų vienerių metų duomenis, surinktus iš prieinamų gamybos duomenų šaltinių. Taip pat lyginamos CNC frezavimo būdu ir AM technologija pagamintų detalių fizinės savybės ir atlikti skirtingi matavimai, tam kad nustatyti paviršiaus šiurkštumo, kontūrų, kietumo bei paviršiaus deviacijos skirtumus tarp jų. Ekonominio vertinimo rezultatai parodė, kad įmonei X galėtų būti naudinga integruoti AM technologiją į gamybos procesus, nes tai leistų optimizuoti prototipų gamybą ir sumažinti išlaidas, o sunaudojamų medžiagų kiekį sumažinti net 14 kartų. Darbo pabaigoje pateikiamos 4 išvados pabrėžiančios AM technologijos potencialą pakeisti tradicinę technologiją įmonėje X plastiko prototipams gaminti.

Marčionienė Živilė. Research of Application Possibilities of Additive Manufacturing Technologies for Producing Plastic Prototypes at Company X. Master's Final Degree Project, supervisor assist.prof.dr. Laura Gegeckienė; 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: additive manufacturing, plastic prototypes, CNC milling, 3D printing, FDM printing, efficiency, measurements, quality, costs, economic evaluation, processes, AM application.

Kaunas, 2025. 69 p.

Summary

This master's thesis evaluates the possibilities of applying additive manufacturing technology to produce plastic prototypes at company X. The project aims to investigate whether AM can be an effective alternative to the existing prototype production technology, which uses CNC milling machines *HASS VF 3SS*. The possibilities are assessed by production time, quality, design flexibility, production costs, and the efficiency of material use. The first part of the work includes a literature review, which examines the advantages and disadvantages of traditional manufacturing technologies and AM. The CNC milling technology used by company X is also evaluated. It was found that although prototypes produced using CNC technology meet high-quality requirements, they require high costs and flexibility. AM technology, such as FDM printing, offers an alternative that allows reducing material waste, speeding up processes, and maintaining quality at the same time. During the work, a sequence of technological operations of the AM process was created, and adapted to the production of plastic prototypes. This sequence includes the creation of a 3D model in a CAD environment, optimization of the model using PrusaSlicer software, and production using the *Original Prusa Mini+* 3D printer. Various experimental studies used in the work have shown that AM technology can ensure sufficient quality of prototypes, and their production time and costs are significantly lower than when produced by CNC milling machines. In addition, the project provides a calculation of the overall efficiency of CNC milling equipment, using data from the last year, collected from available production data sources. The physical properties of parts produced by CNC milling and AM technology are also compared and different measurements are performed to determine the differences in surface roughness, contours, hardness, and surface deviation. The results of the economic assessment showed that it could be beneficial for company X to integrate AM technology into production processes, as this would allow optimizing prototype production and reducing costs. At the end of the work, 4 conclusions are presented, emphasizing the potential of AM technology to change traditional plastic prototype production practice at company X.

Turinys

| | |
|--|-----------|
| Lentelių sąrašas | 9 |
| Paveikslų sąrašas | 10 |
| Santrumpų ir terminų sąrašas | 11 |
| Įvadas..... | 12 |
| 1. Technologijų prototipams gaminti apžvalga..... | 14 |
| 1.1. Tradiciniai metodai prototipams gaminti | 14 |
| 1.2. Prototipų gamybos iššūkiai..... | 15 |
| 1.3. Adityviosios gamybos principai ir taikymas pramonėje | 16 |
| 1.3.1. AM istorija ir tobulinimas | 16 |
| 1.3.2. Adityviosios gamybos sritys..... | 17 |
| 1.3.3. Adityviosios gamybos technologijos ir medžiagos | 17 |
| 1.3.4. Adityviosios gamybos privalumai ir trūkumai | 19 |
| 1.4. CNC frezavimo ir 3D spausdinimo technologijų hibridas | 20 |
| 1.5. Adityviosios gamybos palyginimas su tradicinėmis gamybos technologijomis | 21 |
| 1.6. AM prototipų kokybė | 23 |
| 1.7. Pagrindinės naudojamos gamybos technologijos prototipams gaminti įmonėje X..... | 23 |
| 1.8. Naudojamos medžiagos prototipams gaminti | 24 |
| 1.9. Technologinių operacijų seka ir gamybos proceso kontrolė | 25 |
| 1.9.1. Proceso efektyvumas ir trūkumai | 25 |
| 1.9.2. Įmonės poreikiai | 26 |
| 1.10. Skyriaus apibendrinimas | 27 |
| 2. Bandinių aprašymas ir tyrimo metodologija | 28 |
| 2.1. Bendrojo įrangos efektyvumo (OEE) vertinimo metodika..... | 28 |
| 2.2. Bandymo prototipo aprašymas | 28 |
| 2.3. Gamybos technologijų ir įrangos pasirinkimas | 30 |
| 2.4. Bandinių medžiagų savybės | 32 |
| 2.4.1. Frezuotos detalės medžiagos savybės | 32 |
| 2.4.2. 3D spausdintos detalės medžiagų savybės | 33 |
| 2.4.3. Pasirinktų medžiagų palyginimas..... | 34 |
| 2.5. Bandinio apdirbimas CNC frezavimo staklėmis | 35 |
| 2.6. AM proceso technologinių operacijų sekos sudarymas ir bandinio spausdinimas | 36 |
| 2.6.1. AM dizaino kūrimo etapas | 36 |
| 2.6.2. Spausdinimo parametrų pasirinkimas..... | 37 |
| 2.6.3. AM technologinių operacijų pasirinkimas plastiko prototipams gaminti | 38 |
| 2.7. Matavimų metodika ir įranga | 39 |
| 2.7.1. Matavimų tikslas ir standartai | 39 |
| 2.7.2. Matavimų aplinka ir įranga | 40 |
| 2.8. Skyriaus apibendrinimas | 41 |
| 3. Gamybos proceso efektyvumo ir prototipo detalių matavimų vertinimas..... | 42 |
| 3.1. Bendrojo CNC frezavimo įrangos efektyvumo (OEE) vertinimas..... | 42 |
| 3.1.1. Prieinamumo rodiklio skaičiavimas | 42 |
| 3.1.2. Našumo efektyvumas ir kokybės rodiklių skaičiavimas | 46 |
| 3.2. Medžiagų panaudojimo bandiniams efektyvumo palyginimas | 48 |
| 3.3. Gamybos trukmės efektyvumo vertinimas | 48 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.4. | Tradiciniu būdu ir adityviosios gamybos metodu pagamintų detalių matavimų rezultatai..... | 49 |
| 3.4.1. | Paviršiaus šiurkštumo matavimų rezultatai | 49 |
| 3.4.2. | Kontūrografo matavimų rezultatai | 51 |
| 3.4.3. | Mikroskopo tyrimai ir rezultatai..... | 53 |
| 3.4.4. | Paviršiaus kietumo matavimų rezultatai..... | 54 |
| 3.4.5. | 3D skenavimo rezultatai | 56 |
| 3.5. | Skyriaus apibendrinimas | 57 |
| 4. | Ekonominės naudos vertinimas..... | 59 |
| 4.1. | Įmonės X biudžeto apribojimai | 59 |
| 4.2. | Įmonės X finansinių rodiklių vertinimas 2019-2023 metais | 59 |
| 4.3. | Plastiko atliekų kiekis ir tvarkymas..... | 60 |
| 4.3.1. | Plastiko sunaudojimas įmonėje X | 61 |
| 4.3.2. | Tvarumas ir atliekų valdymas įmonėje..... | 61 |
| 4.4. | CNC frezavimo ir 3D spausdinimo pradinių išlaidų palyginimas..... | 63 |
| 4.5. | Skyriaus apibendrinimas | 63 |
| | Išvados | 64 |
| | Literatūros sąrašas | 65 |
| | Priedai..... | 70 |
| 1 | priedas. Detalės brėžinys | 70 |
| 2 | priedas. CNC frezavimo programos CAMWorks nuotraukos | 71 |
| 3 | priedas. Bandinių masė (g) | 72 |
| 4 | priedas. Frezuotos detalės šiurkštumo matavimo nuotraukos | 73 |
| 5 | priedas. 3D spausdintos detalės šiurkštumo matavimo nuotraukos | 74 |
| 6 | priedas. Įmonės X išlaidos medžiagoms (2021-2024 m.) | 75 |
| 7 | priedas. Detalės gamybai CNC staklėmis naudotų įrankių kainos [55] | 84 |

Lentelių sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 lentelė. Keturių inovacijų tobulinimo etapų palyginimas [12]..... | 16 |
| 2 lentelė. Adityviosios gamybos technikos [16] | 18 |
| 3 lentelė. <i>Sustarin H natural</i> techniniai duomenys [44] | 32 |
| 4 lentelė. <i>Prusament PLA Prusa Orange</i> medžiagos savybės [45] | 33 |
| 5 lentelė. 3D atspausdintų bandomųjų mėginių testavimo mechaninės savybės [45] | 33 |
| 6 lentelė. Įrankių nusidėvėjimas apdirbimo metu | 36 |
| 7 lentelė. 3D spausdinimo sluoksniai ir resursų panaudojimas..... | 38 |
| 8 lentelė. Matavimo įrenginių sąrašas | 40 |
| 9 lentelė. Metinis CNC frezavimo staklių darbo ir sustojimų laikas | 44 |
| 10 lentelė. Metinis prastovų skaičiavimas | 45 |
| 11 lentelė. Metinio užimtumo ir prieinamumo vertės skaičiavimas | 45 |
| 12 lentelė. Metinis CNC frezavimo staklių darbo įprastasis ir standartinis laikas | 46 |
| 13 lentelė. Realaus ciklo laiko ir metinio našumo efektyvumo skaičiavimas..... | 46 |
| 14 lentelė. Šiurkštumo matavimo rezultatai..... | 50 |
| 15 lentelė. Detalių kietumo matavimų rezultatai | 55 |
| 16 lentelė. Įmonės X apyvarta..... | 59 |
| 17 lentelė. Įmonės finansinių rodiklių dinamika..... | 60 |
| 18 lentelė. Įsigyto plastiko kiekis prototipams gaminti | 61 |
| 19 lentelė. Pradinių išlaidų palyginimas | 63 |

Paveikslų sąrašas

| | |
|---|----|
| 1 pav. AM ir CNC palyginimas [31]..... | 22 |
| 2 pav. Įmonėje X gaminami prototipai | 24 |
| 3 pav. Technologinių operacijų seka plastiko prototipams gaminti įmonėje X..... | 25 |
| 4 pav. Prototipų gamybos įvairovė įmonėje X..... | 29 |
| 5 pav. Krumpliaračių bandymas [39]..... | 29 |
| 6 pav. Nuotolinė robotizuota sistema (kliento nuotrauka) | 30 |
| 7 pav. Prototipo 3D modelis | 31 |
| 8 pav. 3D spausdinta detalė (kairėje) ir CNC frezuota (dešinėje)..... | 31 |
| 9 pav. Bandinių medžiagų savybių palyginimas..... | 34 |
| 10 pav. Frezavimo staklėse tvirtinamo prototipo laikiklis..... | 35 |
| 11 pav. Bandinio gamybos laikas CNC frezavimo staklėmis..... | 35 |
| 12 pav. <i>PrusaSlicer</i> modelio sluoksniai..... | 37 |
| 13 pav. Užpildo intensyvumas priklausomai nuo užpildo tankio [46] | 38 |
| 14 pav. AM operacijų seka [21]..... | 39 |
| 15 pav. Galimas staklių darbo laikas (2023 m. 11 mėn. – 2024 m. 10 mėn.)..... | 42 |
| 16 pav. Pagamintų detalių kiekis (2023 m. 11 mėn. – 2024 m. 10 mėn.)..... | 43 |
| 17 pav. Brokuotos produkcijos kiekis (2023 m. 11 mėn. – 2024 m. 10 mėn.)..... | 43 |
| 18 pav. Metinis efektyvumo rodiklių palyginimas | 47 |
| 19 pav. Medžiagų panaudojimo efektyvumo palyginimas | 48 |
| 20 pav. CNC frezavimo ir 3D spausdinimo gamybos trukmės palyginimas | 49 |
| 21 pav. <i>Mitutoyo SJ-210</i> šiurkštumo matuoklis..... | 49 |
| 22 pav. CNC frezuotos ir 3D spausdintos detalių paviršiaus šiurkštumo matavimų reikšmių grafikas | 50 |
| 23 pav. <i>Mitutoyo CV 2100M4</i> kontūrografas..... | 51 |
| 24 pav. CNC frezuotos (a) ir 3D spausdintos (b) detalių kontūrų matavimų rezultatai..... | 51 |
| 25 pav. Matmenys 3D modelyje | 52 |
| 26 pav. Detalių išorinių kampų palyginimas su 3D modelio matmenimis | 53 |
| 27 pav. <i>Mitutoyo Quick Vision 202</i> mikroskopas | 53 |
| 28 pav. CNC frezuotos (a) ir 3D spausdintos (b) detalių vaizdas po mikroskopu..... | 54 |
| 29 pav. <i>Mitutoyo 811-019</i> paviršiaus kietumo matuoklis | 54 |
| 30 pav. Plastikų kietumo matavimų palyginimas | 55 |
| 31 pav. Frezuotos detalės atitikimas 3D modeliui | 56 |
| 32 pav. 3D spausdintos detalės atitikimas 3D modeliui | 56 |
| 33 pav. Prognozuojamas plastiko gamybos augimas [13] | 60 |
| 34 pav. Įmonės X šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo apžvalga (2023 m.) pagal <i>EcoVadis</i> ataskaitą | 62 |

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AM – adityvioji gamyba;

FDM – sulydomojo nusodinimo modeliavimas;

FFF – sulydomasis siūlų formavimas;

RP – greitas prototipavimas;

OEE – bendrasis įrangos efektyvumas.

Terminai:

Spausdinimo galvutė – yra sukurta taip, kad išlydytą plastiką išspaustų ir sluoksniais padėtų ant spausdinamo paviršiaus.

Anizotropinis elgesys – yra medžiagos savybė, kai fizinės ar mechaninės savybės skiriasi priklausomai nuo krypties, kuria jos matuojamos.

Įvadas

Adityviosios technologijos tyrimai tampa vis reikšmingesni gamybos pramonei, nes jų potencialas nuo pagrindų keisti nusistovėjusius tradicinius gamybos metodus jau ankstyvose kūrimo stadijose pabrėžė šių technologijų išskirtinumą. Atsiradus pirmiesiems 3D spausdinimo įrenginiams, tokie tyrimai pirmiausiai buvo skirti parodyti praktinę naudą, kuriant sudėtingas detalių formas. Tačiau dėl riboto medžiagų prieinamumo ir technologinių apribojimų AM buvo sunku varžytis su tradiciniais gamybos būdais, todėl tai stabdė šios technologijos įsitvirtinimą. Ankstyvosiose plėtojimo stadijose tyrimai daugiausiai buvo orientuoti į greitą prototipų kūrimą ir nedidelio masto detalių gamybą, kur įprasti gamybos metodai buvo per lėti ar per brangūs. Pasikeitus rinkos poreikiams, į kuo labiau individualizuotus gaminius, vystant tyrimus ir didėjant medžiagų bei technologijų pasirinkimui, AM sparčiai išsiplėtė į pramonės sektorius tokius kaip automobilių pramonė, medicina, elektronika, aviacijos ir kosmoso inžinerija. Šiuose sektoriuose detalių gamybai keliami aukšti tikslumo ir kokybės reikalavimai, kuriuos anksčiau patenkinti galėjo tik tokios technologijos kaip CNC. Dabar AM užimta svarbią vietą greitoje individualizuotų detalių gamyboje. Be to, platus medžiagų pasirinkimas, įskaitant sustiprintus kompozitus, metalo miltelius, biomedžiagas ar polimerus, leido šiai technologijai konkuruoti ne tik prototipų, bet ir masinės gamybos srityje. AM technologijos gebėjimas gaminti detales sluoksniu po sluoksnio pakeitė požiūrį į prototipų kūrimą, suteikdama lankstumo ir galimybę sumažinti išteklių švaistymą. Tradicinis CNC metodas pasižymi dideliu tikslumu ir tinka standartizuotai didelių apimčių gamybai, tačiau yra ribotas dėl reikiamo didelio ploto įrangai, medžiagų švaistymo ir technologinio lankstumo trūkumo. AM sugebėjo pasiūlyti ekonomišknesnius ir aplinkai draugiškesnius sprendimus. Šie privalumai reikšmingi plastiko prototipams gaminti, kur AM gali sumažinti atliekų kiekį, pagreitinti gamybos procesą ir kurti inovatyvius sprendimus, prisidedančius prie pramonės plėtros ir tvarių sprendimų, kurie aktualūs sprendžiant globalią plastiko atliekų problemą pasaulyje, mažinant jų kaupimąsi sąvartynuose ir vandenynuose bei kuriant žiedinės ekonomikos principus atitinkančius gamybos modelius. Nepaisant AM potencialo, jos įtraukimas į konkrečius gamybos procesus įmonėse besiremiančiose tradiciniu CNC metodu, vis dar kelia klausimų. Tai lemia ne tik įmonės technologinio pasirengimo ir žinių lygis, bet ir investicijos, reikalingos tokių technologijų įvedimui į gamybos sistemą. Tyrimo problema – kaip efektyviai ir ekonomiškai AM technologijos gali būti įdiegtos į esamus gamybos procesus įmonėje X, kad būtų užtikrintas tiek technologinis, tiek ekonominis efektyvumas. Šios problemos aktualumą lemia nuolat didėjantis poreikis greitiems, individualizuotiems ir ekonomiškiesiems sprendimams, kuriais siekiama atitikti įmonės X klientų poreikius. Nors AM technologijos potencialas yra plačiai nagrinėjamas mokslinėje literatūroje, joms praktiškai pritaikyti konkrečiose gamybos įmonėse reikia papildomų tyrimų. Svarbu pabrėžti, kad ekonominio efektyvumo ir technologinio pritaikomumo vertinimas AM gamybos procese ne tik suteiks naudingos informacijos įmonei X, bet ir prisidės prie bendro žinių apie AM taikymo galimybes praktikoje gilinimo. Šie tyrimai galėtų tapti pavyzdžiu kitoms įmonėms, kurios ieško būdų optimizuoti savo gamybos procesus, sumažinti kaštus, tapti konkurencingoms sparčiai besivystančiose rinkose, kur šiuolaikinis verslas siekia derinti ekonominę naudą su atsakomybe aplinkai ir išteklių tausojimu.

Tikslas: ištirti adityviosios gamybos technologijos taikymo galimybes plastiko prototipams X įmonėje gaminti.

Uždaviniai:

1. įvertinti esamą technologiją prototipams gaminti ir jos efektyvumą įmonėje X;
2. sudaryti adityviosios gamybos proceso technologinių operacijų seką, tinkamą plastiko prototipams gaminti;

3. įvertinti tradiciniu ir adityviosios gamybos būdu pagamintų detalių matavimų rezultatus;
4. įvertinti ekonominę naudą ir kaštų mažinimo galimybes.

Hipotezė: Adityvioji gamyba (3D spausdinimas) gali efektyviai pakeisti CNC frezavimą plastiko prototipams gaminti įmonėje X, sumažindama gamybos kaštus, sutrumpindama laiką ir pagerindama gaminių projektavimo lankstumą, neprarandant kokybės.

1. Technologijų prototipams gaminti apžvalga

Technologijų pasirinkimas gamybos įmonėse lemia efektyvius gamybos procesus, įmonės kaštus ir galutinio produkto kokybę. Tradiciniai gamybos metodai egzistuoja jau šimtmečius, tačiau turi trūkumų, susijusių su medžiagų švaistymu. Norint pradėti gamybą, tradiciniams gamybos metodams reikia pradinės formos arba ruošinių [1]. Kadangi šiuolaikinė pramonė siūlo platų technologinių sprendimų pasirinkimą, įmonėms būtina kruopščiai įvertinti daugelį kriterijų prieš pasirenkant tinkamiausią gamybos būdą. Tai apima gamybos apimtis, gaminio sudėtingumą, kokybės standartus, reikalavimus medžiagoms, rinkos poreikį ir kitus svarbius veiksnius. Nepaisant didelių pažadų, daugelis įmonių susiduria su problemomis, užbaigiant pažangių technologijų projektus, integruojant naujas technologijas į savo veiklą, plėtojant prototipus, nesulaukiant numatyto revoliucinio pokyčio ir apskritai neišsprendžiant problemų su naujomis technologijomis taip, kaip tikėtasi [2]. Tinkamai pritaikius technologijas, tokias kaip CNC frezavimas ir / ar adityvioji gamyba (AM), dar žinoma kaip 3D spausdinimas, galima optimizuoti gamybos procesus, išlaikyti gaminių kokybę, sumažinti atliekų kiekį, pagerinti sąlygas darbuotojams ir padidinti konkurencingumą. Didėjant individualizuotos gamybos ir prototipų poreikiui, įmonės ieško sprendimų, kurie galėtų užtikrinti lankstumą, greitį ir kartu efektyvumą. Technologijų tarpusavio derinimas ir universalumas gamybos įmonėse yra pagrindiniai sėkmingo veikimo principai.

1.1. Tradiciniai metodai prototipams gaminti

Apdirbimo pramonėje fizinė daikto išraiška visada turėjo didelę reikšmę produktų kūrimo procese. Pirmiausia, tai leidžia idėjas ir jų dizainą paversti tokia forma, kuri padeda geriau suprasti viziją, atliekamas funkcijas ar daikto formą. Tai svarbu, kai siekiama pademonstruoti idėjos veikimo principą. Prototipai suteikia galimybę patikrinti produkto funkcionalumą realiomis sąlygomis, įvertinant galimus trūkumus bei privalumus. Ankstyvoje kūrimo stadijoje nustatyti dizaino trūkumai ar problemos padeda išvengti didesnių klaidų ir išlaidų vėlesnėje gamyboje. Vis dažniau prototipams kurti naudojama virtuali realybė (VR), leidžianti beveik be apribojimų modeliuoti prototipų dydžius [3]. Tačiau, nors VR prototipai turi daug privalumų, jie nesuteikia fizinio pojūčio, o jiems kurti reikia daug laiko, išteklių ir žinių. Dėl prieinamumo, technologinių galimybių ir didėjančio medžiagų pasirinkimo, apdirbimo pramonė vis daugiau dėmesio skiria AM technologijoms.

Prieš atsirandant automatinėms staklėms, gamybos pramonė naudojo mechaninius įrankius. Rankomis apdirbamos buvo tokios medžiagos kaip molis, plastikas, putplastis ar medis. Dėl rankinio darbo gamybos pramonė buvo apribota, nes žmogaus rankomis atliekamas darbas negalėjo pasiekti didelio tikslumo ar pagaminti sudėtingų formų. Be to, gamybos procesas užtrukdavo ilgai, o brokuotos produkcijos kiekis buvo didesnis, todėl gamintojai dažnai nesugebėdavo įgyvendinti klientų poreikių per nustatytą laiką. Tobulėjant technologijoms, ir plečiantis pramonei, prototipams gaminti pradėti taikyti mechaninio apdirbimo metodai, tokie kaip frezavimas, tekinimas, gręžimas, kurie leido prototipus gaminti iš metalų, kietų plastikų ir panašių medžiagų. 1952 m. Masačusetso technologijos institutas, finansuojamas Jungtinių Amerikos Valstijų, pristatė pusiau automatines gamybos stakles (angl. *Numerical Control*, NC), skirtas Amerikos oro pajėgoms. Šis išradimas išsprendė sudėtingų formų apdirbimo problemą, nes padidino gamybos tempą ir tikslumą. Tačiau pramonė šiuo išradimu neapsiribojo – 1970 m. įvyko revoliucinis pokytis, kai buvo pristatytas kompiuterinio skaitmeninio valdymo (CNC) įrenginys [4], o atsiradus kompiuteriams ir įvairioms skaitmeninėms programoms, sparčiai išpopuliarėjo skaitmeninis modeliavimas. Kompiuterinis modelis perduodamas į CNC stakles, kurios automatiškai apdirba ruošinį pagal skaitmeninį dizainą.

Iki šių dienų CNC frezavimo technologija išlieka vienu svarbiausių apdirbimo procesų gamybos įmonėse, leidžiančiu labai tiksliai apdirbti ruošinius. Ši technologija naudoja kompiuterinę programinę įrangą, kuri automatiškai valdo įrankių (frezų) judėjimą staklėse, siekiant pašalinti medžiagą nuo ruošinio ir suformuoti reikiamą detalę. Priklausomai nuo staklių sudėtingumo, įrankis juda trijų arba daugiau ašių kryptimis, kol pasiekiamas norimas rezultatas. Šio proceso metu galima sukurti labai sudėtingas ir tikslias formas. CNC ir CAD/CAM technologijų atsiradimas leido smarkiai padidinti produktyvumą, detalių kokybę ir jų sudėtingumą [4, 5]. Pastarąsias technologijas įmonė X naudoja plastiko prototipams gaminti.

S. Rianmora, N. Samorhomb ir V. Chaidilok [6] atliko bandymą, siekiant pagrįsti koncepciją sukurti tarpusavyje sujungiamus akrilo blokelių, naudojant CNC frezavimo stakles prototipams, kuriais integruojamas kietosios medžiagos greitas prototipų (angl. *Rapid Prototyping*, RP) kūrimas. Prototipai buvo kuriami 1:20 mastelio, palyginus su faktiniu produkto dydžiu. Dizaino komanda siekė įvertinti CNC frezavimo staklių efektyvumą gaminant mažo skersmens geometrines formas. Metodas apėmė ruošinio simuliacijos derinimą su įvairiais kintamaisiais, tokiais kaip tempimo stipris, elastingumo modulis, trinties koeficientas ir gravitacijos jėga. Bandymo rezultatai parodė, kad CNC staklės tinka greitam, sudėtingų formų prototipams kurti. Toks metodas užtikrina efektyvų produkto gamybos procesą ir pritaikomumą įvairioms medžiagoms bei formoms.

1.2. Prototipų gamybos iššūkiai

Prototipų gamyba nėra paprastas kūrybinis procesas, kuris leidžia lengvai realizuoti idėjas. Priklausomai nuo finansinių galimybių, gamybos apimčių, projektų sudėtingo ir klientų poreikių, įmonės gali skirtingai organizuoti gamybą prototipams gaminti. Vienos įmonės turi specializuotus įrenginius ar patalpas, skirtas vien prototipams kurti ir kurie nėra naudojami pagrindinei gamybai, o kitose – prototipai kuriami naudojant tuos pačius įrenginius ir įrankius, kaip ir pagrindinei gamybai. Pastarasis atvejis būdingas ir įmonei X. Plačiau apie tai 1.7 skyriuje.

Kuriant prototipus susiduriama su įvairiais iššūkiais, kurie gali turėti įtakos gamybos efektyvumui ar galutinei gaminio kokybei. Tam būtinos specifinės inžinierių ir operatorių, kurie valdo įrenginius, žinios bei įgūdžiai. Nesuderintas produkto dizainas CAD modelyje gali sukelti gamybos problemų, tad galutinis prototipas neatitiks lūkesčių. Labai sudėtingos geometrijos detalės gali būti sunkiai pagaminamos, ypač jeigu CNC staklės turi ribotą pajėgumą ir įrankių galimybes. Sudėtingesnių formų detalių arba daugybės apdirbimo operacijų metu gamybos laikas gali būti ilgas, kas didina išlaidas. Per didelę įrangos apkrova, netinkamos medžiagos ir netinkamai parinkti įrankiai gali sukelti įrangos gedimų.

Pasirenkant medžiagą prototipo gamybai, atsižvelgiama į chemines, mechanines ir termines savybes bei kainą. Netinkamai parinkta medžiaga gali sukelti prototipų trūkumus – jie gali tapti trapūs, deformuoti ar neatlaikyti numatytų apkrovų. Be to, specializuotos medžiagos gali būti brangios. Svarbu numatyti, kaip medžiaga elgsis apdirbimo metu, nes, pavyzdžiui, plastikai, gali deformuotis dėl įtempių ar temperatūros pokyčių, ypač gaminant aukštoje temperatūroje. Jei medžiaga nėra stabili ir įranga nepakankamai tiksli, gali būti sudėtinga pasiekti minimalias leistinas nuokrypas. AM technologijų atveju, pagrindiniai iššūkiai spausdinant kompozitines detales yra pluošto orientacija, sujungimas tarp pluošto ir matricos bei tuštumų susidarymas [7]. Standartų trūkumas neleidžia kurti kokybės užtikrinimo ir kokybės kontrolės strategijų, reikalingų pramoniniam AM sertifikavimui. Kai kuriais atvejais iššūkių kyla dėl spausdintuvo veikimo neprognozuojamumo, defektų atsiradimo

spausdintose dalyse ar paviršiaus šiurkštumo skirtumų [8]. Tradicinė gamyba užtikrina didesnę tikslumą ir paprastumą, o AM technologijai, kuri suteikdama galimybę kurti sudėtingas formas, reikia kompromiso tarp tikslumo ir santykinės kokybės [9]. Dėl biologiškai suderinamų medžiagų trūkumo fotopolimerai turi ribotas taikymo galimybes, nes dauguma jų yra patentuoti ir negali būti lengvai keičiami tarp spausdintuvų. Dedamos pastangos išplėsti šią sistemą naudojant kitas medžiagas, tokias kaip keramika ir metalai [10]. 3D modeliams prototipuoti paprastai naudojami nebrangūs 3D spausdintuvai [11], tačiau medžiagos gali būti naudojamos įvairios.

1.3. Adityviosios gamybos principai ir taikymas pramonėje

1.3.1. AM istorija ir tobulinimas

AM pradėjo vystytis 1980-ųjų pradžioje. Vienas iš pirmųjų svarbių proveržių buvo Čarlzo V. Hulo sukurta stereolitografijos (SLA) technologija 1984-aisiais [1, 7]. Ši technologija pirmoji leido formuoti objektus, naudojant ultravioletinę šviesą tam, kad būtų sukietinta skysta derva [10, 12]. Per pastaruosius dešimtmečius SLA patyrė keturias technologinių inovacijų kartas (žr. 1 lent.), kurios išplėtė šios technologijos naudojimą įvairiose pramonės šakose dėl jos tikslumo ir galimybių kurti sudėtingas formas [7]. Prieš kelerius metus buvo pristatyta CLIP (angl. *Continuous Liquid Interface Production*) technika, leidžianti spausdinti objektus be pertraukų tarp sluoksnių, todėl laiko klausimas, kada ankstesnės SLA proceso kartos taps nebepopuliarios. 2019 m. Haidenas K. Teiloras [12] pasiūlė tūrinės AM techniką, pagrįstą tomografinę rekonstrukcija, kuri remiasi tuo, kad visas šviesai jautrios dervos tūris kietinamas vienu metu, sukant cilindrinį dervos konteinerį, iš kompiuteriu apskaičiuotų šviesos raštų.

1 lentelė. Keturių inovacijų tobulinimo etapų palyginimas [12]

| SLA | Spausdinimo greitis | Sistemos raiška | Spausdinamas dydis | Šviesos šaltinis |
|----------------|---|--|----------------------------------|------------------|
| Skenavimas | Skenavimo greitis: nuo šimtų iki tūkstančių milimetrų per sekundę | Keletas mikronų (~100nm 2PP sistemai) | Nuo dešimčių iki šimtų milimetrų | UV šviesa |
| Projekcija | Dešimtys milimetrų per valandą | Keletas mikronų (dažniausiai daugiau nei 5 mikronai) | Dešimtys milimetrų | UV/matoma šviesa |
| Nepertraukiama | Šimtai milimetrų per valandą | Keletas mikronų (dažniausiai daugiau nei 5 mikronai) | Dešimtys milimetrų | UV/matoma šviesa |
| Tūrinė | Daugiau nei 10^5 mm ³ per valandą | 80~300 mikronų | Dešimtys milimetrų | UV šviesa |

Kita svarbi technologija – FDM – buvo išrasta ir patentuota 1980-ųjų pabaigoje *Stratasys* įkūrėjo Skoto Krampo, kuris taip pat sukūrė kompiuterizuotą gamybos (CAM) programinę įrangą šiam procesui automatizuoti. Paminėtina, kad selektyvusis lazerinis sukepinimas (angl. *Selective Laser Sintering*, SLS) buvo sukurtas Teksaso universitete, Ostine devintojo dešimtmečio viduryje, finansuojant JAV gynybos departamentui. Ši technologija taip pat buvo sparčiai tobulinama plečiant medžiagų taikymo sritis [1, 13]. Iš pradžių 3D spausdinimas buvo dažniausiai naudojamas greitiems prototipams gaminti, tačiau per pastaruosius metus jo pritaikymas išsiplėtė pagrindinių komponentų gamybos [9, 14]. Ilgą laiką buvo taikomos tik kelios AM technologijos, tačiau kiekvienais metais inovacijos plečia šios technologijos naudojimą ne tik inžinerijoje ir projektavime, bet ir mažos bei vidutinės apimties gamyboje [1]. Šios technologijos platesnį taikymą lėmė ankstyvųjų patentų

galiojimo pabaiga, leidusi gamintojams kurti naujus 3D spausdinimo įrenginius. Šie pokyčiai sumažino 3D spausdintuvų kainas, todėl technologija plačiai naudojama mokyklose, namuose, bibliotekose ir laboratorijose [7]. Sparti AM technologijų pažanga yra skatinama tyrimų, kuriais siekiama sumažinti įrangos kainas, padidinti medžiagų įvairovę ir panaudoti sudėtingo dizaino pranašumus įvairiose pramonės srityse. Dėl savo potencialo AM buvo pritaikyta įvairiose pramonės šakose, tokiose kaip aviacijos, automobilių, biomedicinos ir energetikos pramonės [1].

Naujos AM technologijos leidžia viename spausdinimo procese naudoti kelias medžiagas, įskaitant kietą plastiką ir elastomerus [9]. 3D spausdintuvų asortimentas yra gana platus – nuo stalinių spausdintuvų iki įrenginių, galinčių gaminti detales, kurių matmenys kelių metrų. Todėl, renkantis AM technologiją, būtina atsižvelgti į verslo poreikius, įskaitant gamybos apimtį, produktų kokybės reikalavimus ir medžiagų pasirinkimą, kad AM technologijos būtų pritaikytos tinkamai [15].

1.3.2. Adityviosios gamybos sritys

Pagal T. Pereirą, J. V. Kenedį ir J. Potgieterį [8] AM sritys gali būti klasifikuojamos ir apibrėžiamos pagal tris pagrindinius požymius: sudėtingumo pranašumas, individualizavimas ir apimtis. Sudėtingumo pranašumas – tai galutinis geometrinio sudėtingumo lygis ir funkcijų vieta, kurią gali pasiekti tam tikras gamybos metodas. Individualizavimas parodo funkcijų ir individualių variacijų pritaikymo paprastumą, kurį suteikia gamybos technologija, todėl kiekvienas panašus produktas gali būti unikalus. Apimtis nurodo gaminamų detalių kiekį užsakyme ar partijoje, kur gamybos apimtis gali svyruoti nuo vieno iki daugelio vienetų.

Pasak B. P. Konerio, G. Manogharano, A. N. Martof ir kt. [15] tinkami scenarijai investuoti į AM apima:

- Gaminamus aukštos pridėtinės vertės produktus su sudėtinga geometrija;
- Mažos apimties arba vienetinių produktų gamybą;
- RP;
- Produktus, kuriems reikia daug komponentų surinkti į vieną gaminį;
- Gamybos decentralizavimą ir gamybą pagal poreikį.

Be visų išvardintų sričių, AM yra populiarus sprendimas gaminti atsargines dalis, kurių nebegalima įsigyti. Dažnai pasitaiko, kad atnaujinant ar taisant antikvarinius daiktus arba senovinius automobilius, tam tikros dalys yra nebegaminamos – o dažnai reikia būtent tos vienos detalės [14]. Toks AM pritaikymas suteikia galimybę greitai ir ekonomiškai reaguoti į rinkos poreikius.

1.3.3. Adityviosios gamybos technologijos ir medžiagos

AM technologijos apima procesų rinkinį, leidžiantį gaminti sudėtingas 3D struktūras iš įvairių medžiagų. Pirma, kompiuterinis modelis nustato objekto dviejų matmenų skerspjūvio plotą, kuris vėliau gali būti spausdinamas įvairiais metodais, tokiais kaip medžiagos ekstruzija, polimerizacija dervoje, miltelinio sluoksnio suliejimas ir medžiagų purškimas [9, 10, 15]. AM tapo vis svarbesne technologija, o jos rinkos vertė didėja įspūdingu tempu. 2021 m. AM rinkos vertė siekė 13,84 mlrd. JAV dolerių, ir prognozuojama, kad augs 20,8 % metiniu tempu iki 2030 m. Spausdintuvų pristatymų skaičius taip pat sparčiai didėja – 2021 m. buvo pristatyta 2,2 mln. vienetų ir prognozuojama, kad šis skaičius iki 2030 m. pasieks 21,5 mln. vienetų [13]. Šie duomenys patvirtina, kad AM sektorius turi didelį augimo potencialą ir svarbą ateities gamybos rinkoje.

AM apima kelias pagrindines technologijas (žr. 2 lent.), kurios skiriasi pagal gamybos metodą ir naudojamas medžiagas. 2010 m. *Amerikos medžiagų bandymo draugija* (ASTM) sukūrė standartų rinkinį *ASTM F42 for Additive Manufacturing*, kuris AM procesus skirsto į septynias grupes [9, 16].

2 lentelė. Adityviosios gamybos technikos [16]

| Eil. nr. | AM technikos | Funkcijos | Medžiagos |
|----------|--|---|---|
| 1 | Rišiklio purškimas | Naudojama metalinėms detalėms, smėlio formoms ir keramikos gaminiams kurti. Procese rišiklis purškiamas ant miltelių sluoksnio, kuris sukuria norimos formos objektą. Po kiekvieno sluoksnio rišiklis sukietina miltelius. Ši technika yra naudinga gaminant sudėtingas dalis be atraminių konstrukcijų, taip sumažinant medžiagų švaistymą ir gamybos laiką. | Ner. plienas; ABS; PA; PC; Stiklas. |
| 2 | Nukreiptas energijos nusodinimas (angl. <i>Directed Energy Deposition</i> , DED) | DED procese medžiaga, tiekiamą vielos ar miltelių pavidalu, yra naudojama dalims formuoti. | Elektronų pluošto lydymo (EBM) procesas naudoja tik metalus. Naudojami metalai: kobalto-chromo lydiniai ir titanas |
| 3 | Medžiagos ekstruzija (angl. <i>Material Extrusion</i>) | FDM turi didelį potencialą ir veiksmingumą, kai procesas yra tinkamai valdomas. | ABS; Nailonas; PC ir kt. |
| 4 | Medžiagos purškimas (angl. <i>Material Jetting</i>) | Technologija naudojama kuriant itin detalius ir daugiaspalvius objektus. | PP, HDPE, PS, PMMA, PC, ABS, HIPS, EDP. |
| 5 | Miltelių sluoksnio suliejimas (angl. <i>Powder Bed Fusion</i> , PBF) | Tiesioginis metalo lazerinis sukepinimas (DMLS), elektronų pluošto lydymas (EBM), selektyvus šiluminis sukepinimas (SHS), selektyvus lazerinis lydymas (SLM) ir SLS yra dažniausiai naudojamos spausdinimo technikos. PBF metodais medžiagų milteliai yra lydomi ir sujungiami naudojant lazerį arba elektronų pluoštą. | Naudojamos bet kokios miltelinės medžiagos, bet dažniausiai naudojami metalai ir polimerai. |
| 6 | Lakštų laminavimas (angl. <i>Sheet Lamination</i>) | Ultragarso AM (UAM) ir laminuotų objektų gamybos (LOM) procesai yra du pagrindiniai lakštų laminavimo metodai. Ultragarso adityviosios gamybos procese naudojami metaliniai lakštai arba juostos, kurie sujungiami naudojant ultragarso suvirinimą. | Iš esmės bet kokia lakštinė medžiaga, kuri gali būti valcuojama, tinkama šiam procesui. Tai gali būti popierius, plastikas ar kai kurie metalo lakštai. |
| 7 | Fotopolimerizacija vonelėje (angl. <i>VAT Photopolymerisation</i>) | Naudojamas indas su skysta fotopolimerine derva. Fotopolimerizacija gali būti atliekama naudojant vieną lazerį ir optiką, kuriais sukietinama dervą tam tikrose vietose, sluoksnis po sluoksnio formuojant objektą. | VAT polimerizacijos procese naudojami plastikai ir polimerai. |

FDM naudoja termoplastikus, tokius kaip ABS (akrilonitrilo butadeno stirenas) ir PLA (polilaktinė rūgštis), kuriuos galima lengvai įsigyti ir yra ekonomiškai [18]. Išlydyti šie plastikai dedami sluoksniais ant kaitinamos platformos, formuojant galutinį produktą. Tai dažnai naudojama prototipams gaminti ir mažos apimties gamybai [9, 18]. Nepaisant tam tikrų trūkumų, tokių kaip mažesnė raiška ir lėtesnis spausdinimo greitis, palyginti su kitomis AM technologijomis, maža FDM spausdinimo kaina ir prieinamumas padarė ją populiariu pasirinkimu plačiam pritaikymo spektrui [11]. SLA technologija remiasi fotopolimerų kietinimu ultravioletine šviesa, todėl yra populiarūs dėl galimybių gaminti aukštos kokybės ir tikslius objektus [11, 19]. SLS naudoja lazerį, kad sukepinėtų

miltelių pavidalo medžiagas, tokias kaip nailonas ar metalai, tokiu būdu sukuriant tvirtus ir funkcionalių gaminius be atramų [19, 20]. FDM, SLA ir SLS technologijos papildoma viena kita, suteikdamos gamybos įmonėms galimybę pasirinkti tinkamiausią spausdinimo būdą.

Daugelis metalo medžiagų, tokių kaip nerūdijantis plienas, įrankių plienai, kai kurie aliuminio lydiniai, titanas ir jo lydiniai bei nikelio pagrindu gaminami lydiniai, gali būti gaminami naudojant PBF pagrindu veikiančias AM technologijas. PBF leidžia gaminti komponentus su geromis mechaninėmis savybėmis ir sudėtingomis formomis, turinčiomis didelį tikslumą (+/- 0,02 mm). Tačiau šios technologijos yra gana lėtos (iki 105 cm³/val. naudojant keturis lazerius), todėl jos dažniausiai naudojamos mažiems komponentams gaminti. Taip pat atliekami tyrimai dėl skirtingų lazerių naudojimo, pavyzdžiui, femtosekundinių lazerių. Šie itin greitai lazeriai leidžia apdoroti lydinius ir metalus, turinčius aukštą lydymosi temperatūrą (>3000 °C) ir didelį šilumos laidumą (>100 W/mk), tokius kaip volframas, renis ir kai kurios keramikos rūšys [7]. PBF technologijų pažanga ir inovacijos lazerių srityje suteikia galimybių praplėsti pritaikymo galimybes gaminant sudėtingas detales iš metalo, kurios buvo sunkiai įgyvendinamos tradiciniais metodais.

Gamybos sektoriuje plačiausiai naudojamos medžiagų kategorijos 3D spausdinimui yra metalai, keramika, polimerai, biomedžiagos ir išmaniosios medžiagos. Kiekviena iš šių medžiagų turi savo gamybos metodą, nuo kurio priklauso spausdinimo efektyvumas. Metalų 3D spausdinimo technologijos yra labai paklausios automobilių ir aviacijos pramonėje, o keramika, biomedžiagos ir išmaniosios medžiagos turi didelį potencialą biomedicinos pramonėje, o polimerai plačiai naudojami įvairiuose sektoriuose, įskaitant automobilių, aviacijos, meno ir medicinos sritis. AM reikšmingai pakeitė polimerų sintezės sritį, suteikdama išskirtinį tikslumą ir pritaikomumą gaminant įvairias polimerines medžiagas ir kompozitus. Naudojant termoplastinius polimerus, galima kurti sudėtingas struktūras, leidžiančias greitai prototipuoti ir individualizuoti gamybos procesus [21]. 3D spausdinimo technologija nuolat plečia savo galimybes, įskaitant tokias inovacijas kaip 3D spausdinimas naudojant Mėnulio medžiagas, siekiant pritaikyti šią technologiją Mėnulio kolonizacijai [16, 22]. Svarbu paminėti, kad AM naudojami termoplastikai, kuriuos galima perdirbti arba perdirbti pakartotinio kaitinimo būdu, tokie kaip polietilenas, polistirenas, ABS, polikarbonatas, HDPE ir PP [23]. Ateities plėtros kryptys rodo, kad AM taps svarbia technologija ne tik pramoninėje gamyboje, bet ir kosmoso tyrimuose bei infrastruktūros kūrime ekstremaliomis sąlygomis.

1.3.4. Adityviosios gamybos privalumai ir trūkumai

T. D. Ngo, A. Kašaniš, G. Imbalzano ir kt. [7] savo AM apžvalgoje vertino metodus, naudojamus medžiagas, taikymo sritis ir iššūkius. 3D spausdinimas pašalina papildomas išlaidas, susijusias su formų gamyba ir įrankiais individualizuotiems produktams. Todėl masinė identiškių detalių gamyba gali būti tokia pat ekonomiškai, kaip ir individualizuotų detalių gamyba. Perėjimas tarp skirtingų dizainų yra paprastas, su minimaliomis papildomomis sąnaudomis ir be būtinybės specialiam paruošimui. Be to, priedų gamyba turi didelį potencialą masinei sudėtingų geometrijų, pvz., grotelių struktūrų, gamybai, kur tradicinių gamybos metodų, tokių kaip liejimas, pritaikymas yra sudėtingas ir reikia daug laiko bei papildomo apdirbimo.

3D spausdintų detalių prastesnės mechaninės savybės ir anizotropinis elgesys vis dar riboja didelio masto spausdinimo potencialą, todėl būtina optimizuoti 3D spausdinimo modelius, kad būtų valdomas defektų jautrumas ir anizotropinis elgesys. Taip pat spausdinimo aplinkos pokyčiai turi įtakos galutinių produktų kokybei. Pavyzdžiui, mikroskalės 3D spausdinimas susiduria su iššūkiu,

susijusiais su raiška, paviršiaus vaizdu ir sluoksnių sujungimu, todėl kartais reikalingi papildomi procesai. Defektų dydis, orientacija, aštrumas ir vieta AM detalėse gali neigiamai paveikti mechanines savybes. Tai nesiskiria nuo defektų, būdingų tradicinei gamybai, kur defektų tipai yra beveik panašūs: poringumas, įtrūkimai, intarpai, tuštumos, paviršiaus šiurkštumas ir kt. Tačiau AM, be geometrinių netobulumų, gali kilti tūrio neatitikimų, sluoksnių pašalinimo ir nepageidaujamų vidinių paviršių problemų, kurių neįmanoma aptikti naudojant įprastus mechaninius bandymus [8, 9].

Kita svarbi sritis yra kompiuterinės programinės įrangos pažanga modeliavimui ir simuliacijai, siekiant nustatyti mechanines apkrovas AM detalėse, remiantis pasirinktų parametrų deriniais. Inžinieriai siekia naudoti skaičiavimo metodus, kad galėtų planuoti AM procesą. Tačiau norint sukurti pilną simuliaciją, kuri apimtų plačią laiko ir ilgio skalę, tyrėjai teigia, kad reikia įvertinti daugiau nei 130 kintamųjų [8, 9]. Tokių sistemų sudėtingumas parodo, kad dauguma kompiuterinių modelių būtų vykdomi tik didelio našumo skaičiavimo centruose.

1.4. CNC frezavimo ir 3D spausdinimo technologijų hibridas

Gamybos procesas, kuris naudoja keletą skirtingų technologijų, laikomas viena iš pagrindinių technologijų naujausioje pramonės revoliucijoje – Pramonė 4.0. Šis naujas judėjimas skatina išmaniųjų gamybos sistemų ir pažangių informacinių technologijų integraciją [24]. CNC frezavimą ir AM galima naudoti kartu, siekiant sujungti abiejų technologijų privalumus ir sukurti efektyvesnius gamybos procesus. Šis hibridinis metodas panaudoja AM lankstumą ir sudėtingų formų kūrimo galimybes kartu su CNC frezavimo tikslumu ir paviršiaus apdirbimo kokybe. Hibridinės gamybos sistemos integruoja AM, kad pridėtų medžiagą sluoksniais, ir CNC frezavimą, kad vėliau tiksliai pašalintų nereikalingą medžiagą ir užtikrintų gaminio atitikimą paviršiaus reikalavimams. AM leidžia efektyviai naudoti medžiagas, nes jų pridėjama tik tiek, kiek reikia gaminiui formuoti. Tai sumažina atliekas ir leidžia ekonomiškai naudoti brangias medžiagas. Gamybos procesas paprastai prasideda nuo 3D spausdinimo, kad būtų sukurtas bazinis gaminio modelis, o vėliau CNC frezavimas naudojamas tiksliai apdirbti galutinį gaminį. Norint užtikrinti optimalų abiejų technologijų derinimą, reikia gerai išmanyti tiek AM, tiek CNC frezavimo procesus. Gamybos valdymas ir programavimas gali būti sudėtingesnis nei naudojant vieną technologiją. Įmonės, tokios kaip *Hybrid Manufacturing Technologies*, jau gamina hibridines sistemas, kurios integruoja 3D spausdinimo ir CNC frezavimo metodus. RP kūrimas yra bendras terminas kelioms technologijoms, leidžiančioms gaminti komponentus, be kvalifikuotų gamintojų paslaugų. RP naudojami įvairūs metodai: SLA, FDM, LOM, SLS ir kt. [25].

L. Martinezo ir kt. [26] atliktame atvirojo kodo FFF/CNC programinės įrangos tyrime nustatyta, kad naudojant nebrangią frezavimo sistemą, kurią sudaro ant daugiafunkcinio 3D spausdintuvo sumontuota verpstė, panaudojus *Maxwell* kinematinę jungtį ir du atvirojo kodo įrangos sprendimus nustatyta, kad verpstė gali sėkmingai atlikti hibridinį procesą, kuris pagerina paviršiaus šiurkštumo parametrus – daugeliui parametrų pagerinimo koeficientas siekia 10. Taip pat buvo nustatytas paviršiaus šiurkštumo suvienodinimas konstrukcijos ir nusodinimo kryptimis. Sluoksnis po sluoksnio hibrido pritaikymas duoda geresnius paviršiaus šiurkštumo rezultatus, nes sumažintas pjovimo gylis mažina įtempius, temperatūros kilimą, sukuriant itin palankias pjovimo sąlygas.

I. Mertkanas, T. Tezel ir V. Kovanas [27] hibridinės gamybos tyrime lygino PLA ir anglies pluoštu sustiprintos PLA medžiagos paviršiaus kokybę. Nustatyta, kad didėjant gamybos temperatūrai nuo

190 iki 200 °C, paviršiaus kokybė labai pagerėjo. Apdorojant paviršių po kiekvieno sluoksnio padėjimo, jis tampa lygesnis, todėl kitas sluoksnis padedamas tolydžiau.

Hibridinė CNC frezavimo ir 3D spausdinimo technologija siūlo lankstų, efektyvų ir tikslingą gamybos būdą, leidžiantį pasinaudoti metodų stiprybėmis. Tokios hibridinės sistemos yra orientuotos į aviacijos ir kosmoso pramonę, automobilių pramonę, bei medicinos įrangą. Nors hibridinės sistemos gali būti brangios ir sudėtingos valdyti, jos suteikia didelę pridėtinę vertę, kai reikalingas RP, mažos apimties gamyba ir sudėtingų formų gaminiai.

1.5. Adityviosios gamybos palyginimas su tradicinėmis gamybos technologijomis

Nors CNC frezavimas ir 3D spausdinimas yra gana plačiai naudojamos gamybos technologijos, tačiau jos skiriasi pagal veikimo principą, privalumus ir naudojimo sritis. CNC frezavimas plačiai naudojamas metalams, tokiems kaip plienas, aliuminis, titanas ir kt., taip pat medienai, plastikams ir kitoms kietosioms medžiagoms. 3D spausdinimas yra adityvus gamybos metodas, kai medžiaga pridama sluoksniais, naudojant spausdintuvą, kuris formuoja gaminį iš skaitmeninio 3D modelio. AM technologijoje dažniausiai naudojami plastikai, kompozitai, dervos, tačiau taip pat galima naudoti metalo miltelius [7] ar kitokias medžiagas priklausomai nuo spausdinimo technologijos (pvz., SLS, DMLS ir t. t.). Metalų medžiagos AM technologijoje sulaukia didesnio mokslininkų ir pramonės susidomėjimo. Adityvioji metalo komponentų gamyba gali suteikti tam tikrą aplinkosaugos pranašumą, tokių kaip mažesnis atliekų kiekis, kokybės gerinimas, mažesnės teršalų emisijos ir gamyba pagal poreikį [28]. Galimybė viename įrenginyje ir per vieną operaciją pagaminti sudėtingas dalis skatina verslus įsivertinti AM kaip sertifikuotą galutinio vartotojo produktų gamybos techniką [8]. Atlikus atvejo analizę, kurioje buvo lyginami CNC ir AM procesai, nustatyta, kad per visą gyvavimo ciklą medžiagų ir energijos sąnaudos yra mažesnės naudojant AM technologiją [29]. AM medžiagų pasirinkimas didėja, tačiau CNC staklės vis dar yra tinkamesnės kai kurioms kietoms medžiagoms. Šalinant medžiagą nuo ruošinio CNC frezavimo metu susidaro atliekos, kurios gali būti perdirbamos arba išmetamos, o tai didina kaštus ir daro neigiamą poveikį aplinkai. AM naudoja tiek medžiagos, kiek reikia gaminio formavimui, todėl atliekų yra labai mažai arba jų visai nėra, kas daro 3D spausdinimą tvaresne alternatyva.

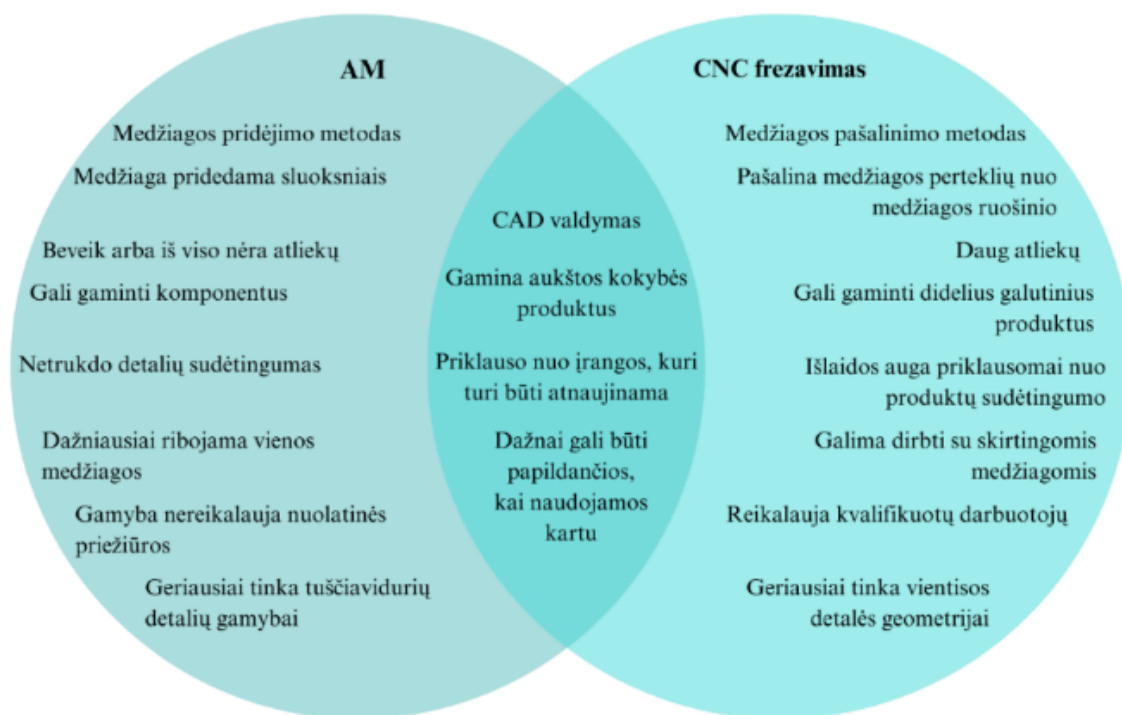
Vertinant greičio parametrus CNC staklės gali būti greitos, ypač gaminant paprastas detales iš vieno ruošinio, tačiau sudėtingi gaminiai, įrangos pritaikymas, įrankių keitimas gali užtrukti ilgiau. Esant detalių įvairovei CNC frezavimui trūksta lankstumo, o AM gali būti lėtesnė spausdinant didelius arba aukšto tikslumo gaminius, tačiau ši technologija gali būti greitesnė, kai reikia gaminti vienetinius arba sudėtingus gaminius ir išvengti laiko švaistymo įrankių keitimui.

Atsižvelgiant į išlaidas, CNC frezavimo kaštai gali būti didesni dėl brangios įrangos, didelių energijos sąnaudų ir būtinybės išlaikyti kvalifikuotus operatorius. Pradiniai kaštai gali būti dideli, bet didelėms partijoms CNC tampa ekonomiškai efektyvus. Pradiniai AM kaštai dažnai yra mažesni, ypač kai reikia gaminti vienetinius arba mažos apimties gaminius. Gerai žinomi produktai yra *Invisalign* dantų plokštelių liejiniai, kuriuos *Align Technologies* gamina naudodami AM stereolitografijos spausdintuvus [8]. Spausdinimo kaštai gali didėti priklausomai nuo naudojamų medžiagų ir spausdinimo laiko.

Gamyboje CNC frezavimas yra ribojamas įrankio prieigos kampų ir geometrijos. Detalių gamyba, su sudėtingomis vidinėmis ertmėmis yra sudėtinga ir gali reikalauti daug operacijų. 3D spausdinimas

siūlo daugiau laisvės formų kūrimui, įskaitant vidines ertmes ir organines formas, kurios būtų sunkiai arba neįmanomai pagamintos CNC frezavimo būdu.

CNC frezavimas geriausiai tinka metalams ir kitoms kietoms medžiagoms apdirbti, taip pat dideliems komponentams gaminti, kai reikia didelio tikslumo, tvirtų medžiagų ir masinės gamybos, o 3D spausdinimas yra geriausias pasirinkimas, kai reikia gaminti sudėtingas formas, prototipus ar mažos apimties produkciją (žr. 1 pav.).



1 pav. AM ir CNC palyginimas [31]

K. L. Ventola [30] pristatė acetabulinę taurę, kuri naudojama klubo sąnario keitimo operacijose, pagamintą naudojant AM technologiją, metalo miltelių sintezės spausdinimo būdu. Ši taurė yra viena implanto dalis, kuri anksčiau buvo gaminama įvairiomis tradicinės gamybos ir formavimo technologijomis. Acetabulinę taurę galima atspausdinti kartu su porėtu paviršiumi vieno spausdinimo metu. Šis gaminys priskiriamas prie masinio sudėtingumo gaminių kategorijos, kurioje dalys turi sudėtingas geometrines formas, tačiau nėra funkcionaliai pritaikomos. Medicinos pramonė pasinaudojo šia gamybos sritimi, kad galėtų gaminti implantus ir protezus, pasitelkdama rentgeno, KT ir MRT nuotraukas.

Daugelyje tyrimų bandyta analizuoti ir palyginti AM ir CNC apdirbimo tvarumo aspektus per produktų gyvavimo ciklus, tačiau trūksta vienodai svarbių produkto, proceso ir sistemos parametrų analizės kiekvienai technologijai. Taip pat pasirinkimą įtakoja skirtingi požiūriai į AM technologijas. *General Electric* daug dėmesio skiria aviacijos sektoriui, kuriame AM technologijos mažina detalių svorį, todėl ši technologija turi didelę pridėtinę vertę. Tuo tarpu *Foxconn*, masiškai gaminanti detales elektronikai, gali matyti, kad AM nėra ekonomiškai perspektyvi didelės apimties gamyboje, kur tradiciniai metodai vis dar yra greitesni ir pigesni [8, 15]. Esamos sprendimų palaikymo sistemos neapima paprastos struktūros, kuri galėtų būti naudojama analizuoti ir lyginti AM ir CNC apdirbimo energijos, sąnaudų ir pagalbinių medžiagų naudojimą [29]. Todėl reikalingas išsamesnis ir struktūrizuotas požiūris į tvarumo analizę abiejose gamybos technologijose.

1.6. AM prototipų kokybė

AM gamintojai bando pritaikyti metodą, kai per vieną spausdinimą gali būti pagamintos kelios detalės ir viena detalė iš partijos yra testuojama mechaniniais bandymais, tačiau kyla susirūpinimas dėl sluoksnių orientacijos, šilumos paveiktų zonų ir nuoseklių defektų atsiradimo, todėl toks metodas negali būti taikomas AM. Sertifikavimas dažniausiai pasiekiamas per gamybos technologijų kartojamumą ir patikimumą, tačiau AM sistemos turi daugiau priklausomų kintamųjų negu tradicinė gamyba [8]. Dėl šios priežasties, norint pasiekti sertifikavimo reikalavimus AM technologijose, būtina detalčiai suprasti visus gamybos proceso parametrus ir jų įtaką galutinei kokybei.

Kokybės tikrinimas AM procese atliekamas naudojant šiuos bandymo metodus: cheminę analizę, mechaninius bandymus, našumo vertinimą, metalurginę analizę, miltelių vertinimą ir neardomuosius bandymus (angl. *Nondestructive Testing*, NDT). Šiuo metu NDT yra pagrindinė tyrimų būdas, kur tokios įmonės kaip *EOS* ir *ARCAM* vietoje kuria stebėjimo sistemas kokybės užtikrinimui. Tačiau kalbant apie NDT metodiką, vis dar reikia atlikti daug darbų, kad būtų sukurta ilgalaikė stebėjimo sistema AM spausdintuvams [8]. Nors dabartinės NDT technologijos leidžia nustatyti paviršiaus ir vidinius defektus, norint efektyviai pritaikyti šią sistemą AM, būtina toliau plėtoti metodikas, kurios galėtų realiuoju laiku stebėti ir analizuoti gamybos proceso metu vykstančius pokyčius.

1.7. Pagrindinės naudojamos gamybos technologijos prototipams gaminti įmonėje X

Įmonė X yra specializuota gamybos įmonė, kuri tiekia individualizuotas metalo ir plastiko detales atsinaujinančios energetikos, medicinos ir gynybos sektoriams. Šiuose sektoriuose itin svarbūs aukšti kokybės ir tikslumo reikalavimai, taip pat nestandartiniai sprendimai. Dėl to įmonės veikla yra orientuota į mažserijinę gamybą, kuriai būdingi nedideli, bet dažnai pasikartojantys užsakymų kiekiai. Prieš pradėdant serijinę gamybą, įmonė vykdo prototipų kūrimą, siekdama užtikrinti produktų atitiktį techniniams ir kokybės reikalavimams. Prototipai siunčiami klientams, kad šie galėtų įvertinti funkcionalumą, dizainą ir kitus aspektus. CNC frezavimas yra pagrindinė technologija plastiko prototipams kurti, tačiau įmonė ieško būdų optimizuoti šį procesą siekiant sumažinti kaštus ir sutrumpinti gamybos laiką.

CNC frezavimo technologija, naudojama įmonėje X, užtikrina didelį tikslumą apdorojant plastiko ruošinius pagal CAD reikalavimus modeliams. Ši technologija geriausiai tinka aukštos kokybės detalių gamybai, kurių reikia minėtiems sektoriams. Pagrindinės naudojamos CNC frezavimo staklės yra *HASS VF 3SS*, pasižyminčios maksimalia 12000 aps/min. veleno greičio riba (SS reiškia angl. *Super Speed* modifikaciją) ir 16,5 m/min. didžiausiu pjovimo greičiu. Staklėse integruotas 30 įrankių pozicijų keitiklis, leidžiantis naudoti įrankius, kurių didžiausias svoris siekia 5,4 kg, ilgis – 330 mm, o skersmuo – iki 127 mm, jei gretimi įrankių lizdai yra tušti. Įrankių keitimas užtrunka ~1,6 s, didžiausia leistina apkrova ant staklių stalo yra 1588 kg, o variklio galia siekia 22,4 kW. Darbo zona apima X ašį – 1016 mm, Y ašį – 508 mm ir Z ašį – 635 mm. Šios staklės gali apdoroti įvairias medžiagas, įskaitant metalus, plastiką ir kompozitus [32]. Nors CNC frezavimas yra itin tikslus, jis ne visada ekonomiškai naudingas, ypač prototipams gaminti, kur principas atvaizduoti 3D modelį fizine forma ir išbandyti jo funkcionalumą surinkime.

Prototipų 3D modeliai apdorojami *CAMWorks* programine įranga tam, kad optimizuoti gamybos procesus, generuojant tiksliai pritaikytas apdirbimo trajektorijas. *CAMWorks* programoje, kuri integruojama su *Solidworks*, galima modeliuoti įvairius gamybos scenarijus, simuliuoti CNC staklių

darbą ir koreguoti parametrus, siekiant užtikrinti optimalų našumą bei medžiagų taupymą. Ši integracija leidžia gamybos technologams greitai atlikti pakeitimus dar prieš gamybą.

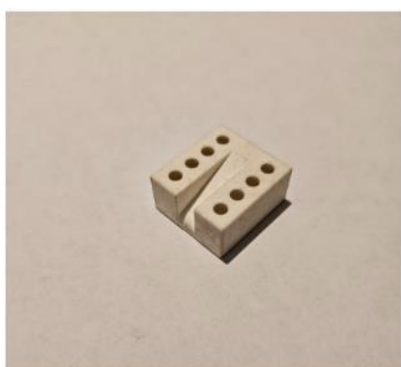
Siekiant užtikrinti prototipų kokybę, naudojami 3D skenavimo ir kokybės kontrolės sprendimai, tokie kaip *Creaform MetraScan Black Elite* 3D skeneris ir *TwynView* programinė įranga. *Creaform MetraScan Black Elite* 3D skeneris, skirtas pramoninei kokybės kontrolei, tiksliam 3D skenavimui ir atvirkštinei inžinerijai, kai turimą detalę norima atkartoti. Prietaiso matavimo tikslumas iki 0,025 mm ir gali nuskaityti iki 1 800 000 matavimo taškų per sekundę, kas leidžia greitai surinkti didelius kiekius duomenų. Šis skeneris turi 15 lazerio linijų, kurios padengia didelį plotą ir leidžia greitai surinkti detalius duomenis [33]. Nuskenuoti fiziniai objektai palyginami su CAD modeliais, nustatant nukrypimus nuo pradinio dizaino. *TwynView* skirta vizualinei kokybės kontrolei, naudojant papildytąją realybę (AR) ir kompiuterinį matymą. Mobilioji programėlė suteikia galimybę realiu laiku analizuoti duomenis ar atlikti tikslią detalių kokybės kontrolę [34]. Naudojant *TwynView* nesunku nustatyti modelio nesutapimus su pagamintos detalės išvaizda.

1.8. Naudojamos medžiagos prototipams gaminti

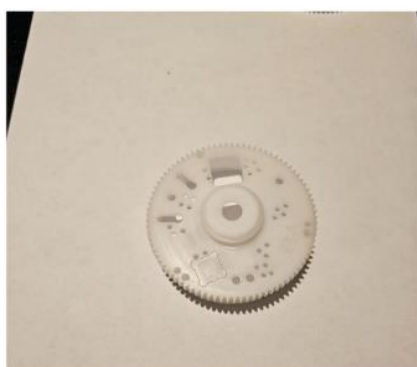
Prototipams gaminti įmonė X naudoja įvairių rūšių ir techninių parametrų plastikus. Šių plastikų pasirinkimas priklauso nuo gaminio paskirties ir kainos. Pagrindinės naudojamos plastikų rūšys yra šios:

- Stiklo pluošto laminatas (UPM 203, UPGM);
- Organinis stiklas (PMMA);
- Polivinilchloridas (neplastifikuotas) (PVC-U);
- Monolitinis polikarbonatas (PC);
- Poliamidas (PA);
- Poliacetalis (POM-C, POM-H) ir kt.

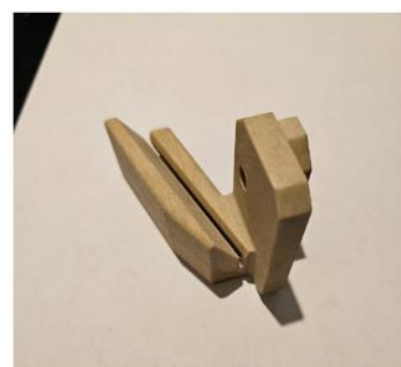
Nuo 2023 m. įmonė, išstobulinusi CNC frezavimo technologiją, sukaupusi patirties ir atnaujinusi ventiliavimo sistemas, pradėjo naudoti stiklo pluošto laminatus (žr. 2 pav. a ir c), kuriuos yra sudėtinga apdirbti, nes CNC frezavimo įrankių sudėvėjimas yra kelis kartus greitesnis, negu apdirbant metalo gaminius ir apdirbimo metu sukeliama dulkėms ir išskiriamiems kvapams reikia specialios filtravimo bei dulkių šalinimo įrangos, siekiant užtikrinti darbo aplinkos apsaugą ir laikytis aplinkosaugos reikalavimų.



a) UPGM



b) POM-H

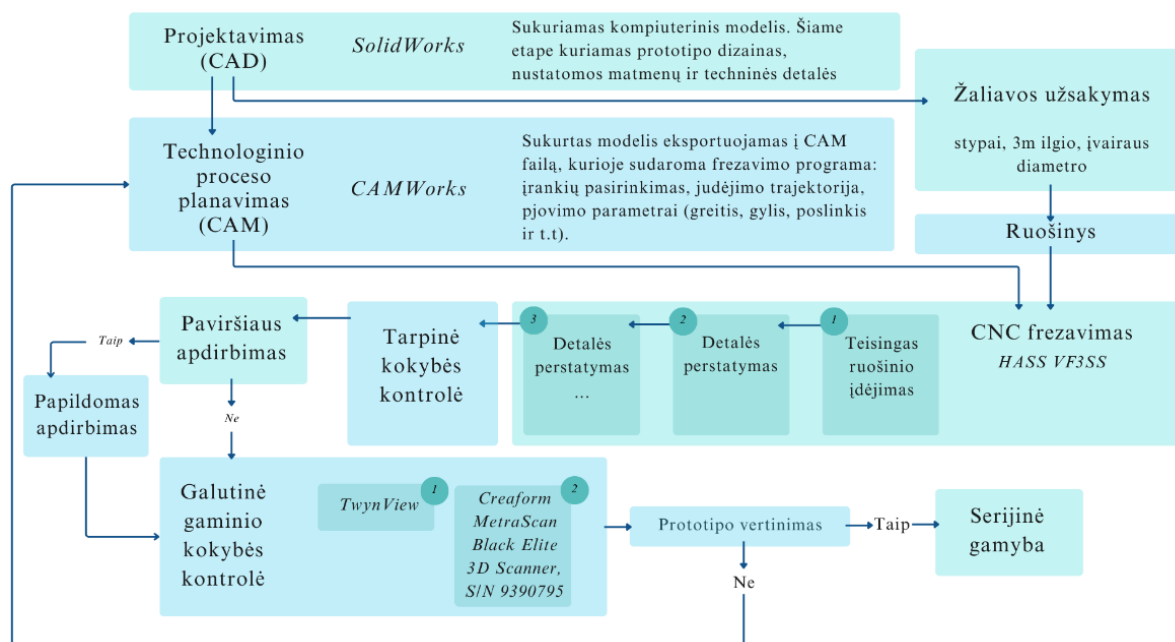


c) UPM 203

2 pav. Įmonėje X gaminami prototipai

1.9. Technologinių operacijų seka ir gamybos proceso kontrolė

Prototipų kūrimo procesas įmonėje X pradedamas nuo CAD modelių paruošimo pagal kliento reikalavimus. Šie modeliai paverčiami į CNC programavimo kodą, kuris vėliau naudojamas staklių valdymui. Plastiko ruošiniai CNC frezavimo staklėmis *HASS VF 3SS* apdirbami keliais etapais – nuo grubaus apdirbimo operacijų iki tikslių, galutinio paviršiaus apdirbimo darbų. Kiekvienam etapui reikia tam tikro laiko, priklausomai nuo detalės sudėtingumo ir CNC staklių užimtumo serijinėje gamyboje (žr. 3 pav.). Įmonė X kruopščiai kontroliuoja kiekvieną CNC frezavimo etapą, siekdama užtikrinti, kad prototipai atitiktų aukštus kokybės ir tikslumo standartus. Proceso kontrolė atliekama nuo ruošinio paruošimo iki galutinio gaminio patikros, naudojant kalibruotus matavimo įrenginius bei 3D skenavimo įrangą.



3 pav. Technologinių operacijų seka plastiko prototipams gaminti įmonėje X

Po 3D nuskaitymo surinkti duomenys lyginami su pradiniu CAD modeliu, o nukrypimų atveju atliekami korekciniai veiksmai. Jei detalė atitinka visus kokybės reikalavimus, ji laikoma paruošta ir yra perduodama klientui tolimesniam vertinimui. Tuo atveju, kai nustatomi trūkumai, atliekamas papildomas apdirbimas arba gamybos parametrų koregavimas. Kiekviename gamybos etape vykdoma proceso kontrolė, kuri užtikrina, kad operacijos vyktų pagal nustatytus kokybės reikalavimus, o duomenys apie gamybą yra dokumentuojami ir analizuojami, kad nustatyti galimas optimizavimo galimybes ateities gamybos ciklams. Tai apima įrankių nusidėvėjimą, energijos sąnaudų kontrolę ir medžiagų naudojimo efektyvumo vertinimą.

1.9.1. Proceso efektyvumas ir trūkumai

CNC frezavimo staklės įmonėje X naudojamos tiek prototipams gaminti, tiek serijinei gamybai apdirbti, todėl dažnai susiduriama su įrangos užimtumo problemomis. Dėl didelio užsakymų kiekio staklių prieinamumas tampa ribotas, kas lemia ilgesnius gamybos laukimo laikotarpius ir mažina proceso efektyvumą. Tai ypač aktualu, kai prototipai turi būti gaminami greitai. Tokiais atvejais staklių optimizacija yra būtina, kad būtų galima sumažinti nereikalingas pristovas ir užtikrinti kuo spartesnę gamybos procesą.

Vienas pagrindinių CNC proceso trūkumų yra sudėtingas programavimo ir įrangos valdymas, kuriam reikia aukštos kvalifikacijos specialistų. Nors įmonė turi patyrusius operatorius, programavimo procesui reikia daug laiko. Prototipams gaminti reikia greitų sprendimų ir lankstumo, o programavimo ir valdymo sudėtingumas kartais riboja galimybę operatyviai reaguoti į besikeičiančius užsakymus. Taip pat, kadangi CNC frezavimo staklėse nėra galimybės tiesiogiai perduoti modelių iš CAD programų, failai turi būti fiziškai perkeltami į stakles per operatorių, kas mažina proceso automatizacijos lygį ir didina žmogiškųjų klaidų riziką.

Dar vienas proceso trūkumas susijęs su žaliavų panaudojimu. Kadangi prototipams gaminti naudojamos įvairių dydžių ir formų detalės, įmonė dažnai susiduria su neefektyviu žaliavų pirkimu. Žaliavos yra gaunamos standartinių matmenų, kurie dažnai neatitinka prototipo reikalavimų, todėl po frezavimo proceso lieka dideli žaliavų likučiai. Dėl šios priežasties atliekų kiekis siekia 26 % (žr. 4.3.2 skyrių), o neefektyvus žaliavų panaudojimas didina gamybos sąnaudas.

Be to, *Creaform MetraScan Black Elite* 3D skeneris, nors ir puikiai tinkamas didelių objektų skenavimui, yra nepraktiškas, kai reikia matuoti mažas ir lengvas detales. Skenerio pritaikymas objektams nuo 0,2 m iki 10 m reiškia, kad mažų detalių nuskaitymas gali būti netikslus arba neefektyvus. Be to, laukimo laikas, kol skeneris įkraunamas ir paruošiamas darbui, taip pat prisideda prie proceso stabdymo, ypač kai reikia atlikti greitą patikrą ar kokybės kontrolę mažiems komponentams.

Be jau paminėtų iššūkių, įmonė susiduria ir su dar vienu apribojimu – ji gamina prototipus naudodama tik CNC stakles, net ir tais atvejais, kai tai nėra būtina dėl galutinio produkto kokybės reikalavimų. Nors CNC staklės *HASS VF 3SS*, yra skirtos aukštos kokybės ir tikslumo detalėms gaminti, kai kuriais atvejais, prototipams gaminti nėra reikalingas toks aukštas kokybės lygis. Tai reiškia, kad staklės išgauna geresnę kokybę nei būtina, kas padidina gamybos sąnaudas ir daro procesą ekonomiškai nenaudingą. Tokiais atvejais pigesnės alternatyvos, kaip 3D spausdinimas, galėtų būti tinkamesnės ir ekonomiškai naudingesnės, tačiau įmonė kol kas šia galimybe nesinaudoja.

Kita svarbi ypatybė yra CNC staklių techniniai apribojimai, ypač susiję su įrankių pasirinkimu bei apsukų kiekiu. Nors CNC staklės leidžia gaminti aukštos kokybės detales, ribotas įrankių asortimentas ir sukimosi greičio pasirinkimai kartais apriboja galimybes efektyviai ir ekonomiškai gaminti įvairių dydžių ir medžiagų prototipus. Įmonė susiduria su sunkumais, kai reikia apdirbti itin sudėtingus ar nestandartinius komponentus, kas dar labiau mažina proceso efektyvumą ir lankstumą.

1.9.2. Įmonės poreikiai

Vienas pagrindinių įmonės X poreikių yra didesnis lankstumas prototipams kurti. CNC frezavimo procesai, nors ir užtikrina aukštą kokybę bei tikslumą, reikia daug laiko, ypač programavimo, įrankių parinkimo ir operacijų planavimo stadijose. Dėl to įmonė siekia rasti alternatyvas, kurios leistų sumažinti laukimo laikotarpius ir padidinti gamybos greitį. Be to, įmonė ieško būdų sumažinti gamybos kaštus, ypač prototipams gaminti, kuriems tikslumas ir kokybė ne visada yra pagrindinis prioritetas. Naudojamos technologijos sukuria papildomas išlaidas dėl žaliavų švaistymo ir didelio energijos suvartojimo. Taip pat, kadangi CNC frezavimas naudoja standartinius ruošinių dydžius, atsiranda daug nepanaudotų likučių, kurie negali būti panaudojami kitose gamybos operacijose. Įmonei reikalinga technologija, kuri galėtų mažinti šias atliekas, o tuo pačiu leistų lanksčiau pritaikyti medžiagas pagal konkretaus prototipo reikalavimus.

Kitas svarbus įmonės poreikis yra padidinti gamybos proceso automatizavimo lygį. Dabartinei CNC technologijai reikia nuolatinės operatorių priežiūros, nes reikia rankiniu būdu perkelti modelius į stakles ir užtikrinti įrangos valdymą. Naudojant 3D spausdinimo technologijas, įmonė galėtų automatizuoti daugiau gamybos etapų, sumažinti žmogiškųjų klaidų tikimybę ir palengvinti operacijų valdymą. Tai taip pat leistų sumažinti darbo jėgos sąnaudas ir padidintų gamybos efektyvumą. 3D spausdinimas galėtų pasiūlyti privalumų, tokių kaip didesnė dizaino laisvė, greitesnis gamybos procesas ir mažesnės sąnaudos.

1.10. Skyriaus apibendrinimas

AM potencialas slypi gebėjime kurti sudėtingas, tiksliai pritaikytas ir individualizuotas detales, naudojant įvairias medžiagas bei technologijas. Tradiciniai CNC apdirbimo metodai prototipams gaminti, ilgą laiką buvo pagrindiniai įrankiai gamyboje, leidžiantys tiksliai ir efektyviai apdirbti įvairias medžiagas, tačiau šie įrankiai turi ribotas galimybes kurti sudėtingas formas ir sudaro didelį kiekį atliekų. Reikia paminėti, kad AM technologijos, suteikdamos daugiau laisvės projektuojant ir panaudojant medžiagas, tampa sprendimu gamybos įmonėms, ieškančioms lankstumo ir greito reagavimo į nuolat besikeičiančius rinkos poreikius. Nepaisant technologijų pažangos, tiek CNC, tiek AM prototipų kūrimas susiduria su iššūkiais, tokiais kaip gaminio kokybės užtikrinimas, medžiagų parinkimas ir gamybos proceso stabilumas. Tinkamas tradicinių metodų ir AM technologijų derinimas leidžia įmonėms panaudoti abiejų privalumus ir sukurti efektyvius gamybos procesus, atitinkančius šiuolaikinei pramonei keliamus standartus.

AM plėtra prasidėjo nuo stereolitografijos ir laikui bėgant išsiplėtė į įvairias technologijas, tokias kaip FDM ir SLS. Šios technologijos rado pritaikymą įvairiose pramonės šakose, įskaitant aviaciją, automobilių gamybą ir biomediciną. Nauji metodai, tokie kaip *CLIP* ir tūrinė stereolitografija, pagreitino gamybos procesus ir padidino tikslumą. Be to, patentų galiojimo pabaiga ir didėjantis spausdintuvų prieinamumas paskatino 3D spausdinimo plėtrą.

AM technologijų pažanga išplėtė naudojamų medžiagų pasirinkimą ir optimizavo 3D spausdinimo procesus. Kiekviena AM technika turi savo privalumų ir trūkumų, priklausomai nuo taikomų medžiagų ir poreikių gaminiams. AM susiduria su iššūkiais, susijusiais su jautrumu defektams ir netinkamu mechaninių savybių pasiskirstymu, o joms pilnai įsisavinti būtini tolesni tyrimai kartu su kompiuterinių simuliacijų pažanga.

Viena iš alternatyvų yra CNC frezavimo ir AM technologijų derinimas. Tai suteikia galimybę įgyvendinti pažangias gamybos strategijas pagal Pramonę 4.0 koncepciją. Šis hibridinis metodas sujungia CNC frezavimo tikslumą ir 3D spausdinimo lankstumą, efektyvų medžiagas panaudojimą ir atliekų mažinimą. Hibridinės sistemos vis dažniau naudojamos įvairiose pramonės šakose, kur reikia suderinti tikslumą ir formų sudėtingumą. Nors tokioms sistemoms reikia daugiau valdymo įgūdžių, jos leidžia efektyviau gaminti sudėtingus komponentus ir didinti konkurencingumą.

AM proceso sudėtingumas taip pat kelia iššūkių kokybės kontrolei. Dėl sluoksnių orientacijos ir šilumos poveikio atsirandančios zonos gali turėti įtakos gaminių kokybei. Sertifikavimui AM procesuose reikia griežto technologijų kartojamumo, tačiau yra daugiau kintamųjų nei tradicinėje gamyboje. Todėl būtina giliau suprasti visus gamybos proceso parametrus ir jų įtaką galutinei gaminių kokybei. Šioje srityje svarbų vaidmenį atlieka cheminiai, mechaniniai ir neardomieji bandymai. Tolesnis metodikų tobulinimas leistų realiuoju laiku stebėti gamybos procesą ir užtikrintų kokybę.

2. Bandinių aprašymas ir tyrimo metodologija

2.1. Bendrojo įrangos efektyvumo (OEE) vertinimo metodika

Norint įvertinti galimybes plastiko prototipus gaminti AM būdu, pirmiausia būtina suprasti dabartinės naudojamos CNC frezavimo technologijos efektyvumą. Efektyvumo vertinimas suteikia galimybę identifikuoti esamus CNC technologijos apribojimus ir tobulintinas sritis. Vienas iš svarbiausių efektyvumo vertinimo metodų yra bendrasis įrangos efektyvumas (angl. *Overall Equipment Effectiveness*, OEE), kuris apima tokias reikšmes kaip prieinamumas, našumo efektyvumas ir kokybės rodiklis. H. Hernadevita ir kt. [35] sudarė metodiką OEE skaičiavimams CNC frezavimo staklėms, pagal kurią struktūrą minėti rodikliai skaičiuojami X įmonės CNC frezavimo staklių efektyvumui vertinti.

OEE skaičiavimo formulė pateikiama 1 lygtimi:

$$\text{OEE (\%)} = \text{Prieinamumas (\%)} \times \text{Našumo efektyvumas (\%)} \times \text{Kokybės rodiklis (\%)}; \quad (1)$$

čia:

$$\text{Prieinamumas} = \frac{\text{apkrovos laikas} - \text{prastovų laikas}}{\text{apkrovos laikas}} \times 100 \%; \quad (2)$$

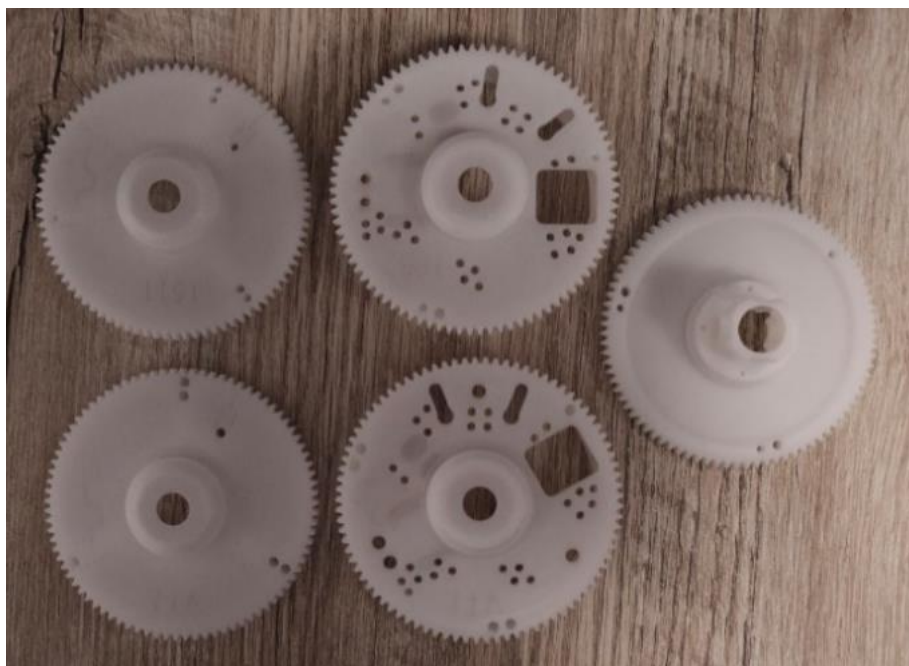
$$\text{Našumo efektyvumas} = \frac{\text{apdorotų vienetų skaičius} - \text{idealus ciklo laikas}}{\text{darbo laikas}} \times 100 \%; \quad (3)$$

$$\text{Kokybės rodiklis} = \frac{\text{apdorotų vienetų skaičius} - \text{brokuotų vienetų skaičius}}{\text{apdorotų vienetų skaičius}} \times 100 \%. \quad (4)$$

Adityviojoje gamyboje OEE rodiklis taip pat gali būti apskaičiuojamas, tačiau jis turėtų būti apibrėžiamas kaip procesas, apimantis visus gamybos etapus nuo pasiruošimo iki galutinio produkto pateikimo. P. A. Mendonsa, R. Franciskas ir D. Rabelas [36] naudojo metodiką vertinti FDM spausdinimo proceso efektyvumui, kuria vadojaujantis OEE rodikliai gali būti apskaičiuojami ir AM procesams. Siekiant įvertinti 3D spausdintuvo prieinamumą ir efektyvumą būtina nustatyti šiuos rodiklius: bendras spausdinimo laikas (TPT), naudingas spausdinimo laikas (UPT), keitimo laikas (HET), izoliuotas spausdinimo laikas (ITP) ir aušimo laikas (CLT). Kokybė FDM gamybos procese apibrėžiama kaip santykis tarp visų pagamintų, patvirtintų, pataisytų ir atmestų detalių.

2.2. Bandymo prototipo aprašymas

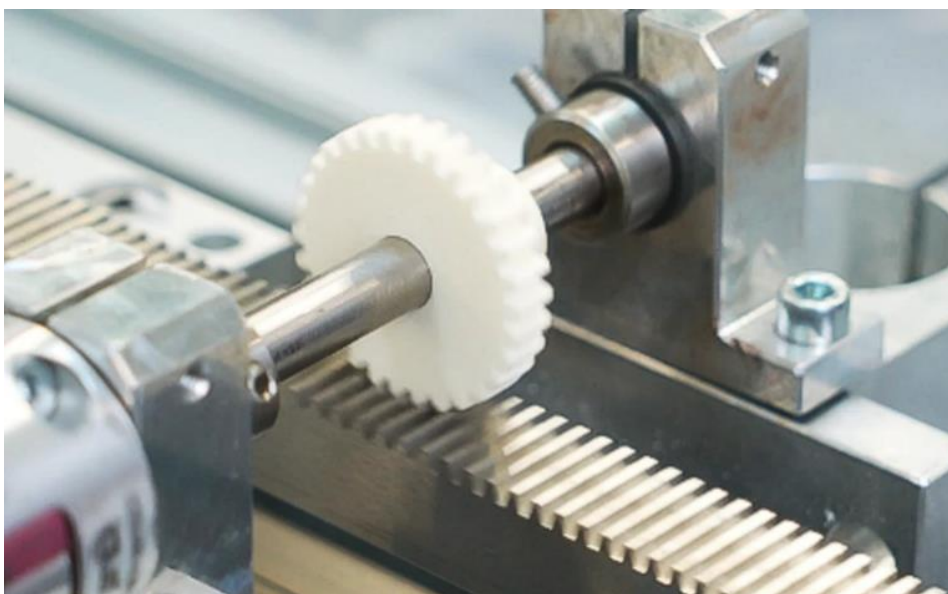
Pasirinktas gaminys (žr. 1 priedą) prototipo kūrimui skirtas medicinos pramonei ir yra vienas iš robotizuotos sistemos, leidžiančios gydytojams nuotoliniu būdu atlikti endovaskulines procedūras [37], komponentų. Per pastaruosius metus medicininės robotikos rinka sparčiai didėjo: jos dydis 2022 m. buvo įvertintas 11,67 mlrd. JAV dolerių, o prognozės rodo, kad ši pramonė išaugs nuo 13,19 mlrd. JAV dolerių 2024 m. iki 52,41 mlrd. JAV dolerių 2032 m., išlaikant 15,69 % metinį sudėtinį augimo tempą (CAGR) prognozuojamu laikotarpiu [38]. Pagal kliento prognozes, įrengus 10 000 laboratorijų su tokiomis robotizuotomis nuotolinėmis sistemomis, būtų panaudoti 5 mlrd. eurų, o kasmet papildomai reikėtų 2 mlrd. eurų vienkartinėms detalėms gaminti ir keisti. Šiuo metu įmonė X bendradarbiauja su klientu plėtodama mažiausiai penkis skirtingus plastiko krumpliaračių prototipų variantus, siekiant patenkinti tiek kokybės, tiek funkcionalumo poreikius (žr. 4 pav.).



4 pav. Prototipų gamybos įvairovė įmonėje X

Krumpliaračiai, naudojami medicinos robotikoje, skirti perduoti tikslūs judesius, keičiami po kiekvienos procedūros, todėl svarbu pasirinkti ekonomišką ir efektyvą gamybos būdą, kuris užtikrintų nepertraukiamą tiekimą.

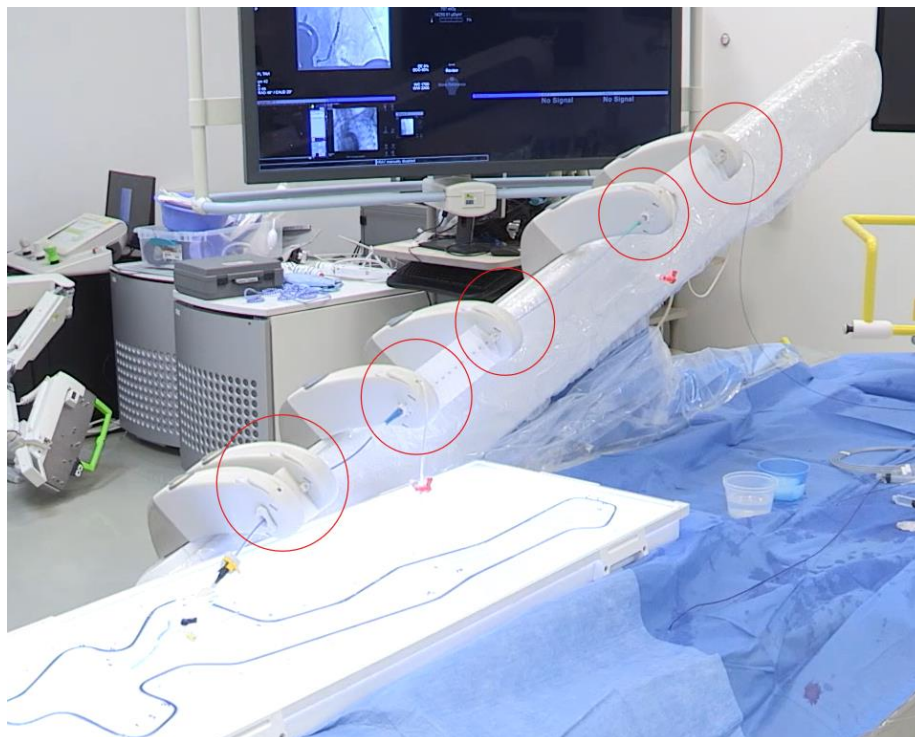
Pirmaujantys rinkoje 3D spausdintų krumpliaračių gamintojai *Igus*, atliko tyrimus, kurių metu krumpliaračių veikimo laikas buvo tikrinamas krumplinės juostos bandyme (žr. 5 pav.). Šis tyrimas parodė, kad 3D spausdinti arba lazeriniu sinteriavimu pagaminti krumpliaračiai tarnauja dvigubai ilgiau nei POM medžiagos frezuoti krumpliaračiai [39].



5 pav. Krumpliaračių bandymas [39]

Įmonėje X gaminami krumpliaračių prototipai yra pritaikyti reaguoti į gydytojo atliekamus judesius (žr. 6 pav.), todėl nėra keliamų reikalavimų apsisukimų skaičiui. Kadangi gydytojas rankomis valdo

kreipiančiąją vielą, ji paciento kūne juda lėtai ir kontroliuojamai, todėl svarbu užtikrinti sklandų ir tikslų krumpliaračio judesio perdavimą.



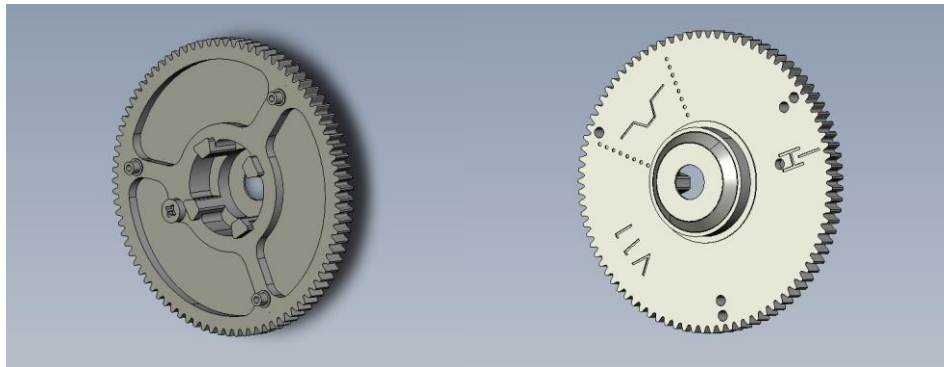
6 pav. Nuotolinė robotizuota sistema (kliento nuotrauka)

2.3. Gamybos technologijų ir įrangos pasirinkimas

Siekiami iširti AM gamybos technologijų taikymo galimybes plastiko prototipams gaminti, norint efektyviau panaudoti turimus išteklius ir sumažinti kaštus. Šiuo metu nėra 3D spausdinimo technologijos, kuri būtų visiškai universali ir tinkama visiems tikslams. Dėl to svarbu nuspręsti, kaip ir kokiam tikslui ketinama naudoti 3D spausdinimą. Renkantis 3D spausdintuvą privalu atsižvelgti į įvairius kriterijus. Įtakoti sprendimą gali atsarginių dalių įsigijimas 3D spausdintuvui nustojus veikti ir klientų aptarnavimas. Kai kurie gamintojai leidžia naudoti tik jų prekės ženklo medžiagas ir atsargines dalis. Tai padidina eksploatacines išlaidas ir apriboja medžiagų asortimentą [14]. Svarbu atkreipti dėmesį į įmonės X pagrindinę veiklą ir išteklių naudojimo optimizavimo poreikį.

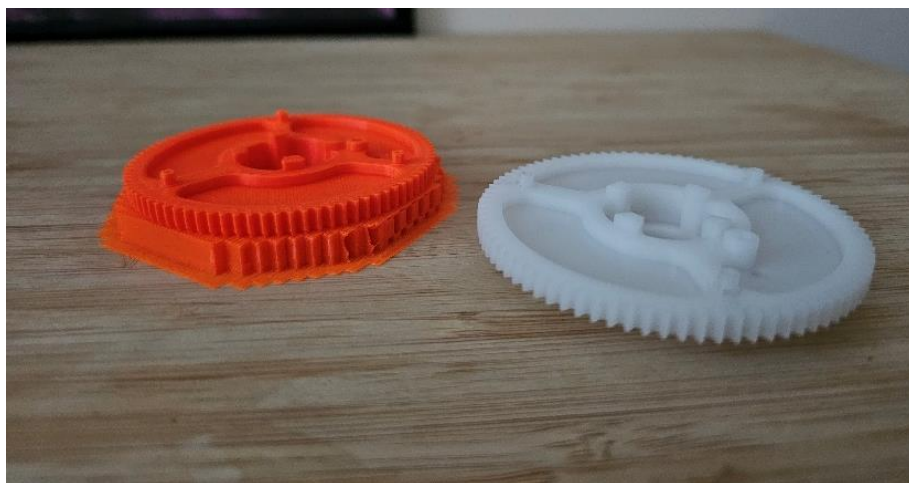
Kaip jau minėta 1.7 skyriuje, įmonės X pagrindinė veikla susijusi su metalo apdirbimu, todėl frezavimo staklės, kurios galėtų būti užimtos serijinės produkcijos gamyba, yra apkraunamos plastiko prototipams gaminti. Įvertinus perkamo plastiko kiekį (žr. 4.3.1 skyrių), nustatyta, kad jo poreikis kiekvienais metais didėja, kas rodo, jog CNC staklių užimtumas didėja. Todėl įmonei svarbu turėti nebrangų gamybos būdą, kuris leistų greitai gaminti ir tiekti prototipus klientams, ypač kaip AM technologijos, tokios kaip FDM, gali tai užtikrinti.

Kadangi FDM technologija yra viena ekonomiškiausių ir biudžetui draugiškiausių pasirinkimų tarp AM technologijų [21], šiame darbe detalei (žr. 7 pav.) gaminti buvo pasirinktas būtent šis 3D spausdinimo metodas. Pagamintos detalės matmenys bus lyginami su CNC frezavimo būdu pagamintos detalės matmenimis (žr. 8 pav.), kurios gamybos procesas bei CNC frezavimo staklės HASS VF 3SS buvo aptarti anksčiau. 3D spausdinimui pasirinktas *Original Prusa Mini+* spausdintuvas, kuris plačiai vertinamas dėl savo prieinamumo, našumo ir patikimumo.



7 pav. Prototipo 3D modelis

FDM spausdinimo technologija yra apribota termoplastinėmis medžiagomis, kurios turi atitikti specifinius klampumo reikalavimus – jis turi būti pakankamai žemas, kad ekstruzija būtų veiksminga, tačiau pakankamai aukštas, kad detalė būtų struktūriškai stabili. Medžiagų pasirinkimas 3D spausdinimui priklauso nuo gaminio sudėtingumo ir funkcionalumo reikalavimų. 3D spausdinti grynų polimerų gaminiai pasižymi silpnumu ir ribotu funkcionalumu, tačiau šie trūkumai yra įveikiami naudojant polimerų kompozitus, sudarytus iš matricos ir armuojančių medžiagų derinio, kuris suteikia struktūrinės ir funkcinės savybes [16]. FDM taikymas nėra apribotas geometrinių formų sudėtingumu, nes jis gali būti naudojamas ir su pramoninėmis medžiagomis, turinčiomis idealių šiluminių ir reologinių savybių [21]. Atsižvelgiant į šiuos parametrus, reikia įvertinti ir kitų AM technologijų alternatyvas.



8 pav. 3D spausdinta detalė (kairėje) ir CNC frezuota (dešinėje)

FDM medžiagos, kaip PLA, ABS, PETG ar nailonas, kainuoja nuo 20 iki 150 Eur už kilogramą [40], o SLS naudojami nailono milteliai ar SLA dervos kainuoja daugiau – nuo 100 iki 300 Eur už kilogramą [41]. Tai leidžia teigti, kad pasirinktos FDM technologijos sąnaudų santykis yra geresnis, ypač kai tai susiję su prototipų gamyba. J. Pereras ir kiti [29] ištyrė tvarumu grindžiamą sistemą AM ir CNC apdirbimui ir nustatė, kad medžiaga, paviršiaus kokybė, kietumas, stiprumas ir matmenų tikslumas bei savybės, tokios kaip gamybos apimtis, atsižvelgiant į vieneto kainą, ir ciklo laikas, pagrįstas proceso parametrais, gali būti vienodai tinkamos kiekvienai nagrinėjamai technologijai. Kadangi geometrinis sudėtingumas beveik neturi įtakos resursų poreikiui AM, sudėtingumo veiksnys taikomas tik CNC apdirbimo metu gaminamiems produktams.

Ekonomiškumas yra svarbiausias kriterijus renkantis tvarius gamybos procesus. Energijos suvartojimas yra kitas svarbus rodiklis, kur CNC apdirbime svarbiausias energijos suvartojimas ir AM medžiagų apdorojimas bei pirminės, antrinės ir poapdorojimo gamybos stadijos [29]. FDM technologija turi aiškų pranašumą dėl mažesnių medžiagų sąnaudų ir paprastesnio proceso. Ši technologija labiausiai tinkama spausdinti mechanines dalis ir prototipus. Užpildai yra saugūs ir su jais lengva dirbti, tačiau ant spausdinto objekto paliekami gerai matomi sluoksniai [14, pp 11]. FDM spausdintuvai yra daug pigesni už SLS ar SLA spausdintuvus. Pavyzdžiui, pramoninio lygio FDM spausdintuvas gali kainuoti nuo 10 000 iki 40 000 Eur, kai SLS spausdintuvų kainos prasideda nuo 100 000 Eur. Be to, FDM spausdintuvų pasirinkimas rinkoje yra gerokai didesnis [42]. Dėl to, lyginant su kitomis technologijomis, FDM spausdintuvai, kaip *Original Prusa Mini+*, yra patrauklesni dėl mažesnių išlaidų ir paprastesnės eksploatacijos.

Original Prusa Mini+ yra prieinamas ir kompaktiškas FDM spausdintuvas, skirtas spausdinti aukštos kokybės plastiko gaminius. Šis spausdintuvas išsiskiria patikimumu, paprastu naudojimu bei kainos ir kokybės santykiu, todėl jis puikiai tinka norint optimizuoti mažų ar vidutinio dydžio prototipų gamybą. Spausdintuvas turi 18x18x18 cm spausdinimo tūrį, o raiška gali siekti 50 mikronų, užtikrinant didelį tikslumą. Spausdintuvas naudoja 1,75 mm skersmens plastiko siūlą, kurį palaiko dauguma termoplastikų, tokių kaip PLA, PETG, ABS, ASA, nailonas ir kiti, pritaikytų įvairiems mechaniniams poreikiams. Šis spausdintuvas turi automatinę spausdinimo platformos lygiavimo sistemą, kuri padidina gamybos efektyvumą, bei sumažina rankinio kalibravimo poreikį. Be to, yra suprojektuotas siekiant minimizuoti energijos sąnaudas, kas yra svarbus kriterijus mažinant bendras gamybos sąnaudas ir užtikrinant tvarų gamybos procesą. Šis 3D spausdintuvas naudoja atvirojo kodo *PrusaSlicer* programinę įrangą, leidžiančią lengvai paruošti įvairias geometrijas ir optimaliai naudoti spausdinimo medžiagas. Be to, spausdintuvas turi apsaugas nuo perkaitimo ir automatinio atkūrimo funkciją po elektros gedimų, kas užtikrina nepertraukiamą darbo eigą [43]. Dėl šių priežasčių *Original Prusa Mini+* yra puikus sprendimas pasirinkto prototipo spausdinimui.

2.4. Bandinių medžiagų savybės

2.4.1. Frezuotos detalės medžiagos savybės

Bandyme prototipui gaminti CNC frezavimo staklėmis naudojamas *Roechling* gamintojo poliacetalio (POM-H) plastikas *Sutarin H natural*. Pagal gamintojo techninių duomenų lapą [44] pagrindinės techninės savybės yra: mažas drėgmės sugėrimas, geras atsparumas dilimui, didelis mechaninis stiprumas ir standumas, geras tūsumas, didelis atsparumas deformacijoms, geras apdirbamumas ir matmenų stabilumas. *Sutarin H natural* (žr. 3 lent.) turi atsparumą tempimui iki 75 MPa, kas parodo, kad gaminiai gali atlaikyti mechaninį poveikį, deformacijas ir apkrovas. Elastingumo modulis, kuris yra maždaug 3200 MPa nurodo medžiagos standumą ir tai, kad prototipai nesideformuos esant apkrovoms. Smūgių energija pagal Izodo bandymą (be įpjovos) siekia 10 kJ/m², o medžiagos tankis 1,4 g/cm³, kas yra vidutinio sunkumo lygis plastiko medžiagoms. Ši medžiaga atspari daugeliui cheminių medžiagų, įskaitant alyvas, riebalus, ir šarmus, kas daro ją tinkama įvairiems pramonės sektoriams, kur reikia bandyti prototipus cheminėse ar agresyviose aplinkose.

3 lentelė. *Sustarin H natural* techniniai duomenys [44]

| Savybės | Bandymo metodas | Mat. vnt. | Vertė |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------|
| Tankis | DIN EN ISO 1183-1 | g/cm ³ | 1,42 |
| Drėgmės sugėrimumas | DIN EN ISO 62 | % | 0,2 |

| Savybės | Bandymo metodas | Mat. vnt. | Vertė |
|--|-----------------|-------------------|---------|
| Degumas (storis 3 mm / 6 mm) | UL 94 | - | HB / HB |
| Atsparumas tempimui | DIN EN ISO 527 | MPa | 75 |
| Pailgėjimas trūkimo metu | DIN EN ISO 527 | % | 30 |
| Tamprumo modulis | DIN EN ISO 527 | MPa | 3200 |
| Smūginis atsparumas su įpjova | DIN EN ISO 179 | kJ/m ² | 10 |
| Kietumas | DIN ISO 868 | D skalė | 83 |
| Lydimosi temperatūra | ISO 11357-3 | °C | 175 |
| Šilumos laidumas | DIN 52612-1 | W/(m×K) | 0,31 |
| Šiluminė talpa | DIN 52612 | kJ/(kg×K) | 1,5 |
| Darbinė temperatūra, ilgalaikė | Vidutinė | °C | -50-90 |
| Darbinė temperatūra, trumpalaikė (maks.) | Vidutinė | °C | 150 |

2.4.2. 3D spausdintos detalės medžiagų savybės

Bandyme naudojamas polimeras (žr. 4 lent), be armuojančių medžiagų, *Prusament PLA Prusa Orange* [45]. K. S. Patelio ir kt. [11] tyrime nustatyta, kad į polilaktinę rūgštį (PLA) pridėjus 15% svorio anglies pluošto (CF), pagerėja mechaninės savybės ir medžiagos matmenų stabilumas. Tempimo stiprumo skirtumai PLA su skirtingu CF kiekiu buvo analizuoti, remiantis įvairių tyrėjų rezultatais. Naudojant skenuojančią elektroninę mikroskopiją nustatyti gerai išsidėstę pluoštai ir didelės poros polimero matricoje poliruotose ir sulaužytose kompozitų skerspjuvio dalyse. Didėjant CF kiekiui CF/PLA kompozite, keičiasi lenkimo stiprumas, o pluoštų orientavimas išilgai spausdinimo krypties pagerina tempiamąjį stiprumą, bet sumažina gniuždomąjį stiprumą.

4 lentelė. *Prusament PLA Prusa Orange* medžiagos savybės [45]

| Eil. Nr. | Medžiagos savybės | Vertės | Metodai |
|----------|--|------------|------------------------|
| 1 | Tankis, g/cm ³ | 1,24 | ISO 1183 |
| 2 | Drėgmės sugeriamumas per 24 h, % | 0,13 | <i>Prusa</i> polimerai |
| 3 | Drėgmės sugeriamumas per 7 dienas, % | 0,19 | <i>Prusa</i> polimerai |
| 4 | Šiluminio deformavimo temperatūra (0,45 MPa), °C | 55 | ISO 75 |
| 5 | Šiluminio deformavimo temperatūra (1,80 MPa), °C | 55 | ISO 75 |
| 6 | Tempimo takumo stipris užpildui, MPa | 45,3 ± 0,4 | ISO 527 |
| 7 | Kietumas (angl. <i>Shore D</i>) | 72 ± 1,5 | <i>Prusa</i> polimerai |
| 8 | Sluoksnių sukibimas, MPa | 6 ± 1,3 | <i>Prusa</i> polimerai |

Atsižvelgiant į medžiagos naudojamos CNC frezavime techninius duomenis, 3D spausdinimui pasirinktos alternatyvios medžiagos bandomųjų mėginių testavimo mechaninės savybės (žr. 5 lent.).

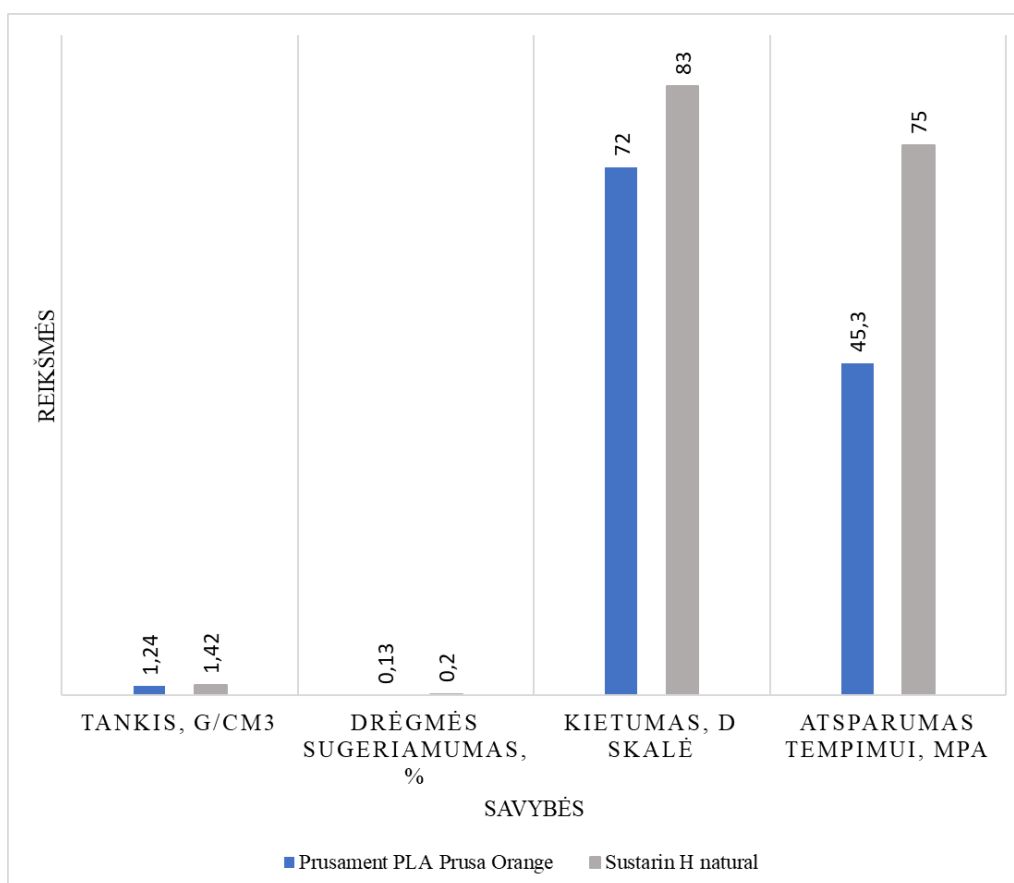
5 lentelė. 3D atspausdintų bandomųjų mėginių testavimo mechaninės savybės [45]

| Savybės | Bandymo metodas | Mat. vnt. | Vertė horizontalia spausdinimo kryptimi | Vertė vertikalio (xz) spausdinimo kryptimi |
|---------------------|-----------------|-----------|---|--|
| Tempimo takumo riba | ISO 527-1 | MPa | 51 ± 3 | 59 ± 2 |

| Savybės | Bandymo metodas | Mat. vnt. | Vertė horizontalia spausdinimo kryptimi | Vertė vertikalia (xz) spausdinimo kryptimi |
|---|-----------------|-------------------|---|--|
| Tempimo modulis | ISO 527-1 | GPa | 2,3 ± 0,1 | 2,4 ± 0,1 |
| Pailgėjimas ties takumo tašku | ISO 527-1 | % | 2,9 ± 0,3 | 3,2 ± 1 |
| Lenkimo stipris | ISO 178 | MPa | 83 ± 6 | 99 ± 1 |
| Lenkimo modulis | ISO 178 | GPa | 3,1 ± 0,1 | 3,2 ± 0,1 |
| Poslinkis ties lenkimo stipriu | ISO 178 | mm | 7,4 ± 0,2 | 8,3 ± 0,2 |
| Smūginis stipris (Charpy metodas) | ISO 179-1 | kJ/m ² | 13 ± 1 | 14 ± 1 |
| Smūginis stipris su įpjova (Charpy metodas) | ISO 179-1 | kJ/m ² | netaikoma | netaikoma |

2.4.3. Pasirinktų medžiagų palyginimas

Palyginus *Prusament PLA Orange* ir *Sustarin H natural* medžiagų savybes, galima nustatyti skirtumus jų charakteristikose (žr. 9 pav.). *Sustarin H natural* pasižymi didesniu tankiu – 1,42 g/cm³, palyginti su *Prusament PLA Orange*, kurios tankis siekia 1,24 g/cm³. Tai reiškia, kad *Sustarin H natural* yra sunkesnė medžiaga. Abi medžiagos turi panašų drėgmės sugeriamumo lygį. *Prusament PLA Orange* sugeria 0,19 % drėgmės, o *Sustarin H natural* – 0,2 %. Šis nedidelis skirtumas rodo, kad abi medžiagos yra pakankamai atsparios aplinkos drėgmei. Be to, *Sustarin H natural* lenkia *Prusament PLA Orange* pagal atsparumą tempimui – 75 MPa prieš 45,3 MPa. Ši savybė parodo, kad *Sustarin H natural* yra tinkamesnė naudoti aplinkoje, kur reikia didesnio mechaninio stiprumo.



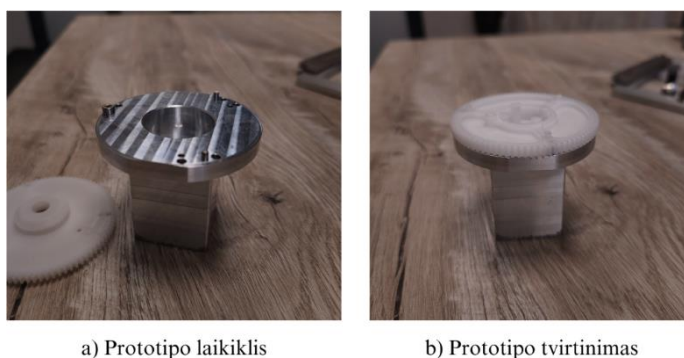
9 pav. Bandinių medžiagų savybių palyginimas

Prusament PLA Prusa Orange ir *Sustarin H natural* yra dvi skirtingos medžiagos, skirtos skirtingoms gamybos technologijoms ir poreikiams. PLA, skirtas 3D spausdinimui, pasižymi paprastu naudojimu, greitu gamybos procesu ir draugiškumu aplinkai, nes yra biologiškai skaidus. Dėl mažo šiluminio atsparumo PLA yra tinkamas prototipams ir mažai apkrautoms detalėms, ypač tais atvejais, kai gamybos greitis, mažesnė kaina ir ekologinė sritis yra prioritetai.

Sustarin H natural yra tvirtesnis inžinerinis plastikas, skirtas didesnėms mechaninėms apkrovoms ir didesniai tikslumui pasiekti, tačiau kartu reikia sudėtingesnio mechaninio apdirbimo ir brangesnių įrankių bei daugiau laiko. Jis idealiai tinka pramoniniams gaminiams, kuriems reikia didesnio atsparumo dilimui, tikslumo ir šiluminio stabilumo.

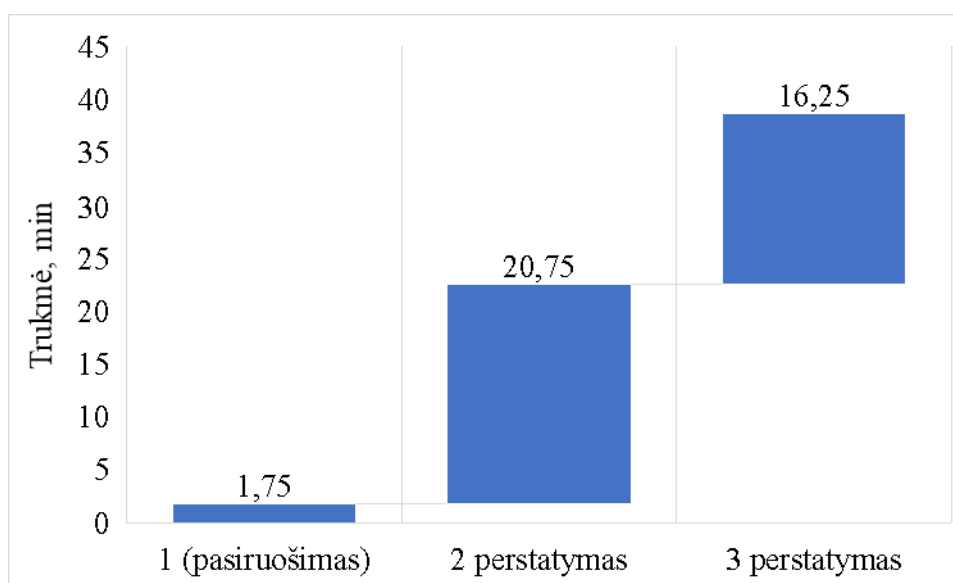
2.5. Bandinio apdirbimas CNC frezavimo staklėmis

CNC frezavimo staklėmis *HASS VF 3SS* gaminamo prototipo ruošinys atpjaunamas 30 mm ilgio nuo 80 mm skersmens POM-H plastiko strypo. Šis ruošinys tvirtinamas specialiaame laikiklyje (žr. 10 pav.), kad išlaikyti ruošinio padėtį CNC staklėse, kol vyksta apdirbimo operacijos (žr. 2 priedą).



10 pav. Frezavimo staklėse tvirtinamo prototipo laikiklis

Detalės gamybai reikia 3 perstatymų staklėse, kurie sudaro bendrą detalės gamybos laiką 38 min 45 s (žr. 11 pav.)



11 pav. Bandinio gamybos laikas CNC frezavimo staklėmis

Po apdirbimo vertinant naudotų 15 įrankių nusidėvėjimą (žr. 6 lent.), įskaitant frezas, grąžtus ir sriegiklius, dauguma jų pasižymi mažu arba vidutiniu nusidėvėjimu, kurį sumažina dangų, tokių kaip DLC, TiAlN ir AlCrN, savybės ir naudojimo dažnis. Didžiausias nusidėvėjimas nustatytas mažo skersmens įrankiams (T06, T13), nes jie labiau pažeidžiami dėl mažo atsparumo frezavimo metu.

6 lentelė. Įrankių nusidėvėjimas apdirbimo metu

| Įrankio kodas | Įrankio pavadinimas | Naudojimo kartai | Nusidėvėjimo vertinimas (1–10 skalėje) | Komentaras |
|---------------|--|------------------|--|--|
| T26 | <i>Garant VHM</i> freza MTC, DLC, D12 mm | 1 | 2 | Mažas nusidėvėjimas dėl DLC dangos ir mažo naudojimo dažnio |
| T20 | <i>Garant VHM-NC</i> centravimo grąžtas, TiAlN, D3 mm | 2 | 3 | Vidutinis nusidėvėjimas |
| T21 | <i>HOLEX Pro Steel VHM</i> grąžtas, TiAlN, D8 mm | 1 | 2 | Vidutinis nusidėvėjimas dėl TiAlN dangos |
| T22 | <i>GARANT VHM</i> spiralinis grąžtas, D2,5 mm | 2 | 4 | Vidutinis nusidėvėjimas, be dangos |
| T23 | <i>GARANT Master Tap</i> mašininis sriegiklis, AlTiX, M3 | 1 | 3 | Sriegimas – aukštas pjovimo apkrovas generuojantis procesas, tačiau mažai naudojamas |
| T24 | <i>GARANT VHM</i> spiralinis grąžtas, TiAlN, D1,6mm | 2 | 4 | Mažas skersmuo, didesnis nusidėvėjimo greitis |
| T28 | <i>GARANT T</i> formos griovelių freza, be dangos, D16 mm | 1 | 3 | Didelis skersmuo, mažas nusidėvėjimas |
| T18 | <i>BlueLine</i> – užbaigimo freza | 1 | 3 | Baigiamoji freza, mažai naudojama |
| T19 | <i>HOLEX VHM</i> nuožulų freza 90°, TiAlN, D10 mm | 1 | 2 | Mažas nusidėvėjimas dėl didelio skersmens ir TiAlN dangos |
| T14 | <i>GARANT VHM</i> spiralinis užvartų nuėmiklis 90°, TiSiN, D3 mm | 2 | 3 | Vidutinis nusidėvėjimas dėl užvartų nuėmimo proceso |
| T13 | <i>GARANT VHM</i> freza toroidiniu galu, DLC, D0,6 mm | 2 | 5 | Didelis nusidėvėjimas dėl mažo skersmens |
| T09 | <i>GARANT VHM</i> freza toroidiniu galu, DLC, D0,8 mm | 1 | 4 | Mažas skersmuo, didesnis nusidėvėjimo greitis |
| T16 | <i>GARANT VHM</i> freza MTC, DLC, D8 mm | 1 | 2 | DLC danga padeda sumažinti nusidėvėjimą |
| T01 | <i>GARANT VHM</i> freza, AlCrN, D3 mm | 1 | 3 | Mažas skersmuo, tačiau AlCrN danga sumažina nusidėvėjimą |
| T06 | <i>GARANT VHM</i> freza MTC, be dangos, D1 mm | 1 | 6 | Mažas skersmuo, be dangos, greitas nusidėvėjimas |

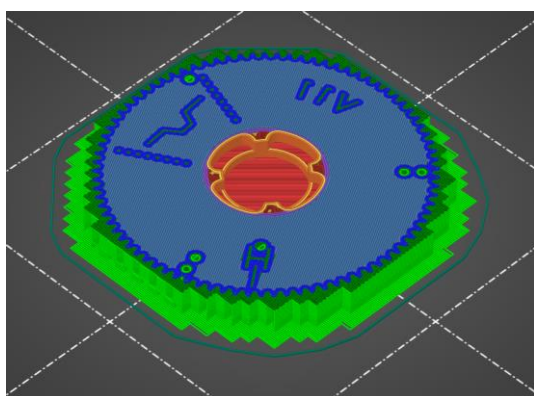
2.6. AM proceso technologinių operacijų sekos sudarymas ir bandinio spausdinimas

2.6.1. AM dizaino kūrimo etapas

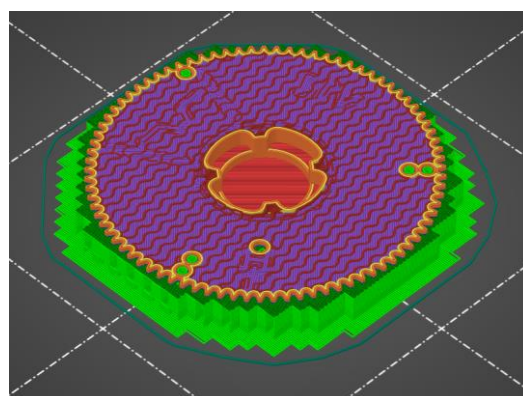
AM prototipui naudojamas tas pats 3D modelis (žr. 8 pav.) kaip ir CNC frezuojamai detalei, užtikrinant projektavimo proceso nuoseklumą ir galimybę lyginti abu gamybos būdus. 3D spausdinimui prototipo modelis išsaugojamas STL formatu, kuris leidžia išlaikyti tikslią modelio geometriją. Tačiau STL failo formatas nėra tiesiogiai palaikomas 3D spausdintuvuose, todėl

reikalinga speciali programinė įranga, vadinama *Slicer*. Programa *PrusaSlicer* leidžia optimizuoti modelį 3D spausdinimui.

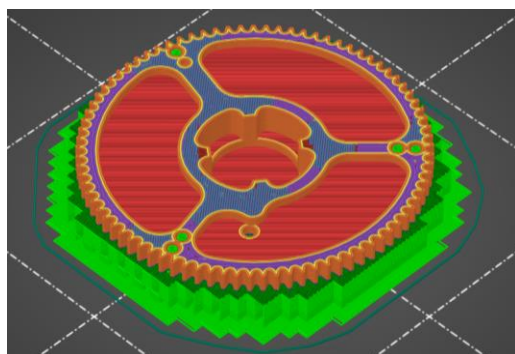
Įkėlus STL failą į *PrusaSlicer*, modelis (žr. 12 pav.) suskaidomas į atskirus sluoksnius, o kiekvienam sluoksniui nustatomos spausdinimo komandos: užpildo tipas, sluoksnių aukštis, užpildo tankis ir kt. Tokiu būdu kiekvienas sluoksnis parengiamas atskirai, siekiant užtikrinti gaminio struktūrą ir kokybę. Galutiniame etape *PrusaSlicer* programinė įranga konvertuoja šią informaciją į G kodą, naudojamą spausdinimo procesui vykdyti.



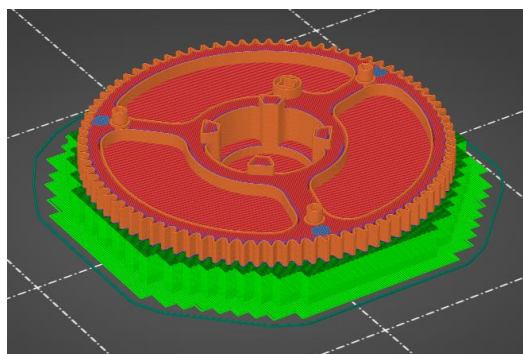
a) 79 sluoksnis



b) 89 sluoksnis



c) 120 sluoksnis



d) 147 sluoksnis (pagaminta detalė)

12 pav. *PrusaSlicer* modelio sluoksniai

2.6.2. Spausdinimo parametrų pasirinkimas

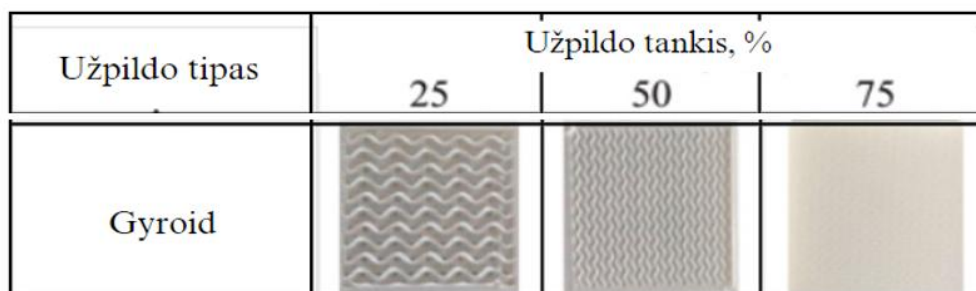
FDM spausdinimo procese naudojamas PLA užpildo tipas (žr. 2.4.2 skyrių), o spausdinimo parametrai pritaikyti *Original Prusa Mini* ir *Mini+* 3D spausdintuvams *PrusaSlicer* programoje. Pagrindiniai nustatymai apima šiuos:

- Purkštuko skersmuo – 0,4 mm
- Stalo temperatūra – 60 °C
- Ekstruderio temperatūra – 215 °C
- Užpildo tankis – 25 %

Spausdinimo metu (žr. 7 lent.) sunaudota 6321,36 mm užpildo, tai atitinka 18,85 g. Užpildo kaštai sudarė 0,47 Eur be PVM. Šis užpildo kiekis buvo sunaudotas be papildomų žaliavos sąnaudų

nuvalymo bokšteliui (angl. *Wipe Tower*), nes šio spausdinimo metu užpildo tam nenaudota. Iš viso gamybos metu buvo sukurti 147 sluoksniai: pirmasis sluoksnis – 0,2 mm aukščio, kad užtikrintų stiprų prisitvirtinimą prie stalo, o visi likę sluoksniai – 0,15 mm aukščio.












Apatinis ir viršutinis užpildai buvo *monotonic* tipo, kuris užtikrina tolygų ir vizualiai estetišką užpildymą. Vidinis užpildas pasirinktas *gyroid* tipo (žr. 13 pav.), kuris suteikia konstrukcijai tvirtumo ir užtikrina efektyvų medžiagos panaudojimą [46]. Palaikymų struktūrai buvo naudojamas *rectilinear* raštas, tiek kontaktiniuose, tiek pagrindiniuose sluoksniuose, siekiant tinkamai paremti sudėtingesnes struktūros dalis.



13 pav. Užpildo intensyvumas priklauso nuo užpildo tankio [46]

Detalė pilnai atspausdinta per 2 val. 8 min, iš kurių pirmasis sluoksnis užtruko 10 min. Šios spausdinimo trukmės apskaičiuotos naudojant standartinį spausdinimo režimą.

7 lentelė. 3D spausdinimo sluoksniai ir resursų panaudojimas

| Sluoksniai | Spalva | Trukmė, min. | % | Sunaudotas užpildas, m | Sunaudotas užpildas, g |
|-------------------------------|---|--------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Perimetras |  | 14 | 10,97 | 0,66 | 1,97 |
| Išorinis perimetras |  | 18 | 14,10 | 0,73 | 2,19 |
| Išsikišimo perimetras |  | 2 | 1,57 | 0,04 | 0,12 |
| Vidinis užpildas |  | 10 | 7,83 | 0,49 | 1,45 |
| Vientisas užpildas |  | 19 | 14,89 | 1,65 | 4,93 |
| Viršutinis vientisas užpildas |  | 4 | 3,13 | 0,20 | 0,61 |
| Naudojamas persidengimas |  | 10 | 7,83 | 0,54 | 1,61 |
| Apsauginis sluoksnis |  | 0,47 | 0,37 | 0,02 | 0,06 |
| Atraminis sluoksnis |  | 32 | 25,07 | 1,66 | 4,94 |
| Atraminio sluoksnio perėjimas |  | 8 | 6,27 | 0,31 | 0,92 |
| Papildomas pritaikymas |  | 0,17 | 0,13 | 0,02 | 0,05 |
| Pirmas sluoksnis | | 10 | 7,83 | - | - |
| Viso: | | 128 | 100,00 | 6,32 | 18,85 |

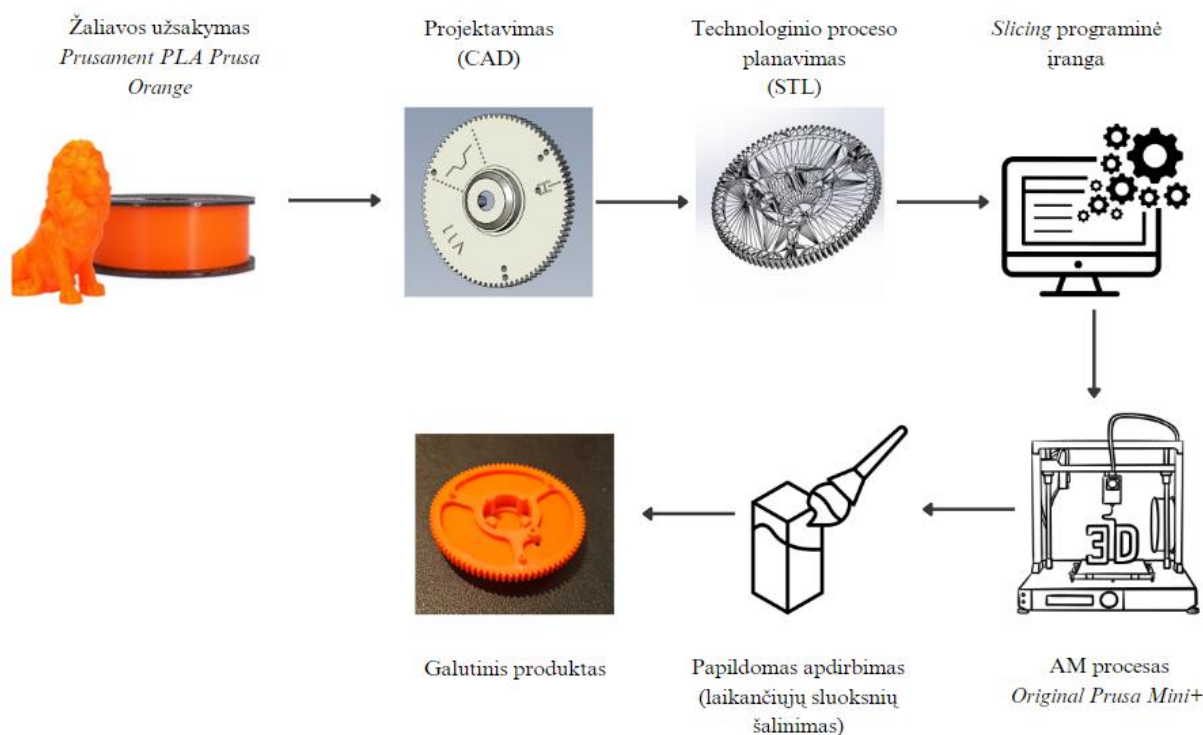
2.6.3. AM technologinių operacijų pasirinkimas plastiko prototipams gaminti

3D spausdinimo procesas yra sudarytas iš 3 pagrindinių žingsnių. Pirma, sukuriamas 3D modelis, kuris vėliau paruošiamas spausdinimui ir spausdinimas 3D spausdintuvu. AM technologija pagamintų detalių kokybė priklauso nuo technologinio pasirengimo. Pirmiausia, reikia sugebėti

naudoti CAD programinę įrangą, norint sukurti ir redaguoti 3D modelius. Būtina išmanyti AM technologijas, bei jų taikymą skirtingiems projektams. Žinios apie medžiagas padeda pasirinkti tinkamą žaliavą atitinkamam projektui, atsižvelgiant į mechanines savybes ir reikalavimus.

Kitas svarbus žingsnis – gebėjimas pasirinkti ir naudoti *Slicer* programinę įrangą. Šios programos yra naudojamos paruošti modelį spausdinimui, todėl reikia išmanyti sluoksnių storio, užpildymo tankio, spausdinimo temperatūros ir kitų parametru reguliavimą. Taip pat būtina suprasti 3D spausdintuvo veikimo principus ir žinoti, kaip tinkamai atlikti jo kalibraciją ir priežiūrą. Tai apima ekstruderio ir šildomo pagrindo veikimo išmanymą. Naudinga žinoti apie dažnai pasitaikančius gedimus ir sprendimo būdus jiems.

Spausdinimo proceso metu kyla įvairių problemų, tokių kaip ekstruderio užsikimšimas ar sluoksnių neatitikimai, todėl reikia gebėti greitai nustatyti ir taisyti klaidas. Taip pat svarbus detalės apdirbimas po spausdinimo, pavyzdžiui, šlifavimas, poliravimas ar paviršiaus padengimas, kuriais pagerinama galutinė gaminio išvaizda. Dar vienas svarbus aspektas – saugumas, ypač dirbant su SLA dervomis ar spausdinant aukštoje temperatūroje. Tinkama ventiliacija ir apsaugos priemonės yra būtinos, kad darbo aplinka būtų saugi. Supaprastinta AM operacijų seka pateikta 14 pav.



14 pav. AM operacijų seka [21]

2.7. Matavimų metodika ir įranga

2.7.1. Matavimų tikslas ir standartai

Matavimų tikslas palyginti dviejų detalių gamybos technologijų rezultatus – frezavimo CNC staklėmis *HASS VF 3SS* ir adityviosios gamybos *Original Prusa Mini+* technologijomis pagamintas

detales, kurioms nebuvo atliktas papildomas paviršiaus apdirbimas po gamybos procesų. Norima nustatyti šių skirtingų gamybos būdų privalumus ir trūkumus atsižvelgiant į kokybinius rodiklius, siekiant priimti sprendimus dėl tinkamiausios gamybos technologijos naudojimo plastiko prototipams gaminti įmonėje X. Pagamintų detalių palyginimui buvo atlikti šie matavimai:

- **Paviršiaus šiurkštumas:** Šiurkštumo matavimai atliekami naudojant *Mitutoyo SJ 210* įrenginį. Tai leidžia įvertinti paviršiaus kokybę, kuri svarbi mechaninių ir estetinių savybių požiūriu. Paviršiaus šiurkštumas gali tiesiogiai įtakoti detalių ilgaamžiškumą ir trinties koeficientą. Šiurkštumo matavimai padės nustatyti, kuris gamybos būdas suteikia geresnę paviršiaus kokybę. Matavimai atliekami remiantis EN ISO 4288 [47] ir EN ISO 3274 [48].
- **Kontūro analizė:** Kontūrografas *Mitutoyo CV 2100M4* naudojamas detalės geometrinių savybių tikslumui įvertinti. Šio matavimo tikslas – nustatyti, kaip tiksliai abiejomis technologijomis pagamintos detalės atitinka 3D modelyje numatytus kontūrus. Kontūrografo duomenys leidžia įvertinti, ar detalė atitinka projektavimo reikalavimus ir ar ji gali būti tinkamai surinkta su kitomis dalimis. Matavimai atliekami remiantis ISO 2768-1 [50].
- **Mikroskopo matavimai:** Naudojamas *Mitutoyo Quick Vision 202* mikroskopas, kad įvertinti detalių matmenų tikslumą ir kokybę. Šie matavimai atliekami siekiant įvertinti, kiek detalių forma skiriasi viena nuo kitos.
- **Kietumo matavimai:** Detalių kietumas matuojamas naudojant *Mitutoyo 811-019* įrenginį. Kietumo matavimas leidžia įvertinti detalių ilgaamžiškumą ir atsparumą mechaninėms apkrovoms. Gamybos proceso metu susidaręs kietumo skirtumas gali nulemti, kuris gamybos būdas yra tinkamesnis tam tikroms eksploatacinėms sąlygoms. Matavimai atliekami remiantis EN ISO 868 [51].
- **Paviršiaus deviacija:** Naudojant *Creaform MetraScan Black Elite 3D* skenerį atliekama paviršiaus deviacijos analizė, kuria nustatomas paviršiaus tikslumo ir nukrypimo nuo projektinių matmenų laipsnis. Šis matavimas padeda įvertinti, kiek detalės paviršius atitinka 3D modelį ir kaip tiksliai gamybos procesas leidžia atitikti geometrijos reikalavimus. Matavimai atliekami pagal ISO 2768-2 [52].

2.7.2. Matavimų aplinka ir įranga

Visi detalių matavimai (žr. 8 lent.), išskyrus paviršiaus deviacijos, atlikti KTU MIDF „Geometrinių matavimų laboratorijoje“. Ši laboratorija yra aprūpinta modernia matavimo įranga, užtikrinančia aukštą matavimų tikslumą ir patikimumą. Matavimai buvo atlikti kontroliuojamomis aplinkos sąlygomis, siekiant minimizuoti aplinkos veiksnių įtaką rezultatams.

Paviršiaus deviacijos matavimai atlikti įmonėje X, naudojant *Creaform MetraScan Black Elite 3D* skenerį. Matavimai atlikti specialiai įrengtoje aplinkoje, kuri nėra veikiamą išorinių vibracijų, taip pat ant specialiai pritaikyto granitinio stalo paviršiaus.

8 lentelė. Matavimo įrenginių sąrašas

| Eil. nr. | Įranga | Modelis | Pagrindiniai parametrai | Privalumai | Trūkumai |
|----------|---------------------------------|------------------------|--|--|---|
| 1 | Paviršiaus šiurkštumo matuoklis | <i>Mitutoyo SJ 210</i> | Šiurkštumo matavimo intervalas: 0,01–350 μm. | Aukštas tikslumas, paprastas naudojimas. | Tikslumas priklauso nuo operatoriaus įgūdžių. |

| Eil. nr. | Įranga | Modelis | Pagrindiniai parametrai | Privalumai | Trūkumai |
|----------|-------------------|---------------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| 2 | Kontūrografas | <i>Mitutoyo CV 2100M4</i> | Maks. matavimo ilgis: 200 mm, tikslumas ± 2 μm . | Didelis matavimo tikslumas. | Ribotas matavimo ilgis. |
| 3 | Mikroskopas | <i>Mitutoyo Quick Vision 202</i> | Tikslumas: $\pm 1,5$ μm , matavimo laukas 200x200 mm. | Optinis matavimas, aukštas tikslumas. | Ribotas matavimo laukas. |
| 4 | Kietumo matuoklis | <i>Mitutoyo 811-019</i> | Matavimo diapazonas: 10–100 HV. | Platus matavimo diapazonas. | Specifiniai matavimo apribojimai. |
| 5 | 3D skeneris | <i>Creaform MetraScan Black Elite</i> | Tikslumas: iki 0,025 mm, skenavimo laukas: 500 mm. | Greitas duomenų surinkimas, didelis tikslumas. | Sudėtinga matuoti mažesnes detales. |

2.8. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje apibrėžtos dvi pasirinktos bandinių gamybos technologijos – CNC frezavimas ir AM, jų taikymo galimybės prototipams gaminti, taip pat pasirinktos medžiagos bei matavimo metodai, skirti įvertinti šių technologijų efektyvumą ir pritaikomumą įmonės X gamybos procesuose. Šis vertinimas sudaro pagrindą išryškinti kiekvienos technologijos stipriąsias puses, apribojimus ir galimą AM ekonominę naudą.

Įmonėje X naudojama *HASS VF 3SS* frezavimo įranga, kurios pagrindinis privalumas yra pasiekti didelį matmenų tikslumą, tačiau dažnai atvejais tam naudojami papildomi įrankiai ruošiniams tvirtinti. Bandiniams pasirinktas plastikas POM-H, dėl savo mechaninio stiprumo, atsparumo deformacijoms ir matmenų stabilumo. Tačiau CNC frezavimo trūkumai apima ilgesnį ruošinių apdorojimo laiką, didesnę įrankių nusidėvėjimo riziką ir sudėtingesnę atliekų tvarkymą. Be to, CNC staklių naudojimas prototipams gaminti užima gamybos pajėgumus, kuriuos galima būtų panaudoti serijinei gamybai.

FDM technologija yra vienas iš ekonomiškiausių ir universaliausių AM metodų, kuriuo galima greitai gaminti detales. Prototipui gaminti pasirinktas *Original Prusa Mini+* 3D spausdintuvas, kuris vertinamas dėl mažų eksploatacinių sąnaudų, paprastos priežiūros ir gana aukštos kokybės spausdinimo galimybių. 3D spausdinimui naudojamas biologiškai skaidžių savybių PLA plastikas, kuris tinkamas detalėms neturinčioms didelių apkrovų.

Siekiant įvertinti abiejų gamybos technologijų tinkamumą ir galimybes, pasirinkti tikslūs ir nuoseklūs matavimo metodai: paviršiaus kokybė, geometrijos tikslumas, matmenų nuokrypiai, paviršiaus deviacija. Šie matavimai atliekami KTU MIDF „Geometrinių matavimų laboratorijoje“ ir įmonėje X. Kontroluojamose matavimų aplinkose atliktų matavimų rezultatai užtikrina tikslumą ir patikimumą. Visos matavimo sąlygos ir prietaisų kalibravimo standartai pritaikyti pagal metrologijos reikalavimus.

Apibrėžtos technologijos, medžiagos ir matavimo metodai sudaro galimybę detaliam CNC ir AM procesų palyginimui. Surinkti duomenys bus naudojami vertinti, kaip šios gamybos technologijos atitinka įmonės X poreikius.

3. Gamybos proceso efektyvumo ir prototipo detalių matavimų vertinimas

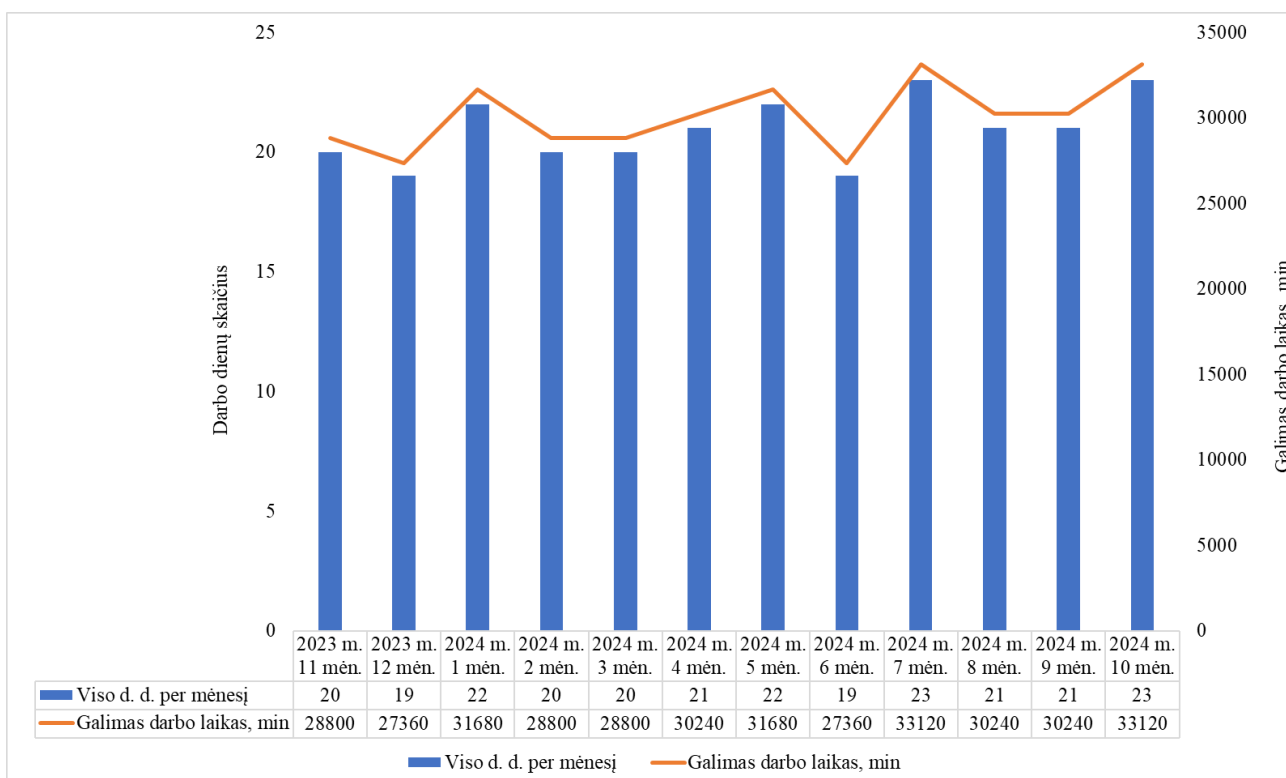
Šiame skyriuje vertinamas CNC frezavimo gamybos efektyvumas ir prototipo detalių matavimai, siekiant įvertinti tiek tradiciniu, tiek AM metodu pagamintų detalių kokybę ir tikslumą. CNC frezavimo proceso efektyvumas matuojamas pagal OEE, kuris padeda objektyviai įvertinti įrangos našumą, kokybės ir laiko efektyvumą. Skaičiuojant OEE, siekiama nustatyti veiksnius, kuriais įtakojamas gamybos proceso našumas.

Taip pat vertinami pagamintų detalių matavimai, lyginant CNC frezavimo būdu ir adityviosios gamybos FDM technologija pagamintus bandinius. Šis metodas padės įvertinti abiejų metodų tikslumą. Išvados bus naudingos nustatant, kokiais atvejais vienas ar kitas gamybos metodas yra labiau pritaikomas prototipams gaminti.

3.1. Bendrojo CNC frezavimo įrangos efektyvumo (OEE) vertinimas

3.1.1. Prieinamumo rodiklio skaičiavimas

OEE skaičiavimams naudoti duomenys iš įmonės X vaizdo kamerų įrašų, ERP sistemos bei kasdienių darbuotojų ataskaitų nuo 2023 m. lapkričio mėn. iki 2024 m. spalio mėn. Darbo laiko prieinamumas priklauso nuo bendro darbo dienų skaičiaus per mėnesį ir darbo laiko per parą (žr. 15 pav.). Iš pateikto grafiko matyti, kad darbo dienų skaičius per mėnesį svyruoja nuo 19 iki 23 dienų. Šie darbo grafiko duomenys naudojami planuojant darbo krūvį ir resursus.

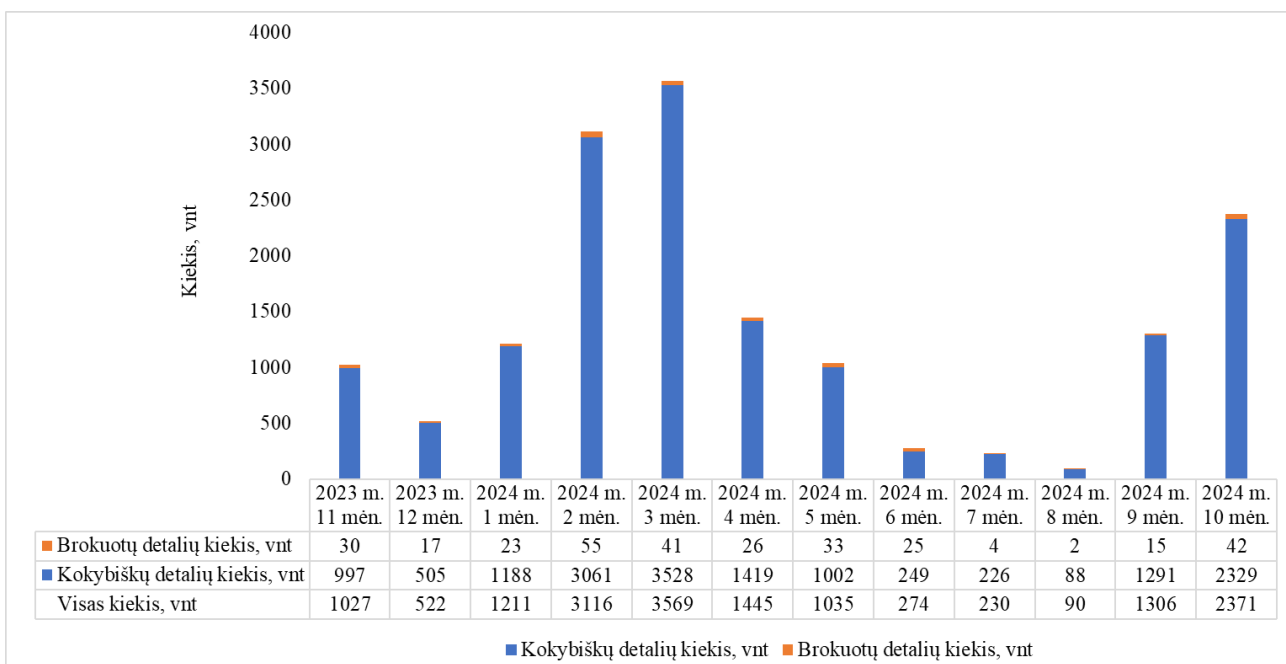


15 pav. Galimas staklių darbo laikas (2023 m. 11 mėn. – 2024 m. 10 mėn.)

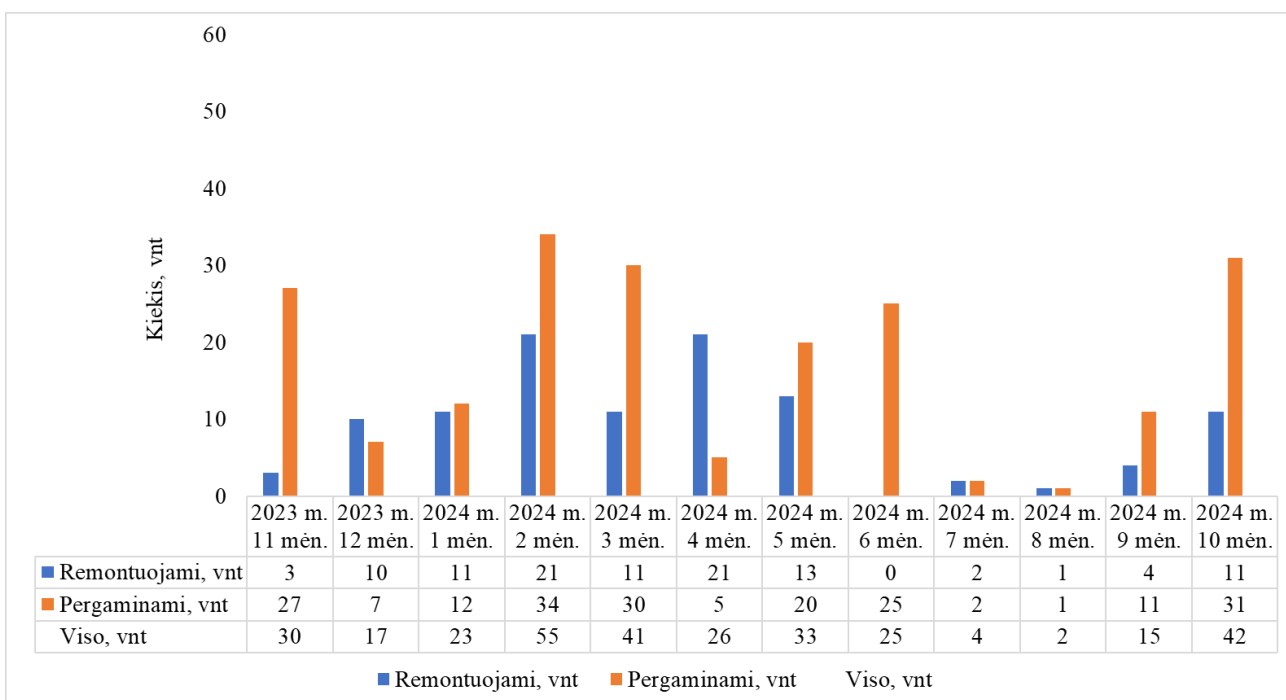
Vertinant 2023 m. lapkričio mėn. – 2024 m. spalio mėn. laikotarpio gamybos duomenis (žr. 16 pav.), nustatyta, kad per šį laikotarpį CNC frezavimo staklėmis buvo apdirbta 16 196 detalių, iš kurių 15 883 vnt. atitiko kokybės reikalavimus. Iš viso nustatyta 313 broko atvejų, kuriuos sudarė 108 detalės,

kurioms reikėjo remonto, ir 205 detalės, kuriuos turėjo pagaminti (žr. 17 pav.). Didžiausias broko kiekis užfiksuotas 2024 m. vasario mėn. – 55 vnt. ir kovo – 41 vnt.

Vertinant darbuotojų pateikiamas darbų įvykdymo ataskaitas, broko kiekis tiesiogiai priklauso nuo naujų gaminių įvedamo kiekio į gamybą. Nustatyta, kad ERP sistemoje trūksta tikslumo, nes darbuotojai pažymi pagamintą kiekį, tačiau ne prieš pradėdami operaciją, kad nustatyti pradžios ir pabaigos laikus, o jau pagaminus detales. Kadangi įmonė dirba visus metus, išskyrus šventines dienas ir savaitgalius, todėl darbo laikas buvo apskaičiuotas atitinkamai.



16 pav. Pagamintų detalių kiekis (2023 m. 11 mėn. – 2024 m. 10 mėn.)



17 pav. Brokuotos produkcijos kiekis (2023 m. 11 mėn. – 2024 m. 10 mėn.)

Prastovų duomenys įmonėje X registruojami žiniaraštyje, esančiame prie kiekvieno įrenginio. Vertinant duomenis (žr. 9 lent.), nustatyta, kad vidutiniškai valymo prastovos trunka nuo 11 iki 16 min. Planuotiems sustojimams skiriama 60 min. per parą – tai apima dviejų pamainų po 30 min. pertraukas ir 8 val. nedarbo laiką naktimis. Vidutinis įrangos įšilimo ir užsikrovimo laikas – 12,5 min. Bendriems gedimams priskiriamas laikas apima įrankių lūžius, ruošinio sugadinimą ar pakeitimą ir kt.

9 lentelė. Metinis CNC frezavimo staklių darbo ir sustojimų laikas

| Mėnesis | Galimas darbo laikas, min. | Įrenginio prastovos | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | | Valymo laikas, min. | Planuoti sustojimai, min. | Įšilimo laikas, min. | Bendri gedimai, min. | Įrenginio gedimai, min. | Energijos išjungimas, min. | Bendras vėlavimų laikas, min. |
| 2023 m. lapkritis | 28800 | 240 | 10810 | 250 | 637 | 1800 | 60 | 13797 |
| 2023 m. gruodis | 27360 | 230 | 10270 | 238 | 608 | 1140 | 0 | 12485 |
| 2024 m. sausis | 31680 | 330 | 11890 | 275 | 787 | 1760 | 0 | 15042 |
| 2024 m. vasaris | 28800 | 240 | 10810 | 250 | 637 | 2100 | 0 | 14037 |
| 2024 m. kovas | 28800 | 200 | 10810 | 250 | 585 | 1800 | 20 | 13665 |
| 2024 m. balandis | 30240 | 336 | 11350 | 263 | 778 | 1050 | 0 | 13777 |
| 2024 m. gegužė | 31680 | 220 | 11890 | 275 | 644 | 1980 | 0 | 15009 |
| 2024 m. birželis | 27360 | 209 | 10270 | 238 | 580 | 1995 | 120 | 13412 |
| 2024 m. liepa | 33120 | 345 | 12430 | 288 | 822 | 1840 | 100 | 15825 |
| 2024 m. rugpjūtis | 30240 | 273 | 11350 | 263 | 696 | 1680 | 0 | 14262 |
| 2024 m. rugsėjis | 30240 | 294 | 11350 | 263 | 723 | 630 | 0 | 13260 |
| 2024 m. spalio | 33120 | 345 | 12430 | 288 | 822 | 1955 | 30 | 15870 |
| Viso | 361440 | 3262 | 135660 | 3138 | 8319 | 19730 | 330 | 170439 |

Vertinant pateiktus mėnesinius darbo laiko ir prastovų duomenis, matoma, kad per pastaruosius metus galimas darbo laikas siekė 361 440 min. Iš jų bendras vėlavimų laikas sudarė 170 439 min. Šios prastovos susidarė dėl valymo, planuotų sustojimų, įrangos užsikrovimo, bendrųjų gedimų ir energijos atjungimų.

Bendras prastovų laikas per nurodytą laikotarpį siekia 19 319 min. (žr. 10 lent.). Pagrindiniai prastovas sudarantys veiksniai yra bendri gedimai, pasiruošimo laikas ir nustatymų laikas. Didžiausias bendras prastovų laikas užfiksuotas 2024 m. liepos mėn. – 1832 min., o mažiausias – 2024 m. birželio mėn. – 1415 min. Vertinant gedimų žiniaraštį ir pagamintą detalių kiekį 2024 m. liepos mėn. nustatyta, kad tam įtakos turėjo darbuotojų atostogos, per kurias staklių operatoriai buvo pakeisti mažiau kvalifikuotais darbuotojais, kad gamintų detales, kurioms reikia ilgo apdirbimo laiko.

10 lentelė. Metinis prastovų skaičiavimas

| Mėnesis | Bendri gedimai, min. | Pasiruošimo laikas, min. | Nustatymų laikas, min. | Bendras prastovos laikas, min. |
|-------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 2023 m. lapkritis | 637 | 600 | 275 | 1512 |
| 2023 m. gruodis | 608 | 570 | 265 | 1443 |
| 2024 m. sausis | 787 | 660 | 305 | 1752 |
| 2024 m. vasaris | 637 | 600 | 275 | 1512 |
| 2024 m. kovas | 585 | 600 | 275 | 1460 |
| 2024 m. balandis | 778 | 630 | 290 | 1698 |
| 2024 m. gegužė | 644 | 660 | 305 | 1609 |
| 2024 m. birželis | 580 | 570 | 265 | 1415 |
| 2024 m. liepa | 822 | 690 | 320 | 1832 |
| 2024 m. rugpjūtis | 696 | 630 | 290 | 1616 |
| 2024 m. rugsėjis | 723 | 630 | 290 | 1643 |
| 2024 m. spalio | 822 | 690 | 315 | 1827 |
| Viso | - | - | - | 19319 |

Iš turimų duomenų apskaičiavus vidutinį metinį prieinamumo rodiklį (žr. 11 lent.) nustatyta, kad jis vidutiniškai siekė 0,91, o tai rodo, kad 91 % apkrovos laiko įranga veikė efektyviai, atsižvelgiant į prastovas. Didžiausias veikimo laikas fiksuojamas liepos mėnesį, kai buvo gaminamas gana nedidelis mėnesinis detalių kiekis, tačiau ilgu apdirbimo laiku.

11 lentelė. Metinio užimtumo ir prieinamumo vertės skaičiavimas

| Eil.nr. | Mėnesis | Galimas darbo laikas, min. | Planuoti sustojimai, min. | Apkrovos laikas, min. | Bendras prastovos laikas, min. | Veikimo laikas, min. | Prieinamumo rodiklis |
|---------|-------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 2023 m. lapkritis | 28800 | 10810 | 17990 | 1512 | 16478 | 0,92 |
| 2 | 2023 m. gruodis | 27360 | 10270 | 17090 | 1443 | 15647 | 0,92 |
| 3 | 2024 m. sausis | 31680 | 11890 | 19790 | 1752 | 18039 | 0,91 |
| 4 | 2024 m. vasaris | 28800 | 10810 | 17990 | 1512 | 16478 | 0,92 |
| 5 | 2024 m. kovas | 28800 | 10810 | 17990 | 1460 | 16530 | 0,92 |
| 6 | 2024 m. balandis | 30240 | 11350 | 18890 | 1698 | 17192 | 0,91 |
| 7 | 2024 m. gegužė | 31680 | 11890 | 19790 | 1609 | 18182 | 0,92 |
| 8 | 2024 m. birželis | 27360 | 10270 | 17090 | 1415 | 15675 | 0,92 |
| 9 | 2024 m. liepa | 33120 | 12430 | 20690 | 1832 | 18858 | 0,91 |
| 10 | 2024 m. rugpjūtis | 30240 | 11350 | 18890 | 1616 | 17274 | 0,91 |
| 11 | 2024 m. rugsėjis | 30240 | 11350 | 18890 | 1643 | 17247 | 0,91 |
| 12 | 2024 m. spalio | 33120 | 12430 | 20690 | 1827 | 18863 | 0,91 |
| | Viso | 361440 | 135660 | 225780 | - | - | - |
| | Vidurkis | - | - | - | - | - | 0,91 |

3.1.2. Našumo efektyvumas ir kokybės rodiklių skaičiavimas

Mėnesiniai gamybos duomenys, įskaitant ciklo laiką (žr. 12 lent.) surinkti remiantis realiais atlikimo laikais iš vaizdo kamerų įrašų 2023 m., o nuo 2024 m. – iš ERP sistemos. Šie duomenys yra būtini standartinio laiko apskaičiavimui.

Apskaičiavus standartinį laiką pagal 6 formulę, nustatyti laiko svyravimai nuo 4,91 min./vnt. iki 184 min./vnt. Šie svyravimai rodo skirtingą gamybos intensyvumą ir sudėtingumą kiekvieną mėnesį.

$$\text{Įprastas laikas} = \text{ciklo laikas} \times \frac{\text{įvertinimo koeficientas \%}}{100 \%}; \quad (5)$$

$$\text{Standartinis laikas} = \text{įprastas laikas} \times \frac{100 \%}{100 \% - \text{atsarga \%}}. \quad (6)$$

12 lentelė. Metinis CNC frezavimo staklių darbo įprastasis ir standartinis laikas

| Mėnesis | Ciklo laikas, min | Įvertinimo koeficientas | Įprastas laikas, min | Atsarga, % | Standartinis laikas, min/vnt |
|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|------------|------------------------------|
| 2023 m. lapkritis | 10,10 | 0,15 | 11,62 | 22 | 14,17 |
| 2023 m. gruodis | 19,99 | 0,15 | 22,99 | 22 | 28,05 |
| 2024 m. sausis | 9,90 | 0,15 | 11,39 | 22 | 13,89 |
| 2024 m. vasaris | 3,50 | 0,15 | 4,03 | 22 | 4,91 |
| 2024 m. kovas | 3,10 | 0,15 | 3,57 | 22 | 4,35 |
| 2024 m. balandis | 7,90 | 0,15 | 9,09 | 22 | 11,08 |
| 2024 m. gegužė | 11,25 | 0,15 | 12,94 | 22 | 15,78 |
| 2024 m. birželis | 37,26 | 0,15 | 42,85 | 22 | 52,28 |
| 2024 m. liepa | 55,90 | 0,15 | 64,29 | 22 | 78,43 |
| 2024 m. rugpjūtis | 131,30 | 0,15 | 151,00 | 22 | 184,21 |
| 2024 m. rugsėjis | 8,21 | 0,15 | 9,44 | 22 | 11,52 |
| 2024 m. spalio | 4,95 | 0,15 | 5,69 | 22 | 6,94 |

Žinodami aukščiau esančius duomenis, apskaičiuojame X įmonės CNC frezavimo staklių HASS VF 3SS OEE kiekvieną mėnesį (žr. 13 lent.). Tam svarbu sužinoti realų ciklo laiką, kuris skaičiuojamas naudojantis 7 formule:

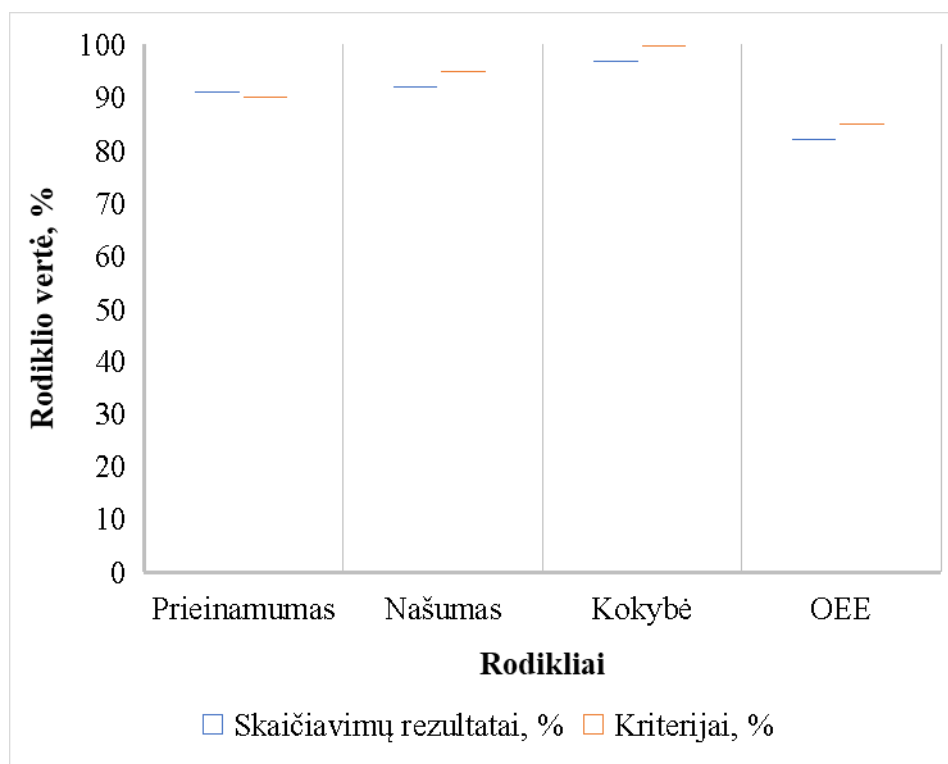
$$\text{Realus ciklo laikas} = \frac{\text{veikimo laikas}}{\text{visas pagamintas kiekis}}. \quad (7)$$

13 lentelė. Realus ciklo laiko ir metinio našumo efektyvumo skaičiavimas

| Mėnesis | Veikimo laikas, min. | Visas kiekis, vnt. | Viso brokų, vnt. | Realus ciklo laikas, min./vnt. | Idealus ciklo laikas, min./vnt. | Našumo efektyvumas | Kokybės rodiklis | OEE |
|-------------------|----------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|------|
| 2023 m. lapkritis | 16478 | 1027 | 30 | 16,05 | 14,17 | 0,88 | 0,97 | 0,78 |
| 2023 m. gruodis | 15647 | 522 | 17 | 29,99 | 28,05 | 0,94 | 0,97 | 0,83 |

| Mėnesis | Veikimo laikas, min. | Visas kiekis, vnt. | Viso brokų, vnt. | Realus ciklo laikas, min./vnt. | Idealus ciklo laikas, min./vnt. | Našumo efektyvumas | Kokybės rodiklis | OEE |
|-------------------|----------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|-------------|
| 2024 m. sausis | 18039 | 1211 | 23 | 14,90 | 13,89 | 0,93 | 0,98 | 0,83 |
| 2024 m. vasaris | 16478 | 3116 | 55 | 5,29 | 4,91 | 0,93 | 0,98 | 0,84 |
| 2024 m. kovas | 16530 | 3569 | 41 | 4,63 | 4,35 | 0,94 | 0,99 | 0,85 |
| 2024 m. balandis | 17192 | 1445 | 26 | 11,90 | 11,08 | 0,93 | 0,98 | 0,83 |
| 2024 m. gegužė | 18182 | 1035 | 33 | 17,56 | 15,78 | 0,90 | 0,97 | 0,80 |
| 2024 m. birželis | 15675 | 274 | 25 | 57,26 | 52,28 | 0,91 | 0,91 | 0,76 |
| 2024 m. liepa | 18858 | 230 | 4 | 81,90 | 78,43 | 0,96 | 0,98 | 0,86 |
| 2024 m. rugpjūtis | 17274 | 90 | 2 | 191,93 | 184,21 | 0,96 | 0,98 | 0,86 |
| 2024 m. rugsėjis | 17247 | 1306 | 15 | 13,21 | 11,52 | 0,87 | 0,99 | 0,79 |
| 2024 m. spalio | 18863 | 2371 | 42 | 7,95 | 6,94 | 0,87 | 0,98 | 0,78 |
| Vidurkis | - | - | - | - | - | 0,92 | 0,97 | 0,82 |

CNC frezavimo staklių vidutinis našumo efektyvumas per 1 metus siekė 0,92, kokybės rodiklis – 0,97, o bendras vidutinis OEE – 0,82. Kiekvienos įmonės OEE rodiklis atitinka pasaulinės klasės standartus, jei tenkina šiuos kriterijus: 90 % prieinamumo, 95 % našumo ir 99,9 % kokybės [35]. Atsižvelgiant į X įmonės CNC frezavimo staklių veiklos rezultatus, nustatyta, kad vyrauja gana aukštas įrenginio efektyvumas (žr. 18 pav.), tačiau pagal pasaulinės klasės standartus OEE turėtų siekti 85 %.

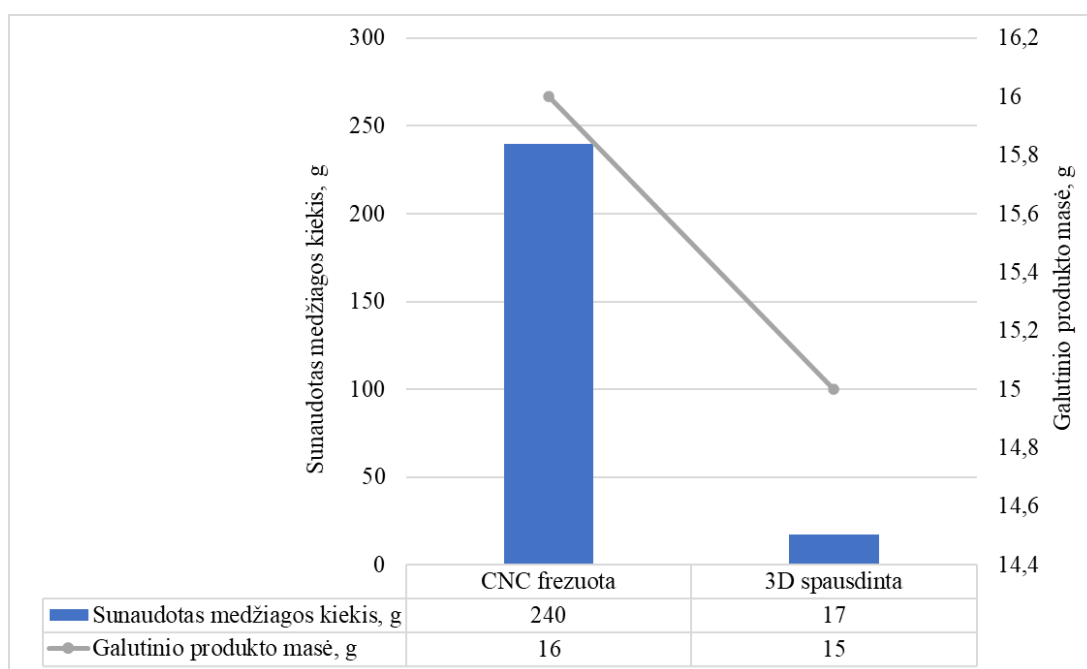


18 pav. Metinis efektyvumo rodiklių palyginimas

3.2. Medžiagų panaudojimo bandiniams efektyvumo palyginimas

Vertinant medžiagų panaudojimo efektyvumą (žr. 19 pav.), frezuojant CNC staklėmis sunaudojama daug daugiau medžiagos – net 240 g, palyginti su 17 g, kurie sunaudojami gaminant detalę 3D spausdinimo technologija. Tai rodo, kad CNC frezavimo procesas yra 14 kartų mažiau efektyvus medžiagos sunaudojimo požiūriu.

Nepaisant didelio skirtumo sunaudotoje medžiagoje, galutinio produkto masė yra beveik identiška – CNC frezuota detalė sveria 16 g, o 3D spausdinta detalė – 15 g (žr. 3 priedą).



19 pav. Medžiagų panaudojimo efektyvumo palyginimas

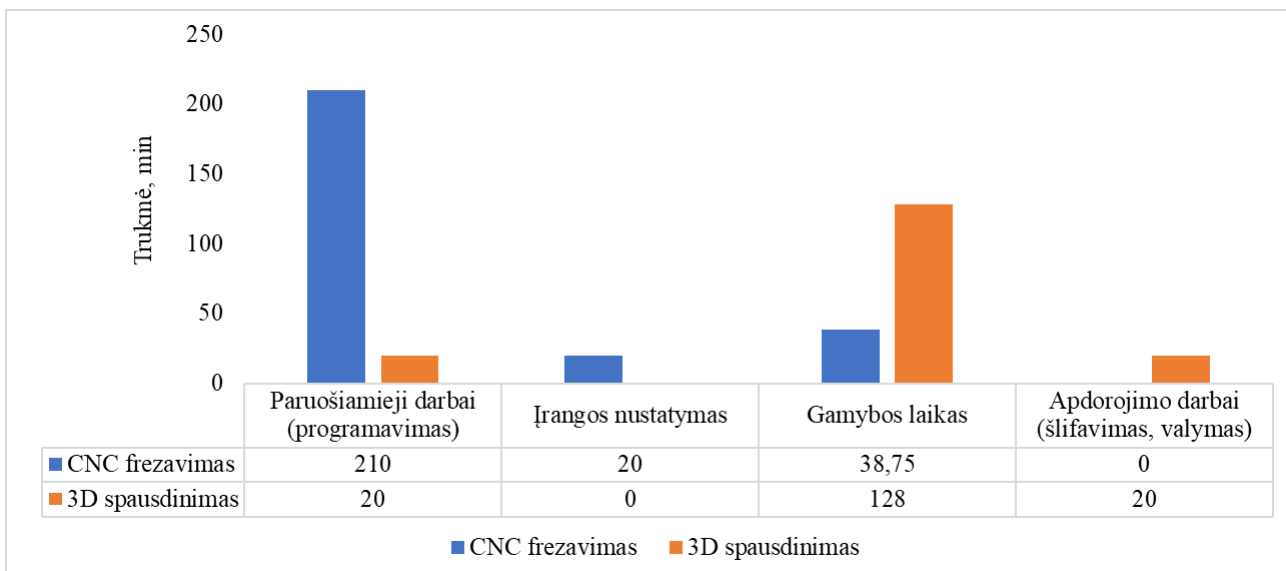
CNC frezavimo efektyvumas yra mažesnis, nes galutinio gaminio masė labai skiriasi nuo pradinio ruošinio masės – net 224 g virsta plastiko atliekomis, kas sudaro 93,3 % sunaudotos medžiagos. 3D spausdinimo proceso metu plastiko atliekos sudaro tik 2 g, nors pagal pradinį skaičiavimą *PrusaSlicer* (žr. 7 lent.) buvo prognozuota, kad atliekų kiekis sieks 3,85 g. Bendrai medžiagos kiekis sunaudojamas CNC frezavimo metu yra 14 kartų didesnis, negu AM technologijos atveju.

3.3. Gamybos trukmės efektyvumo vertinimas

Lyginant CNC frezavimą ir 3D spausdinimą pagal gamybos trukmę (žr. 20 pav.), nustatyta, kad CNC frezavimui reikia daug daugiau laiko paruošiamiesiems darbams. Tai lemia sudėtingi programavimo procesai ir įrankių judėjimo nustatymai, kurie yra būtini. 3D spausdinimo technologijoje paruošiamieji darbai užtrunka trumpiau, nes CAD modelis nesudėtingai konvertuojamas į STL formato failą ir tiesiogiai perduodamas 3D spausdinimui.

Paruošiamieji darbai ir įrangos nustatymo etapas taip pat reikšmingai skiriasi: CNC frezavimas bendrai užtrunka 230 min., o 3D spausdinime reikalingas tik įrangos nustatymas, kurio trukmė 20 min. Gamybos etape CNC frezavimas yra greitesnis – 38,75 min., palyginti su 3D spausdinimu, kuris trunka 128 min. Pastarasis procesas užima daugiau laiko dėl sluoksnių formavimo technologijos. Be

to, po 3D spausdinimui būtinas papildomas 20 min. apdirbimas, skirtas pašalinti atrامينius sluoksnius, pridetus spausdinimo metu.



20 pav. CNC frezavimo ir 3D spausdinimo gamybos trukmės palyginimas

Bendra proceso trukmė rodo, kad CNC frezavimas yra ilgesnis procesas dėl sudėtingų paruošiamųjų darbų, tačiau greitesnis gamybos etape. 3D spausdinimas yra pranašesnis gamyboje dėl paprastesnio pasiruošimo ir minimalios įrangos priežiūros spausdinimo proceso metu.

3.4. Tradiciniu būdu ir adityviosios gamybos metodu pagamintų detalių matavimų rezultatai

3.4.1. Paviršiaus šiurkštumo matavimų rezultatai

Paviršiaus šiurkštumo matavimai (žr. 4, 5 priedus) buvo atliekami naudojant *Mitutoyo SJ-210* šiurkštumo matuoklį (žr. 21 pav.). Matavimo sąlygos nustatytos pagal EN ISO 4288 ir EN ISO 3274 reikalavimus, nurodančius bangos ilgį λ_c , zondo antgalio spindulį $r_{antgalis}$ ir vertinimo ilgį l_n .



21 pav. Mitutoyo SJ-210 šiurkštumo matuoklis

Šiurkštumo parametro vertė Ra gauta naudojant duomenis, išmatuotus tik per vieną matavimo ilgį. Rezultatai rodo (žr. 14 lent.), kad frezuotos detalės paviršius yra lygesnis, nei 3D spausdintos detalės, nes frezuotos detalės gauta Ra reikšmė – 0,379 μm yra mažesnė už 3D spausdintos detalės Ra reikšmę – 0,42 μm . Rz ir RzI_{max} vertės taip pat patvirtina šią tendenciją, nors skirtumai išlieka nedideli. Nepaisant riboto frezuotos detalės paviršiaus ploto ir dėl sumažinto bandomojo ilgio, rezultatai išliko palyginami (žr. 22 pav.).

14 lentelė. Šiurkštumo matavimo rezultatai

| Detalė | Matavimo sąlygos pagal EN ISO 4288 ir EN ISO 3274 | | | | Gautos reikšmės | | |
|---------------|---|--------------------------------|------------|------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| | $\lambda_c = l_r$, mm | $r_{antgalis}$, μm | l_n , mm | l_t , mm | Ra , μm | Rz , μm | RzI_{max} , μm |
| Frezuota | 2,5 | 5 | 12,5 | 15 | 0,379 | 2,52 | 2,906 |
| 3D spausdinta | 0,25 | 2 | 1,25 | 1,5 | 0,42 | 2,505 | 3,155 |

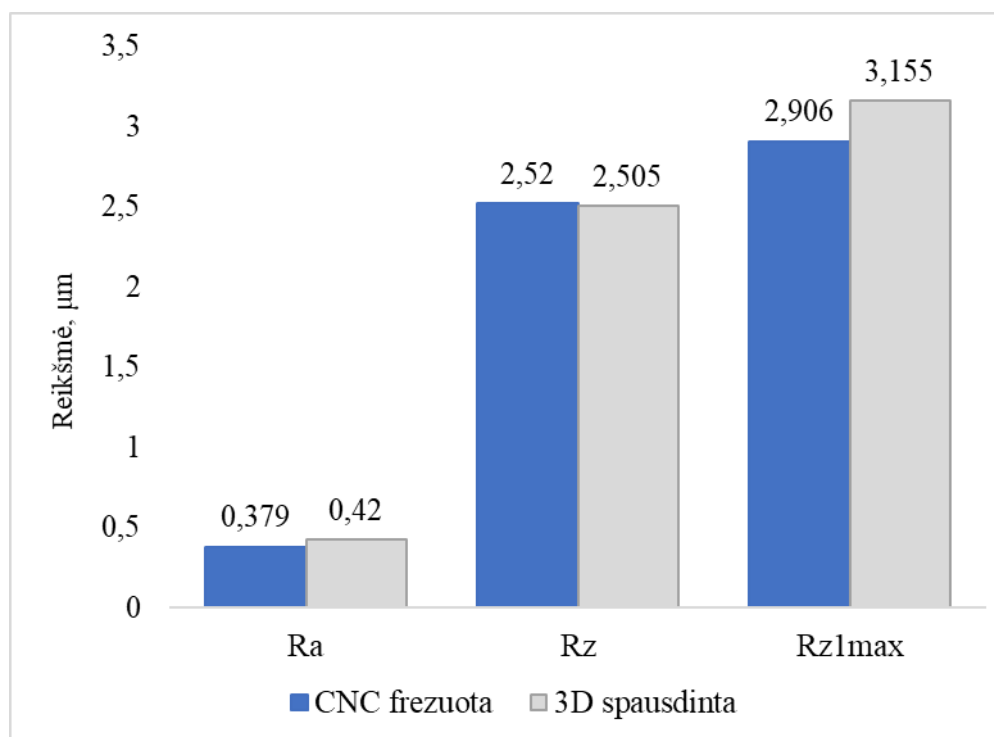
Paaškinimai:

λ_c – ribinis bangos ilgis, naudojamas filtravimui atskirti šiurkštumo ir bangų komponentus;

Ra – aritmetinė vidutinė šiurkštumo vertė, rodanti bendrą paviršiaus nelygumų lygį;

Rz – vidutinis šiurkštumo gylis, išreiškiantis atstumą tarp aukščiausio ir žemiausio taškų vidurkio per bandomąjį ilgį;

RzI_{max} – maksimalus vieno bandomojo ilgio šiurkštumo gylis, nurodantis maksimalų paviršiaus nelygumą.



22 pav. CNC frezuotos ir 3D spausdintos detalių paviršiaus šiurkštumo matavimų reikšmių grafikas

Abiejų detalių gautos Ra reikšmės parodo, kad tai yra geriausios kokybės paviršiaus šiurkštumas. Jis tinkamas detalėms, kurios patiria didelę įtampą ir apkrovą. Taip pat, esant tokiai šiurkštumo reikšmei detalės gali būti naudojamos kaip greitai besisukantys komponentai [49].

3.4.2. Kontūrografo matavimų rezultatai

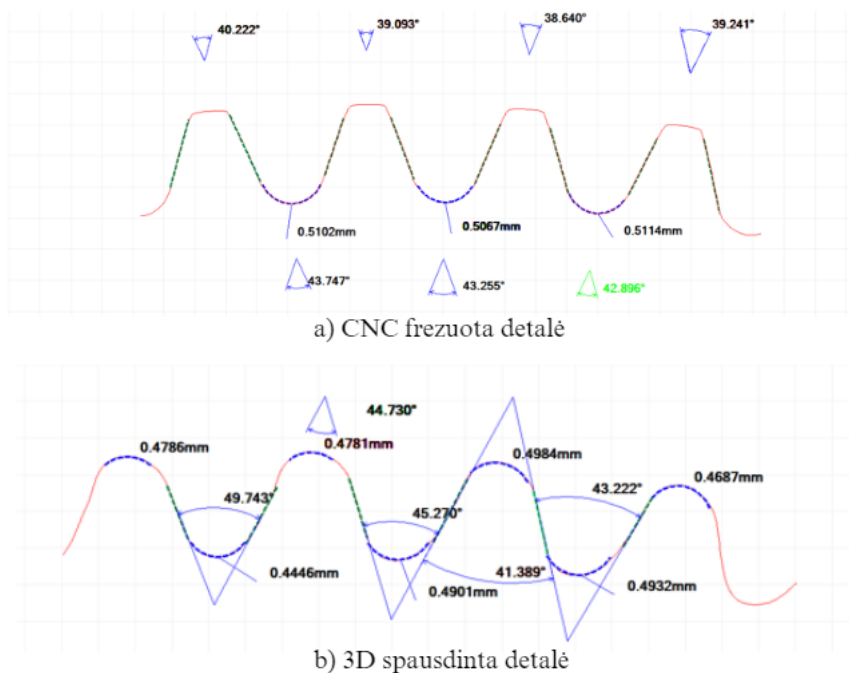
Šiame skyriuje pateikiami matavimo rezultatai, gauti naudojant *Mitutoyo CV 2100M4* kontūrografą (žr. 23 pav.), kuris leidžia tiksliai įvertinti detalių geometriją ir jų paviršiaus kontūro savybes.



23 pav. *Mitutoyo CV 2100M4* kontūrografas

Pateikti vaizdai (žr. 24 pav.) iliustruoja kontūrografo matavimo rezultatus – CNC frezuotos detalės (a) ir 3D spausdintos detalės (b). CNC frezuota detalė pasižymi aukštesniu geometriiniu tikslumu – kreivės ir kraštai yra tolygūs. Matomų vidinių kampų nuokrypiai (viršuje) yra beveik vienodi, ir visi matuojami kampai svyruoja tarp 38,241–40,222 laipsnių.

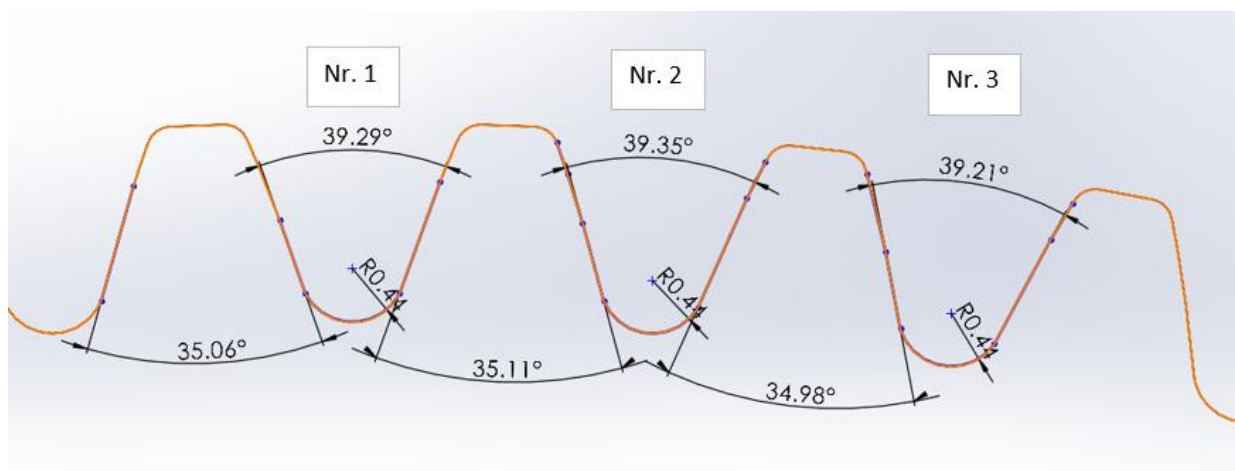
Atstumo tarp matavimo taškų skirtumas minimalus, pvz., nuo 0,5067 mm iki 0,5114 mm, kas rodo tikslesnį profilio atkūrimą. Taip pat CNC detalės paviršiaus linija tolygi, be didelių iškrypimų ar bangavimų, o tai rodo, kad CNC technologija gali išlaikyti vienodą ir tikslų paviršių.



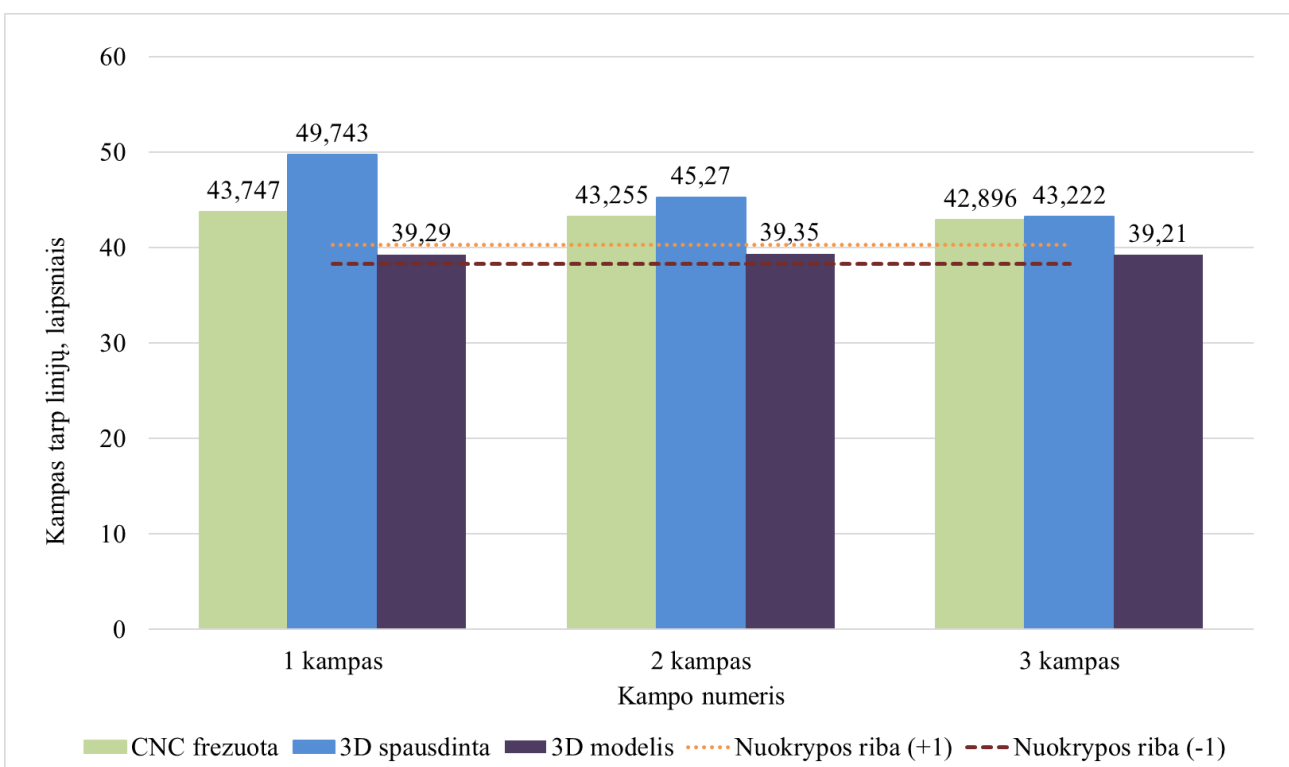
24 pav. CNC frezuotos (a) ir 3D spausdintos (b) detalių kontūrų matavimų rezultatai

3D spausdinta detalė, priešingai, pasižymi didesniais geometriniais nuokrypiais. Vidiniai matavimų kampai svyruoja nuo 41,389 iki 44,730 laipsnių, o tai rodo didelį tikslumo neatitikimą lyginant su CNC frezuota detalė. Atstumo tarp matavimo taškų skirtumai tai pat yra žymesni, pavyzdžiui nuo 0,4446 mm iki 0,4901 mm. Šis netolygumas atsiranda dėl sluoksniavimo proceso, kai kiekvienas sluoksnis nėra visiškai tiksliai išlygintas su ankstesniu sluoksniu. Be to, 3D spausdintos detalės paviršiuje pastebimi bangavimai ir nelygumai. Sluoksniavimo efektas lemia netolygius perėjimus tarp kontūro dalių, todėl paviršiaus kokybė yra žemesnė nei CNC frezuotos detalės.

Lyginant 3D modelyje esančius išorinių kampų matmenis (žr. 25 pav.) su išmatuotais detalių matmenimis (žr. 26 pav.), tiek CNC frezuotos, tiek 3D spausdintos detalių matmenys yra virš modelio matmenų. Pagal ISO 2768-1 kampo nuokrypa $\pm 1^\circ$, tačiau nei viena detalė nepatenka į leistinas nuokrypos ribas.



25 pav. Matmenys 3D modelyje



26 pav. Detalių išorinių kampų palyginimas su 3D modelio matmenimis

CNC frezuotos detalės kampų matmenys viršija nustatytą $\pm 1^\circ$ nuokrypą, tačiau pasižymi mažesne matmenų variacija, o 3D spausdintos detalės ne tik neatitinka nuokrypos reikalavimų, bet ir rodo, didelį matmenų išsibarstymą, rodantį proceso nestabilumą.

Abiejų gamybos metodų matavimo rezultatai rodo, kad reikia tobulinti procesus, siekiant gaminti detales reikiamu kampų tikslumu ir atitikimu nuokrypoms. Lyginant CNC frezuotos ir 3D spausdintos detalės kontūrografo matavimus, matoma, kad CNC frezavimas užtikrina geresnę geometrinę tikslumą ir paviršiaus kokybę. CNC technologijos dėka kampų nuokrypos ir matavimų atstumai vienodesni, o paviršius tolygesnis. 3D spausdinimas, nors ir tinkamas greitai gaminti prototipams, lemia didesnius matavimų skirtumus dėl sluoksniavimo proceso.

3.4.3. Mikroskopo tyrimai ir rezultatai

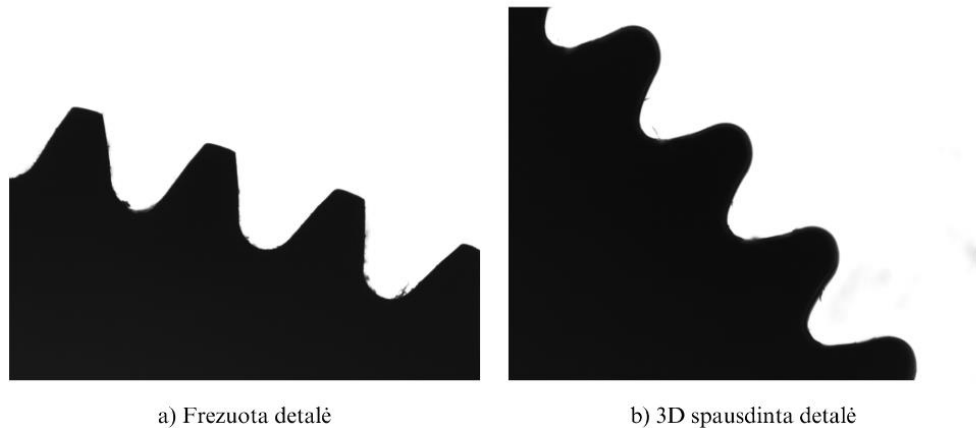
Pateiktame vaizde (žr. 28 pav.), gautame *Mitutoyo Quick Vision 202* mikroskopu (žr. 27 pav.), yra dviejų skirtingomis technologijomis pagamintų detalių profiliai – CNC frezuota detalė (a) ir 3D spausdinta detalė (b). CNC frezuotoje detalėje (a) matomi aiškūs, aštrūs kampai ir detalus paviršiaus profilis, be ryškių iškraipymų.



27 pav. Mitutoyo Quick Vision 202 mikroskopas

3D spausdinta detalė (b) pasižymi labiau suapvalintais kraštais ir pastebimais nelygumais, kurie susiję su sluoksniavimo procesu, būdingu AM. Dėl sluoksniavimo atsiranda tam tikri iškraipymai ir užapvalinimai, kurie lemia netolygų paviršių ir mažesnę tikslumą kraštuose.

CNC frezuotos detalės šoninis paviršius turi mažiau matomų nelygumų, kas gali būti susiję su didesniu pjovimo tikslumu. Frezuojant, įrankiai liečiasi su medžiaga, todėl paviršiaus kokybė tiesiogiai priklauso nuo pjovimo parametrų ir įrankių būklės. Dėl to CNC technologija leidžia pasiekti aukštą paviršiaus kokybę.



a) Frezuota detalė

b) 3D spausdinta detalė

28 pav. CNC frezuotos (a) ir 3D spausdintos (b) detalių vaizdas po mikroskopu

3D spausdinta detalė rodo sluoksniavimo efektą, kuris sukuria matomus netolygumus ir šiurkštesnį šoninį paviršių. Šis efektas būdingas FDM gamybos procesui. Galima teigti, kad CNC frezavimas yra tinkamas metodas, kai reikalingas tikslus geometrijos atkūrimas. CNC technologija ir pasirinktų įrankių suderinamumas leidžia išgauti sudėtingus kontūrus, kad užtikrinti funkcionalumą ir matmenų tikslumą.

3.4.4. Paviršiaus kietumo matavimų rezultatai

Šio tyrimo tikslas – nustatyti ir palyginti dviejų skirtingomis technologijomis pagamintų detalių kietumo reikšmes. Plastiko detalių paviršiaus kietumas matuojamas naudojant duometrą *Mitutoyo 811-019* (žr. 29 pav.), kuris skirtas nustatyti įvairių medžiagų paviršiaus atsparumą deformacijai. Šis duometras vertikalčiai įspaudžia smailų zondą į medžiagos paviršių ir registruoja atsparumo lygį pagal Šoro kietumo skalę, kuri apibrėžiama pagal EN ISO 868 standartą. Kieti plastikai matuojami Šoro D skalėje, o matavimo metu naudojamas 30° smailėjantis zondas, kurio galiukas suapvalintas 0,1 mm spinduliu [51].



29 pav. *Mitutoyo 811-019* paviršiaus kietumo matuoklis

Pagal EN ISO 868, Šoro D matavimuose taikoma jėga F apskaičiuojama pagal formulę:

$$F = 445H_D; \quad (8)$$

čia: F – taikoma jėga, mN,

H_D – durometro rodmenys.

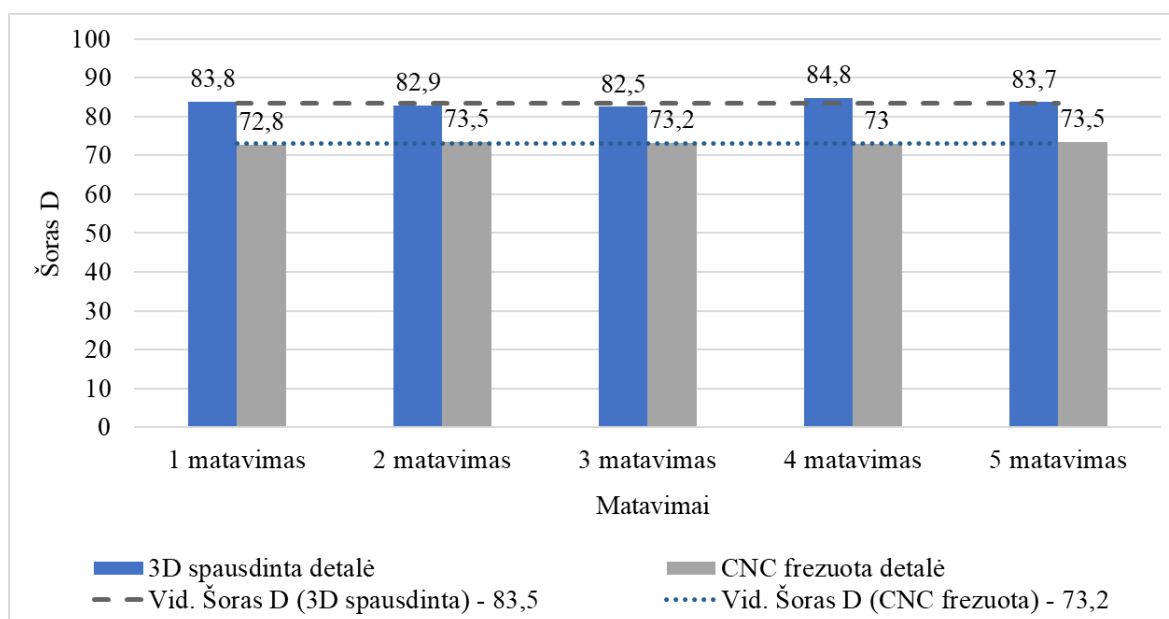
Nustatyti pagamintų detalių kietumui atlikti 5 matavimai toje pačioje detalės zonoje (žr. 15 lent.). 3D spausdinta detalė yra kietesnė ir nevienodesnė pagal Šoro D kietumo matavimus, tuo tarpu CNC frezuota detalė yra minkštesnė, bet tiksliau apdirbta, nes standartinis rezultatų nuokrypis yra tris kartus mažesnis nei 3D spausdintos detalės.

15 lentelė. Detalių kietumo matavimų rezultatai

| Kietumo reikšmė | 1 mat. | 2 mat. | 3 mat. | 4 mat. | 5 mat. | Vid. Šoras D | STD N | Vid. F |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|-------|--------|
| 3D spausdinta detalė | 83,8 | 82,9 | 82,5 | 84,8 | 83,7 | 83,5 | 0,9 | 37,18 |
| CNC frezuota detalė | 72,8 | 73,5 | 73,2 | 73 | 73,5 | 73,2 | 0,3 | 32,57 |

Vidutiniai plastiko detalių kietumo matavimų rezultatai Šoro D skalėje (žr. 30 pav.) rodo reikšmingus skirtumus tarp 3D spausdintos ir CNC frezuotos detalių.

- 3D spausdintos detalės vidutinė Šoro D kietumo reikšmė – 83,5;
- CNC frezuotos detalės vidutinė Šoro D kietumo reikšmė – 73,2.



30 pav. Plastikų kietumo matavimų palyginimas

Pagal gautas durometro reikšmes apskaičiuota vidutinė matavimo metu taikyta jėga F :

- 3D spausdintai detalei:

$$F = \frac{445H_D}{1000} = \frac{445 \times 83,5}{1000} = 37,16 \text{ N};$$

- CNC frezuotai detalei:

$$F = \frac{445H_D}{1000} = \frac{445 \times 73,2}{1000} = 32,57 \text{ N}.$$

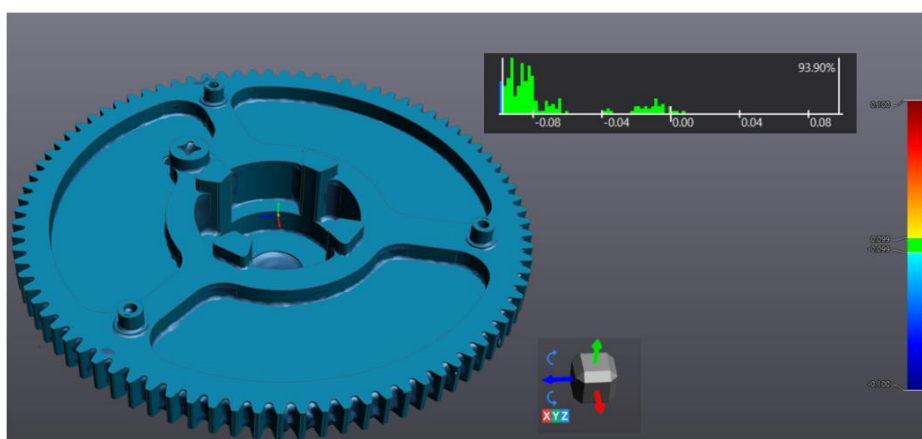
3D spausdintos detalės Šoro D reikšmė yra didesnė, todėl ji yra standesnė ir labiau atspari deformacijai veikiant spaudimui ar kontaktui. CNC frezuotos detalės mažesnė Šoro D reikšmė rodo minkštesnį paviršių, pasižymintį didesniu elastingumu.

83,5 Šoro D priskiriama prie kietesnių plastiko medžiagų, todėl 3D spausdinta detalė labiau tinka, kai reikalingas standesnis paviršius. 73,2 Šoro D reikšmė atitinka vidutinio kietumo medžiagas, būdingas daugeliui techninio plastiko gaminių.

3.4.5. 3D skenavimo rezultatai

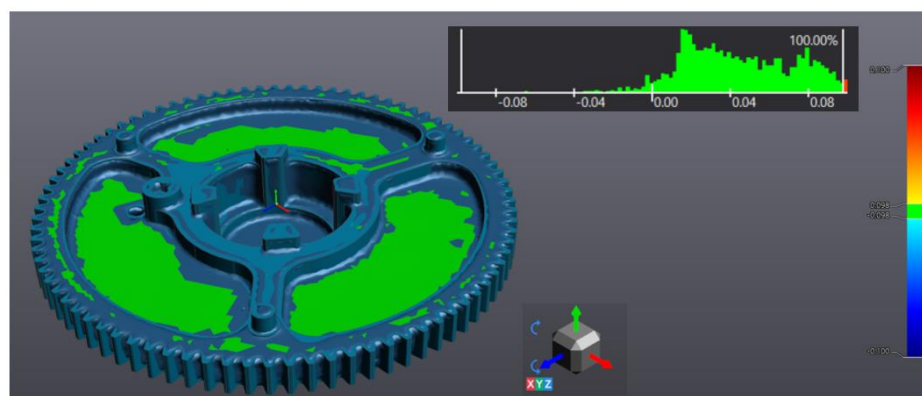
Detalių paviršiaus deviacijai matuoti naudojamas *Creaform MetraScan Black Elite* įrenginys. Matavimo prietaisui taikyta griežčiausia nuokrypa pagal ISO 2768-2 standartą, kuriame numatyta nuokrypų klasė H [52]. Pagal šią klasę tiesumo ir plokštumo nuokrypos nominalių ilgių diapazonams tarp 30–100 mm yra 0,1 mm. Kadangi iš anksto nebuvo aišku, į kurią pusę detalė gali turėti išlinkimą, 3D skenavimo metu abiejomis paviršiaus kryptimis buvo taikoma 0,1 mm nuokrypa.

Matavimų rezultatai parodė, kad frezuotos detalės paviršius 93,9 % atvejų atitinka 0,1 mm nuokrypos diapazoną lyginant su 3D modeliu (žr. 31 pav.). Frezuota detalė po apdirbimo buvo išlinkusi neigiamai Y kryptimi (žemyn).



31 pav. Frezuotos detalės atitikimas 3D modeliui

3D spausdinta detalė atitiko H klasės nuokrypas 100 % paviršiaus ploto ir taip pat buvo išlinkusi, tačiau teigiamai Y kryptimi (aukštyn) (žr. 32 pav.).



32 pav. 3D spausdintos detalės atitikimas 3D modeliui

Rezultatai rodo, kad frezuotos detalės deviacija didesnė nei 3D spausdintos detalės, nes tik 93,9 % paviršiaus atitiko 0,1 mm nuokrypą, todėl galima teigti, kad 3D spausdintos detalės atitikimas nuokrypoms yra aukštesnis nei frezuotos. Frezavimo metu detalės išlinkimas neigiama Y kryptimi gali būti dėl naudojamų įrankių veikimo šia kryptimi ir nuolatinio detalės spaudimo.

3.5. Skyriaus apibendrinimas

Šio tyrimo tikslas buvo įvertinti CNC frezavimo gamybos proceso efektyvumą ir prototipo detalių matmenų kokybę, lyginant tradicinį CNC gamybos metodą su AM technologija. Tyrime vertinti gamybos efektyvumas, medžiagų panaudojimas, gamybos trukmė ir pagamintų detalių kokybė, naudojant paviršiaus šiurkštumo, kietumo, geometrinių matmenų bei 3D skenavimo metodus.

CNC frezavimo efektyvumui vertinti apskaičiuotas OEE, siekė 82 %, o tai rodo aukštą proceso našumo ir kokybės lygį, tačiau neatitinka pasaulinės klasės standartų – 85 %. Vidutinis prieinamumo rodiklis 91 %, našumo efektyvumas – 92 %, o kokybės rodiklis – 97 %. Nepaisant aukštų kokybės rodiklių, broko atvejų skaičius per metus siekė 313 vnt. detalių ir prastovos dėl įrangos nustatymo, valymo ir gedimų sumažino bendrą efektyvumą. Vidutinis prastovų laikas siekė 19 319 min. per metus, daugiausia prastovų fiksuota liepos mėn. dėl mažiau kvalifikuotų operatorių darbo.

Medžiagų panaudojimo vertinimas parodė didelius skirtumus tarp CNC frezavimo ir 3D spausdinimo procesų. Gaminant detalę frezuojant sunaudota 240 g medžiagos, iš kurios 224 g tapo atliekomis, o 3D spausdinimo metu sunaudota 17 g medžiagos, atliekos sudarė 2 g. Nepaisant sunaudotų medžiagų skirtumo, galutinio produkto masė beveik identiška: CNC frezuota detalė svėrė 16 g, o 3D spausdinta detalė – 15g. Šie rezultatai rodo, kad 3D spausdinimas yra 14 kartų efektyvesnis medžiagų panaudojimo atžvilgiu.

Gamybos trukmės vertinimas parodė skirtingą procesų efektyvumą. CNC frezavimas yra greitesnis gamybos etape – vienos detalės apdorojimas trunka 38,75 min., tačiau pasiruošimas gamybai trunka – 230 min. (įskaitant paruošiamuosius darbus ir įrangos nustatymą). 3D spausdinimui reikia paprastesnio pasiruošimo ir mažiau priežiūros gamybos metu, tačiau gamybos procesas yra ilgesnis – 128 min.

Pagamintų detalių kokybės vertinimas, atliktas naudojant paviršiaus šiurkštumo matuoklį *Mitutoyo SJ-210*, parodė, kad CNC frezuota detalė turi lygesnį paviršių nei 3D spausdinta detalė – 0,379 μm ir 0,42 μm atitinkamai. Šiurkštumo matavimo rezultatai, rodo, kad abiejų detalių gautos *Ra* reikšmės patenka į geriausios kokybės paviršiaus šiurkštumo ribas. Toks šiurkštumas tinkamas detalėms, kurios patiria dideles apkrovas.

Geometrinio tikslumo vertinimas, atliktas naudojant kontūrografą *Mitutoyo CV 2100M4*, parodė, kad CNC frezuotos detalės kampai svyravo nuo 38,241 iki 40,222 laipsnių, o 3D spausdinta detalė turėjo didesnius kampų nuokrypius – nuo 41,389 iki 44,730 laipsnių. CNC procesas taip pat užtikrino tolygesnius atstumus tarp taškų. Šie skirtumai parodo CNC frezavimo pranašumą užtikrinant didesnę geometrinį tikslumą.

Paviršiaus kietumo matavimai, atlikti naudojant *Mitutoyo 811-019* durometrą, parodė, kad 3D spausdintos detalės Šoro D kietumo reikšmė buvo 83,5, o CNC frezuotos – 73,2. Tai rodo, kad 3D spausdintos detalės paviršius yra standesnis ir labiau atsparus deformacijai, o CNC frezuotos detalės paviršius turi didesnę elastingumą, lyginant su AM technologija pagaminta detale.

3D skenavimo rezultatai, gauti naudojant *Creaform MetraScan Black Elite*, rodo, kad abiejų detalių paviršiaus deviacija atitiko ISO 2768-2 H klasės nuokrypas, tačiau CNC frezuotos detalės paviršius 93,9 % atvejų patenka į 0,1 mm nuokrypos ribas lyginant su 3D modeliu. 3D spausdintos detalės paviršiaus deviacija 100 % atitinka 3D modelį.

Gauti rezultatai rodo, kad CNC frezavimo procesas kai kuriais atvejais užtikrina aukštesnę paviršiaus kokybę, didesnę geometrinį tikslumą ir greitesnį gamybos etapą, todėl jis yra tinkamas projektams, kuriuose svarbus didelis tikslumas. 3D spausdinimas gali pasiekti aukštus kokybės reikalavimus ir išsiskiria efektyvesniu medžiagų panaudojimu, paprastesniu pasiruošimu ir mažesniais priežiūros reikalavimais, todėl yra geras pasirinkimas greitai gaminamiems prototipams ar projektams, kuriuose svarbus medžiagų taupymas.

4. Ekonominės naudos vertinimas

4.1. Įmonės X biudžeto apribojimai

Įmonės pardavimo pajamos nuolat didėjo, ypač reikšmingai per 2023 metus, kai pajamos siekė 12 681 513 € (žr. 16 lent.), o pelningumas prieš mokesčius pasiekė 17,85 %, kas reiškia, kad įmonė turėjo sveiką pelno lygį, galintį užtikrinti papildomų investicijų finansavimą. 2020 ir 2023 m. rodo stiprius finansinius rezultatus, su dideliu pelningumu prieš mokesčius – 14,9 % ir 17,85 % atitinkamai, o grynasis pelnas 2023 m. siekė 1 986 317 €, kas leidžia daryti išvadą, kad įmonė šiuo metu yra finansiškai stipri.

16 lentelė. Įmonės X apyvarta

| Metai | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Pardavimo pajamos | 7 753 848 € | 6 561 833 € | 9 379 675 € | 12 681 513 € |
| Pelnas (nuostoliai) prieš mokesčius | 1 154 958 € | 81 462 € | 242 150 € | 2 264 174 € |
| Pelningumas prieš mokesčius | 14,90 % | 1,24 % | 2,58 % | 17,85 % |
| Grynasis pelnas (nuostoliai) | 1 026 644 € | 68 298 € | 242 150 € | 1 986 317 € |
| Grynasis pelningumas | 13,24 % | 1,04 % | 2,58 % | 15,66 % |
| Nuosavas kapitalas | 1 456 793 € | 1 525 090 € | 1 647 240 € | 3 513 557 € |
| Mokėtinos sumos ir įsipareigojimai | 2 183 355 € | 1 498 028 € | 1 929 264 € | 1 426 122 € |
| Ilgalaikis turtas | 1 466 305 € | 2 040 915 € | 2 375 416 € | 2 466 854 € |
| Trumpalaikis turtas | 2 406 125 € | 1 146 328 € | 1 524 968 € | 2 754 896 € |

2021 m., dėl pandemijos, pelningumas siekė vos 1,24 % ir grynasis pelnas buvo labai mažas – tik 68 298 €. Tai rodo, kad įmonė patyrė tam tikrus iššūkius, tačiau situacija stabilizavosi 2022 m. su nuosekliu augimu. Nuosavas kapitalas 2023 m. siekė 3 513 557 €, o mokėtinos sumos ir įsipareigojimai sumažėjo iki 1 426 122 €. Tai reiškia, kad įmonė turi mažesnius įsipareigojimus ir stipresnį kapitalą, kas suteikia daugiau finansinio lankstumo investuoti į gamybos technologijų atnaujinimą.

4.2. Įmonės X finansinių rodiklių vertinimas 2019-2023 metais

Šiame skyriuje pateikiama įmonės X finansinių rodiklių dinamika nuo 2019 iki 2023 m., įskaitant pardavimų augimą, pelno maržą, turto gražą (ROA), nuosavo kapitalo gražą (ROE) ir trumpalaikio likvidumo rodiklį.

2020 m. įmonė X pasiekė itin didelį pardavimų augimą – 133,66 % (žr. 17 lent.), tačiau 2021 m. užfiksuotas 15,37 % pardavimų sumažėjimas. Vėlesniais metais augimo tempas stabilizavosi – 2022 m. siekė 42,94 %, o 2023 m. – 32,2 %, rodydamas tvarią plėtros tendenciją.

Pelno marža nuo 2019 m. 7,08 % padidėjo iki 13,24 % 2020 m., tačiau 2021 m. sumažėjo iki 1,04 %. Vėlesniais metais sekė nuoseklus augimas iki 15,66 % 2023 m., rodantis įmonės atsigavimą. ROA reikšmingai didėjo 2020 m. – 26,51 %, tačiau 2021 m. smuko iki 2,14 %. Ši reikšmė pradėjo didėti 2022 m. ir 2023 m. pasiekė aukštą 38,04 % vertę. ROE dinamiką atspindi didėjimas 2020 m. – 70,47 %, po kurio sekė didelis nuosmukis 2021 m. – 4,48 %. Vėliau graža stabiliai didėjo ir 2023 m. siekė 56,53 %, rodydama didėjantį įmonės kapitalo efektyvumą.

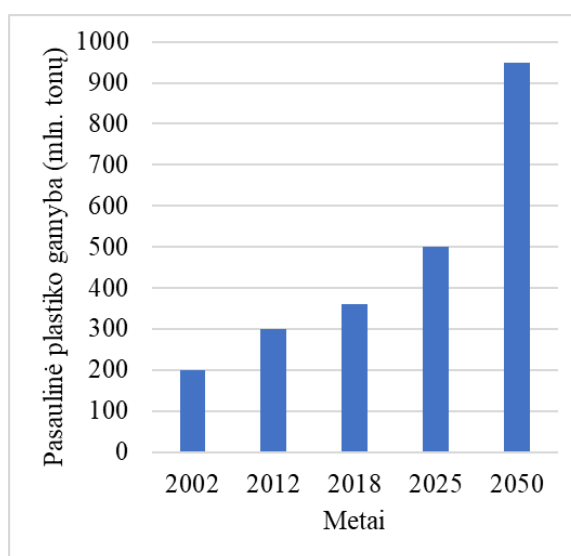
17 lentelė. Įmonės finansinių rodiklių dinamika

| Finansiniai rodikliai | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|---------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Pardavimų augimas, % | - | 133,66 | -15,37 | 42,94 | 35,20 |
| Pelno marža, % | 7,08 | 13,24 | 1,04 | 2,58 | 15,66 |
| ROA (Return on Assets), % | 9,91 | 26,51 | 2,14 | 6,21 | 38,04 |
| ROE (Return on Equity), % | 38,15 | 70,47 | 4,48 | 14,70 | 56,53 |
| Trumpalaikio likvidumo rodiklis | 0,69 | 1,10 | 0,77 | 0,79 | 1,93 |

Nors 2021 m. išsiskyrė nuosmukiais, beveik visuose rodikliuose, tačiau net ir esant pandemijai įmonė sugebėjo išlaikyti stabilumą ir atsigauti vėlesniais metais, rodydama gebėjimą prisitaikyti prie sudėtingų rinkos sąlygų, bei optimizuoti savo veiklą.

4.3. Plastiko atliekų kiekis ir tvarkymas

CNC frezavimas ir 3D spausdinimas, nors ir inovatyvūs, generuoja tam tikrą kiekį atliekų. 3D spausdinimo metu susidaro nedidelės plastiko atraižos, kurios gali būti perdirbtos. Apdirbant plastiką frezuojant sukuriama daug drožlių. Nors šios drožlės dažnai gali būti perdirbamos, joms tvarkyti reikia atitinkamų saugos priemonių. Mokslininkai F. Žangas ir kt. [13] apibendrina plastiko atliekų kiekį per daugybę metų ir nustatė, kad plastiko naudojimas kiekvienais metais didėja. Apie 60 % plastiko patenka į aplinką kaip atliekos. Nustatyta, kad nuo 1950 m. pasaulinė plastiko gamyba didėjo metiniu sudėtinu tempu, siekiančiu 8,4 % (žr. 33 pav.). 2018 m. metinė plastiko gamyba siekė 360 mln. tonų, o plastiko gamyba 2025 m. yra prognozuojama, jog pasieks 500 mln. tonų. Vieni ekspertai teigia, kad bendras plastiko atliekų kiekis iki 2050 m. gali siekti 1,1 mlrd. tonų [11], kiti svarsto, kad skaičius gali būti šiek tiek mažesnis, apie 850–950 mln. tonų, viršijant visų pasaulio vandenynų žuvų skaičių. Šią plastiko atliekų problemą dar labiau apsunkina faktas, kad tik iki 13 % viso plastiko yra perdirbama, iš kurių 12 % yra mechaniškai perdirbama ir tik 1 % – naudojant monomero perdirbimo procesą. Didelė dalis plastiko atliekų (40 %) patenka į sąvartynus, o dar 25 % yra sudeginama. Nors plastiko atliekų deginimas gali sugrąžinti dalį energijos kaip elektros, dabartinės deginimo technikos yra labai neefektyvios – atgaunama tik 14–28 % energijos [13]. Būtina ieškoti efektyvių plastiko atliekų tvarkymo ir perdirbimo sprendimų arba būdų, kurie sumažintų atliekų kiekį.



33 pav. Prognozuojamas plastiko gamybos augimas [13]

3D spausdinimas, ypač FDM metodas, turi daug privalumų tvarios gamybos srityje, tačiau svarbu subalansuoti šią naudą su galimais neigiamais padariniais ir užtikrinti tinkamą atliekų ir išmetamųjų teršalų valdymą technologijų plėtroje. Perdirbus 1 toną plastiko galima sutaupyti nuo 5744 iki 6837 kWh elektros energijos, taip padedant sumažinti CO₂ pėdsaką, susijusį su plastiko gamyba ir perdirbimu [11]. AM gali atlikti svarbų vaidmenį, tačiau technologijų plėtros metu būtina nuolat tobulinti plastiko atliekų perdirbimo technologijas ir skatinti žiedinės ekonomikos principų integravimą. Palyginti tradicinio apdirbimo ir AM aplinkosaugos poveikiai, atlikti gyvavimo ciklo vertinimu, parodė, kad pagrindinis skirtumas tarp AM ir CNC yra tas, jog pastaroji technologija pjovimo metu naudoja alyvas, kurios yra papildomas atliekų šaltinis [29].

4.3.1. Plastiko sunaudojimas įmonėje X

Nuo 2021 iki 2024 m. spalio mėn. įmonė X įsigijo 20205,98 kg plastiko prototipams gaminti (žr. 18 lent.). Palyginus bendrą plastikų suvartojimą, matomas aiškus didėjimas nuo 2021 m. 835,18 kg iki 2023 m. 8835,20 kg. Didžiausias šuolis pastebimas 2022 m., kai perkamo plastiko kiekis siekė 3392,14 kg, o 2023 m. suvartojimas pasiekė aukščiausią lygį. 2024 m. duomenys yra iki spalio mėn., tačiau pagal sunaudojamo plastiko kiekį panašu, kad tendencija išlieka kaip ir 2023 m.

18 lentelė. Įsigyto plastiko kiekis prototipams gaminti

| Eil.nr. | Žymėjimas | Kiekis, kg | | | |
|---------|-----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 2021 m. | 2022 m. | 2023 m. | 2024 m. |
| 1 | PA 6 G | 30,00 | 58,95 | 26,65 | 55,45 |
| 2 | PVC-U | 173,88 | 361,8 | 1852,5 | 4340,29 |
| 3 | PC | 300,1 | 2731,12 | 4230,96 | 1411,12 |
| 4 | ABS | 331,2 | - | 367,2 | - |
| 5 | PMMA | - | 37,52 | 607,72 | 307,63 |
| 6 | PEHD | - | 96,00 | - | - |
| 7 | PP | - | 5,95 | 1,51 | - |
| 8 | UHMWPE | - | 100,8 | - | - |
| 9 | UPM 203 | - | - | 548,66 | 565,14 |
| 10 | PA 6 Nylon | - | - | 9,6 | 17,2 |
| 11 | POM | - | - | 316,8 | 183,95 |
| 12 | HGW | - | - | 873,6 | - |
| 13 | UPGM | - | - | - | 262,68 |
| | Viso, kg | 835,18 | 3392,14 | 8835,20 | 7143,46 |

Perkamas PVC-U kiekis 2023 m. padidėjo ir pasiekė 1852,5 kg, o 2024 m. dar labiau padidėjo – iki 4340,29 kg. Taip pat pastebimas PC naudojimo sumažėjimas, nors 2023 m. padidėjo iki 4230,96 kg, 2024 m. sumažėjo iki 1411,12 kg. Keletas plastikų, tokių kaip ABS, PEHD ir PP, buvo naudojami labai retai arba nenaudojami tam tikrais metais.

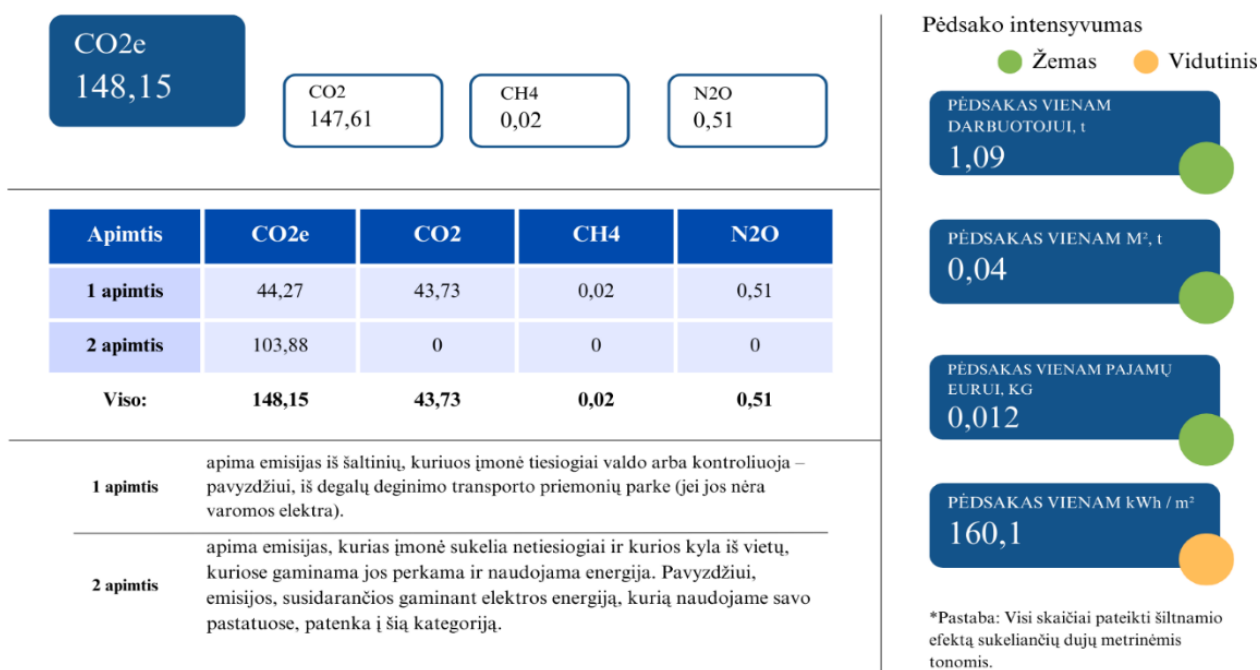
4.3.2. Tvarumas ir atliekų valdymas įmonėje

Gamybos sektorius, kuris yra vienas iš didžiausių anglies emisijos šaltinių, šiuo metu patiria ekonominį ir aplinkosaugos spaudimą, siekiant, kad gamybos įmonės įgyvendintų mažai anglies

dvideginio išskiriančias gamybos strategijas. Norint mažinti taršą ir žaliavų naudojimą, didinti energijos vartojimo efektyvumą bei perdirbti ar pakartotinai panaudoti atliekas, gamybos sistemoje turi būti įdiegti tam tikri aplinkosaugos tikslai. Nustatyta, kad pagalbinės operacijos sunaudoja daugiau nei 30 % energijos, tiekiamos į sistemą apdirbimo metu [53].

Įmonė X yra sertifikuota pagal ISO 14001 standartą, kuris įpareigoja įmonę ne tik sukurti ir įgyvendinti veiksmingą aplinkosaugos valdymo sistemą [54], bet ir nuolat gerinti aplinkosaugos rezultatus. Atsižvelgiant į šį standartą, įmonė taiko įvairias aplinkosaugos priemones, užtikrindama, kad veikla būtų efektyvi ir minimaliai neigiamai veiktų aplinką.

EcoVadis pateiktoje ataskaitoje (žr. 34 pav.) apie įmonę, bendroji CO₂ ekvivalentinė emisija (CO₂e) siekia 148,15 tonų, iš kurių CO₂ sudaro 147,61 t, CH₄ – 0,02 t, N₂O – 0,51 t. Be to, įmonėje atliekamas CO₂ pėdsako skaičiavimas įvairiais rodikliais: darbuotojo pėdsakas sudaro 1,09 t, pėdsakas per kvadratinį metrą siekia 0,04 t, o pėdsakas per pajamų eurą yra 0,012 kg CO₂e. Energijos efektyvumo vertinimas taip pat atliktas, nurodant, kad energijos pėdsakas siekia 160,01 t CO₂e per kWh/m².



34 pav. Įmonės X šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo apžvalga (2023 m.) pagal *EcoVadis* ataskaitą

Įmonėje rūšiuojamos perdirbimui tinkamos atliekos, antrinės žaliavos ir pavojingos atliekos. Pavojingos atliekos laikomos ir tvarkomos pagal griežtus saugos duomenų lapų ir teisės aktų reikalavimus. Tai apima saugų pavojingų atliekų saugojimą specialiose talpyklose, kurios turi būti sandarios, atsparios pavojingų medžiagų poveikiui ir tinkamai pažymėtos. Nepavojingos atliekos, pavyzdžiui, metalo atliekos, rūšiuojamos specialiuose konteneriuose metalo apdirbimo įmonės teritorijoje, o pavojingos atliekos išvežamos kas dvi savaites.

2023 m. įmonė sugeneravo 66,813 t atliekų, iš kurių 12,9 t buvo perdirbtos kaip metalo atliekos. Plastikinės pakuotės sudarė 0,26 t, o apdirbamųjų plastikų atliekos – 2,3 tonos. Kadangi įmonė per 2023 m. įsigijo apdirbamojo plastiko ~8,84 t, kurių vertė 35229,45 Eur (žr. 6 priedą), jo atliekos sudarė 26 % žaliavų kiekio, kas rodo, kad įmonė išleido 9170,22 Eur medžiagoms, kurios tapo atliekomis.

4.4. CNC frezavimo ir 3D spausdinimo pradinių išlaidų palyginimas

Įmonė X CNC frezavimo stakles, kuriomis gaminami prototipai įsigijo 2018 m., todėl skaičiuojant išlaidas šios įrangos kaina neįtraukiama, tačiau lyginimui (žr. 19 lent.) naudojamos pradinės investicijos įrankiams įsigyti, kurios siekia 885,26 Eur (žr. 7 priedą). 3D spausdinimo technologijos pradinės investicijos įrangai siektų 668 Eur perkant spausdintuvą su visais siūlomais priedais [43]. Taip pat lyginant šių technologijų energijos suvartojimo kaštus pastebima, kad CNC frezavimas sunaudoja daug daugiau energijos, kurios kaštai siekia 31,19 Eur, o 3D spausdinimas siekia vos 0,05 Eur. Be to, CNC frezavimo procesui reikia operatoriaus, kurio vidutinis darbo užmokestis prieš mokesčius siekia 16,44 Eur/h. 3D spausdinimui reikalingo darbuotojo užmokestis yra mažesnis – 12,5 Eur/h. Nors 3D spausdinimas yra lėtesnis, jis pasižymi mažesniais energijos ir darbo kaštais, todėl yra ekonomiškai naudingas prototipams gaminti.

19 lentelė. Pradinių išlaidų palyginimas

| Išlaidos | CNC frezavimas | 3D spausdinimas |
|---|-------------------|-------------------|
| Investicijos įrangai įsigyti, Eur | 0 | 668 |
| Pradinės investicijos įrankiams įsigyti, Eur | 885,26 | 0 |
| Reikalingas darbuotojų skaičius, vnt | 1 | 1 |
| Darbuotojų vidutinis atlyginimas, Eur/h prieš mokesčius | 16,44 | 12,5 |
| Gamybos laikas, h | 0,65 | 2,13 |
| Energijos suvartojimas, W | 68250 | 100 |
| Energijos kaina, Eur/kWh | 0,197 | 0,197 |
| Išlaidos energijai, Eur | 31,19 | 0,05 |
| Viso | 927,14 Eur | 694,68 Eur |

4.5. Skyriaus apibendrinimas

Atsižvelgiant į 2023 m. apyvartos rezultatus, įmonė neturėtų susidurti su biudžeto apribojimais, jei svarstyti CNC frezavimą keisti 3D spausdinimo technologija prototipams gaminti. Didėjantis pelnas rodo, kad įmonė turi pakankamai finansinių resursų investicijoms į naujas gamybos technologijas, kuriomis būtų siekiama padidinti gamybos efektyvumą ir sumažinti ilgalaikes sąnaudas, kurios gali kilti dėl per didelės CNC staklių apkrovos. CNC frezavimo staklės išlieka nepakeičiamos gaminant didesnio tikslumo gaminius.

Palyginus CNC frezavimo staklių ir AM poveikį aplinkosaugai, nustatyta, kad CNC technologija generuoja daugiau atliekų, kurioms tvarkyti reikia papildomų resursų. 2023 m. CNC procesai sukūrė 26 % plastiko atliekų nuo įsigytų žaliavų kiekio, kas sudarė 9170,22 Eur medžiagų kaštų, tapusių atliekomis. Šios išlaidos gali būti panaudotos kaip investicija į tokias technologijas kaip AM. Įmonė X galėtų naudotis savo finansiniu stabilumu ir išsipareigojimais aplinkosaugai, siekdama įgyvendinti 3D spausdinimo technologijų taikymą prototipams gaminti. Toks technologijų derinys padėtų sumažinti įmonės kaštus ir prisidėtų prie tvarumo tikslų įgyvendinimo.

Kadangi įmonė X siekia minimizuoti poveikį aplinkosaugai, AM technologijos gali sumažinti gamybos atliekas – plastiko atraižos dažnai perdirbamos, o energijos vartojimas yra gerokai efektyvesnis. Tai sutampa su įmonės žiedinės ekonominės tikslais.

Išvados

1. Įvertinus esamą technologiją prototipams gaminti nustatyta, kad CNC frezavimo technologijos našumas siekia 92 %, kokybės rodiklis – 97 %, o bendras vidutinis OEE – 82 %. Vertinant medžiagų panaudojimo efektyvumą nustatyta, kad per 1 metus 26 % nupirkto plastiko tampa atliekomis. Frezuojant pagaminto bandinio plastiko atliekos siekia 93,3 %, todėl 3D spausdinimas yra 14 kartų efektyvesnis medžiagos sunaudojimo atžvilgiu.
2. Įvertinus galimas AM technologijas, nuspręsta naudoti FDM pagamintas detales bandymams, dėl šios technologijos ekonomiško ir paprasto naudojimo. Sudaryta AM proceso seka apima: žaliavos užsakymą, projektavimą, technologinio proceso planavimą, AM programinės įrangos naudojimą, 3D spausdinimą, laikančių sluoksnių šalinimą ir galutinio produkto pateikimą.
3. Įvertinus tradiciniu ir adityviosios gamybos būdais pagamintų detalių matavimų rezultatus, nustatyta, kad CNC frezavimo gamybos trukmė yra 3,3 karto greitesnė, tačiau AM paruošiamieji darbai trunka 5,75 karto trumpiau. CNC frezuota detalė turi 1,1 karto lygesnį paviršių ir yra 1,09 karto tikslesnė pagal mažiausią geometrinį nuokrypį, tačiau 3D spausdinta detalė yra 1,14 karto kietesnė ir 1,07 karto geriau atitinka paviršiaus nuokrypius pagal 3D modelį.
4. Įvertinus ekonominę naudą ir kaštų mažinimo galimybes, jeigu CNC frezavimo technologija prototipams gaminti būtų pakeista FDM spausdinimo metodu, konkretaus prototipo gamybos kaštai sumažėtų nuo 927,14 Eur iki 694,68 Eur.

Literatūros sąrašas

1. ERINLE, T; OJAOMO, K ir ADEOYE, O. Fused Deposition Modelling (FDM) and Selective Laser Sintering (SLS) as Indisputable Machines in Additive Manufacturing: A Review. Interaktyvus. *Konferencija: International Conference on 3D Printing & Additive Manufacturing*, 2023, Dubajus. Prieiga per: <https://doi.org/10.31219/osf.io/pmjgr>. [žiūrėta 2024-09-07].
2. MOHLIN, A. How to facilitate manufacturing industry learning from problems: a review on advanced technology problem-solving. Interaktyvus. *Journal of Workplace Learning*, 2023, vol. 35, 6, pp. 470-489. ISSN 1366-5626. Prieiga per: <https://doi.org/10.1108/JWL-01-2023-0008>. [žiūrėta 2024-09-07].
3. RIVIERE, J. T; VINET, L ir PRIE, Y. Towards the use of virtual reality prototypes in architecture to collect user experiences: An assessment of the comparability of patient experiences in a virtual and a real ambulatory pathway. Interaktyvus. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2024, vol. 192, pp. 103342. ISSN 1071-5819. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103342>. [žiūrėta 2024-10-07]
4. NEGI, P; RAM, M ir YADAV, O. P. Basics of CNC Programming. Interaktyvus. *River Publishers*, Niujorkas, 2018. ISBN 978-1-00-333731-7. Prieiga per: <https://doi.org/10.1201/9781003337317>. [žiūrėta 2024-09-28].
5. JAROSZ, K; CHEN, Y. T ir LIU, R. Investigating the differences in human behavior between conventional machining and CNC machining for future workforce development: A case study. Interaktyvus. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 96, pp. 176-192. ISSN 1526-6125. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.04.037>. [žiūrėta 2024-09-12].
6. RIANMORA, S; SAMORHOM, N ir CHAIDILOK, W. Utilizing CNC Router Machine to Construct a Prototype Incorporation Principles of Solid-based Rapid Prototyping Process and Interlocking Brick Design. Interaktyvus. *Engineering Journal*, 2024, vol. 28, 8, pp. 13-31. ISSN 0125-8281. Prieiga per: <https://doi.org/10.4186/ej.2024.28.8.13>. [žiūrėta 2024-09-29].
7. NGO, T. D; KASHANI, A, IMBALZANO G, NGUYEN, K. T. Q ir HUI D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Interaktyvus. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 143, pp. 172-196. ISSN 1359-8368. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>. [žiūrėta 2024-10-07].
8. PEREIRA, T; KENNEDY, J. V ir POTGIETER, J. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. Interaktyvus. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 30, pp. 11-18. ISSN 2351-9789. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003>. [žiūrėta 2024-10-07].
9. SFETSAS, T; PATSATZIS, S ir CHIOTI, A. A review of 3D printing techniques for bio-carrier fabrication. Interaktyvus. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 318, pp. 128469. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128469>. [žiūrėta 2024-08-20].
10. RASIYA, G; SHUKLA, A ir SARAN, K. Additive Manufacturing-A Review. Interaktyvus. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 47, pp. 6896-6901. ISSN 2214-7853. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.181>. [žiūrėta 2024-10-08].
11. PATEL, K. S; SHAH, D. B, JOSHI, S. J ir PATEL, K. M. Developments in 3D printing of carbon fiber reinforced polymer containing recycled plastic waste: A review. Interaktyvus. *Cleaner Materials*, 2023, vol. 9, pp. 100207. ISSN 2772-3976. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100207>. [žiūrėta 2024-11-08].

12. HUANG, J; QIN, Q ir WANG, J. A Review of Stereolithography: Processes and Systems. Interaktyvus. *Processes*, 2020, vol. 8, pp. 11-38. ISSN 2227-9717. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/pr8091138>. [žiūrėta 2024-08-20].
13. ZHANG, F; ZHAO, Y, WANG, D, YAN, M, ZHANG, J ir kt. Current technologies for plastic waste treatment: A review. Interaktyvus. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 282, pp. 124523. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124523>. [žiūrėta 2024-11-08].
14. STRITESKY, O. *Basics of 3D printing with Josef Prusa*. Interaktyvus. Praha: Prusa Research a.s., 2019. Prieiga per: https://www.prusa3d.com/page/basics-of-3d-printing-with-josef-prusa_490/. [žiūrėta 2024-11-07].
15. CONNER, B. P; MANOGHARAN, G. P, MARTOF, A. N, RODOMSKY, L. M, RODOMSKY, C. M. ir kt. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. Interaktyvus. *Additive Manufacturing*, 2014, vol. 1-4, pp. 64-76. ISSN 2214-8604. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>. [žiūrėta 2024-11-09].
16. SANGEETHA, N; MONISH, P ir BRATHIKAN, V. M. Review on various materials used in Additive Manufacturing. Interaktyvus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2022, vol. 1228, pp. 012015. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1228/1/012015>. [žiūrėta 2024-09-05].
17. BANDYOPADHYAY, A; ZHANG, Y ir BOSE, S. Recent developments in metal additive manufacturing. Interaktyvus. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2020, vol. 28, pp. 96-104. ISSN 2211-3398. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.001>. [žiūrėta 2024-08-21].
18. JAISINGH SHEORAN, A ir KUMAR, H. Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. Interaktyvus. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 21, pp. 1659-1672. ISSN 2214-7853. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>. [žiūrėta 2024-08-20].
19. TAGLIAFERRI, V; TROVALUSCI, F, GUARINO, S ir VENETTACCI, S. Environmental and Economic Analysis of FDM, SLS and MJF Additive Manufacturing Technologies. Interaktyvus. *Materials*, 2019, vol. 12, 24, pp. 4161. ISSN 1996-1944. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma12244161>. [žiūrėta 2024-09-05].
20. ABDALLA, Y; FERIANC, M, AWAD, A, KIM, J, ELBADAWI, M ir kiti. Smart laser Sintering: Deep Learning-Powered powder bed fusion 3D printing in precision medicine. Interaktyvus. *International Journal of Pharmaceutics*, 2024, vol. 661, 15, pp. 124440. ISSN 0378-5173. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124440>. [žiūrėta 2024-09-05].
21. ISLAM, A; MOBARAK, H, RIMON, I. H, AL MAHMUD, Z, GHOSH, J ir kt. Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. Interaktyvus. *Polymer Testing*, 2024, vol. 132, pp. 108364. ISSN 0142-9418. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108364>. [žiūrėta 2024-11-20].
22. LABEAGA-MARTINEZ, N; SANJURJO-RIVO, M, DIAZ-ALVAREZ, J ir MARTINEZ-FRIAS, J. Additive manufacturing for a Moon village. Interaktyvus. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 794-801. ISSN 2351-9789. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.186>. [žiūrėta 2024-11-12].
23. PARWATI, N; NURDINA, R, PURWANDRI, A. T ir TANJUNG, W. N. Prototype Design of Plastic Waste Processing Equipment. Interaktyvus. *IOP Conference Series: Materials Science*

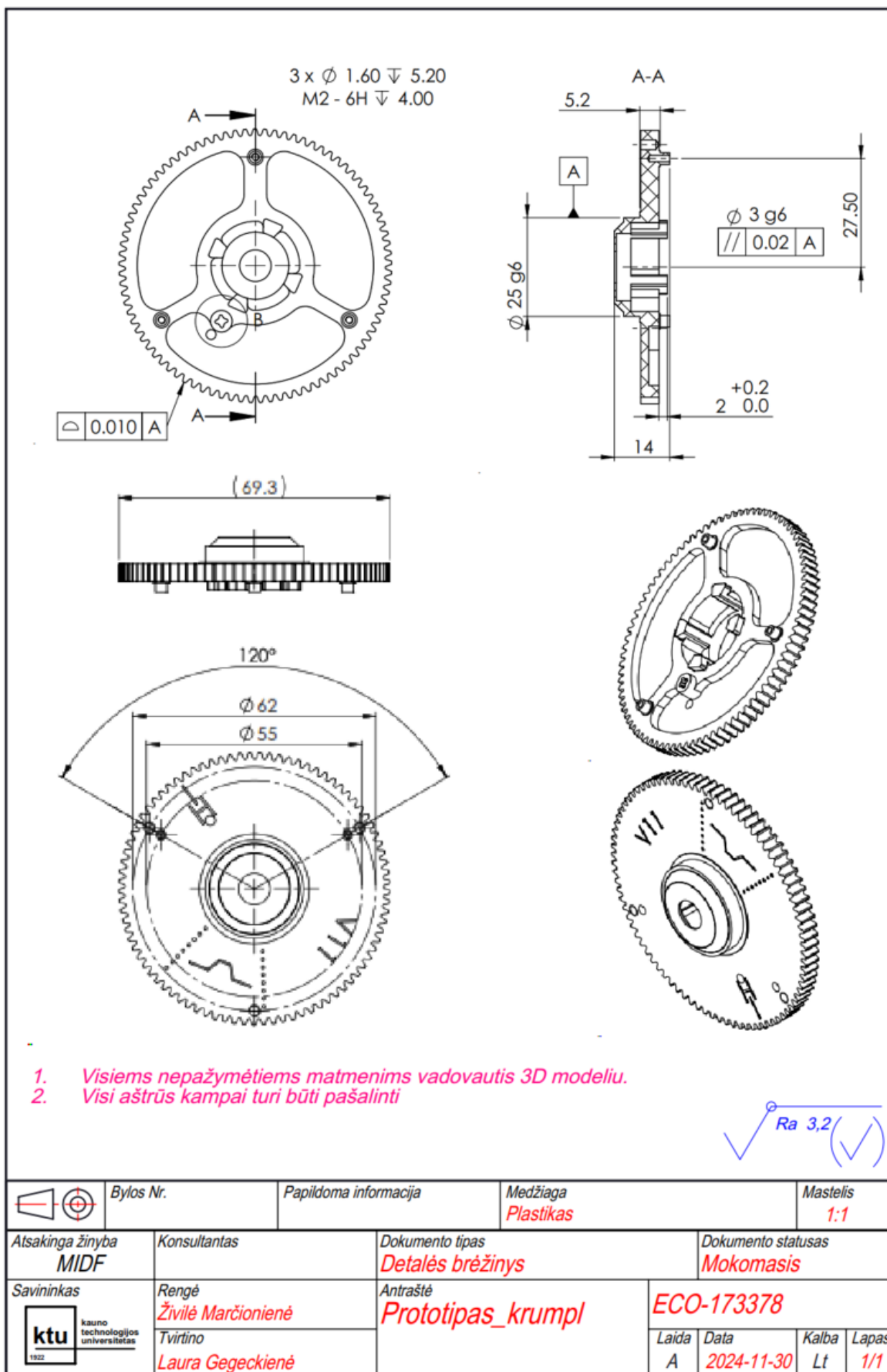
- and Engineering*, vol. 847, pp. 012014. ISSN 1757-899X. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012014>. [žiūrėta 2024-11-12].
24. PEREZ, M; GARCIA-COLLADO, A, CAROU, D, MEDINA-SANCHEZ, G, DORADO-VICENTE, R ir kiti. Chapter 11 - On surface quality of engineered parts manufactured by additive manufacturing and postfinishing by machining. Interaktyvus. *Elsevier*, 2021, pp. 369-394. ISBN 978-0-12-818411-0. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00015-X>. [žiūrėta 2024-09-29].
 25. AMANULLAH, A. N. M; MURSHIDUZZAMAN, SALEH, T, KHAN, R. Design and Development of a Hybrid Machine Combining Rapid Prototyping and CNC Milling Operation. Interaktyvus. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 187, pp. 163-170. ISSN 1877-7058. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.081>. [žiūrėta 2024-09-27].
 26. TEJADA MARTINEZ, L. V; WITZ, J. F, NAJJAR, D, BOIDIN, X, LESAFFRE, F ir kt. Hybrid FFF/CNC: An open source hardware & software system. Interaktyvus. *HardwareX*, 2024, vol 18, 536. ISSN 2468-0672. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00536>. [žiūrėta 2024-11-14].
 27. MERTKAN, I; TEZEL, T ir KOVAN, V. Improving surface and dimensional quality with an additive manufacturing-based hybrid technique. Interaktyvus. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 128, pp. 1-7. ISSN 1433-3015. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12055-z>. [žiūrėta 2024-11-11].
 28. VAFADAR, A; GUZZOMI, F, RASSAU, A ir HAYWARD, K. Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. Interaktyvus. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, pp. 1213. ISSN 2076-3417. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/app11031213>. [žiūrėta 2024-11-11].
 29. PERERA, J. C; GOPALAKRISHNAN, B, BISHT, P. S, CHAUDHARI, S ir SUNDARAMOORTHY, S. A Sustainability-Based Expert System for Additive Manufacturing and CNC Machining. Interaktyvus. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2023, vol 23, pp. 7770. ISSN 1424-8220. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s23187770>. [žiūrėta 2024-09-22].
 30. VENTOLA, C. L. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. Interaktyvus. *Pharmacy and Therapeutics*, 2014, vol. 39, pp. 704-711. ISSN 1052-1372. Prieiga per: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4189697/>. [žiūrėta 2024-10-25].
 31. 3DEO. *The Economics of CNC Milling Versus 3D Metal Printing*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.3deo.co/metal-3d-printing/the-economics-of-cnc-milling-versus-3d-metal-printing/>. [žiūrėta 2024-11-02].
 32. HASS CNC. *HASS VF-3SS*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/vf-series/models/medium/vf-3ss.html>. [žiūrėta 2024-10-25].
 33. CREAFORM. *MetraSCAN 3D Technical specifications*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.creaform3d.com/en/optical-3d-scanner-metrascan/technical-specifications>. [žiūrėta 2024-09-22].
 34. VISOMETRY. *Augmented Reality for Business Applications*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://visometry.com/products/>. [žiūrėta 2024-09-22].
 35. HERNADEWITA, H, HERMIYETTI, HENDRA, H, SYUKRIAH, ASTARI, R ir kt. Overall Equipment Effectiveness Analyse for Performance of CNC Milling Machine Operation. Interaktyvus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vo. 505, pp.

012052. ISSN 1757-899X. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/505/1/012052>. [žiūrėta 2024-10-15].
36. MENDONCA, A. P.; DA PIEDADE FRANCISCO, R ir DE SOUZA RABELO, D. OEE approach applied to additive manufacturing systems in distributed manufacturing networks. Interaktyvus. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, vol. 171, pp. 108359. ISSN 0360-8352. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108359>. [žiūrėta 2024-11-14].
37. PANESAR, S. S ir BRITZ, G. W. Endovascular Robotics: The Future of Cerebrovascular Surgery. Interaktyvus. *World Neurosurgery*, 2019, vol. 129, pp. 327-329. ISSN 1878-8750. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.06.126>. [žiūrėta 2024-11-15].
38. MARKET RESEARCH FUTURE. *Medical Robotics Market Size, Growth Analysis, Trends 2032*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/medical-robotics-market-1311>. [žiūrėta 2024-11-16].
39. IGUS. *Best 3D printing polymers for motion on the test rig*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.igus.eu/3d-printing/material/test-laboratory>. [žiūrėta 2024-11-02].
40. ALL3DP. *3D Printer Material Cost of 2023*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://all3dp.com/2/3d-printer-material-cost-the-real-cost-of-3d-printing-materials/>. [žiūrėta 2024-09-26].
41. FORMLABS. *Buy 3D Printing Materials*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://formlabs.com/eu/store/materials/>. [žiūrėta: 2024-09-26].
42. 3DERS. *Price compare 3D printers*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.3ders.org/pricecompare/3dprinters/>. [žiūrėta 2024-09-26].
43. PRUSA3D BY JOSEF PRUSA. *Original Prusa MINI+ Semi-assembled 3D Printer. Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-mini-semi-assembled-3d-printer-4/>. [žiūrėta 2024-11-07].
44. ROCHLING. *Sustarin H natural*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.roechling.com/industrial/materials/thermoplastics/engineering-plastics/pom-h/sustarin-h-natural-591058>. [žiūrėta 2024-10-26].
45. PRUSA3D BY JOSEF PRUSA. *Prusament PLA Prusa Orange*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pla-prusa-orange-1kg/>. [žiūrėta 2024-11-10].
46. MANGLA, S. K; KAZANCOGLU, Y, SEZER, M. D, TOP, N ir SAHIN, I. Optimizing fused deposition modelling parameters based on the design for additive manufacturing to enhance product sustainability. Interaktyvus. *Computers in Industry*, 2023, vol. 145, pp. 103833. ISSN 0166-3615. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103833>. [žiūrėta 2024-10-29].
47. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN ISO 4288, *Geometrinis gaminio aprašas (GPS). Paviršiaus reljefas. Profilio metodas. Paviršiaus reljefo įvertinimo taisyklės ir procedūros (ISO 4288:1996) = Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for assessment of surface texture: Europos standartas EN ISO 4288:1996, turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2001.
48. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN ISO 3274, *Geometrinis gaminio aprašas (GPS). Paviršiaus reljefas. Profilio metodas. Vardinės kontaktinių matavimo įrankių charakteristikos (ISO 3274:1996) = Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments (ISO*

- 3274:1996): *Europos standartas EN ISO 3274:1996 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2001.
49. XOMETRY PRO. *Selecting Right Surface Roughness for CNC Machining*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://xometry.pro/en/articles/cnc-machining-surface-roughness/>. [žiūrėta 2024-11-15].
50. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 2768-1, *Bendrosios leistinosios nuokrypos. 1 dalis. Linijinių ir kampinių matmenų leistinosios nuokrypos, nenurodant atskirų leistinųjų nuokrypų žymėjimo (ISO 2768-1:1989) = General tolerances - Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications (ISO 2768-1:1989): Europos standartas EN 22768-1:1993 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2001.
51. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN ISO 868:2004, *Plastikai ir ebonitas. Atsparumo įspaudimui nustatymas kietmačiu (Šoro kietumas) (ISO 868:2003) = Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness) (ISO 868:2003): Europos standartas EN ISO 868:2003 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
52. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 22768-2:2001, *Bendrosios leistinosios nuokrypos. 2 dalis. Paviršiaus formos leistinosios nuokrypos, nenurodant atskirų leistinųjų nuokrypų žymėjimo (ISO 2768-2:1989) = General tolerances; Part 2: Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications (ISO 2768-2:1989): Europos standartas EN 22768-2:1993 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2001.
53. SOORI, M; GHALEH, J, FOOAD, K, DASTRES, R ir AREZOO, B. Sustainable CNC machining operations, a review. Interaktyvus. *Sustainable Operations and Computers*, 2024, vol. 5, pp. 73-87. ISSN 2666-4127. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2024.01.001>. [žiūrėta 2024-09-13].
54. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN ISO 14002-1:2020, *Aplinkos apsaugos vadybos sistemos. ISO 14001 taikymo aplinkos apsaugos aspektams ir sąlygoms tam tikroje aplinkos apsaugos srityje gairės. 1 dalis. Bendrieji dalykai (ISO 14002-1:2019) = Environmental management systems - Guidelines for using ISO 14001 to address environmental aspects and conditions within an environmental topic area - Part 1: General (ISO 14002-1:2019): Europos standartas EN ISO 14002-1:2020 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020.
55. HOFFMANN GROUP (METMATUS). *Hoffmann Group - high quality tools worldwide available, milling, moulding, cutting, measuring, grinding, handtools, workshopequipment, knowhow, service*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.hoffmann-group.com/LT/lt/metmatus/>. [žiūrėta 2024-11-15].

Priedai

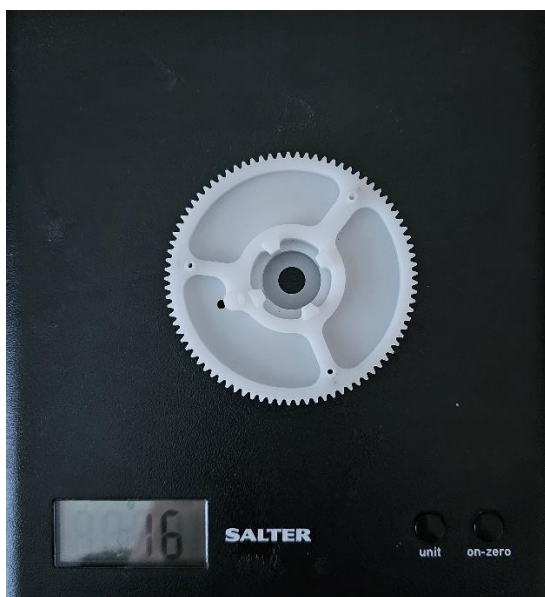
1 priedas. Detalės brėžinys



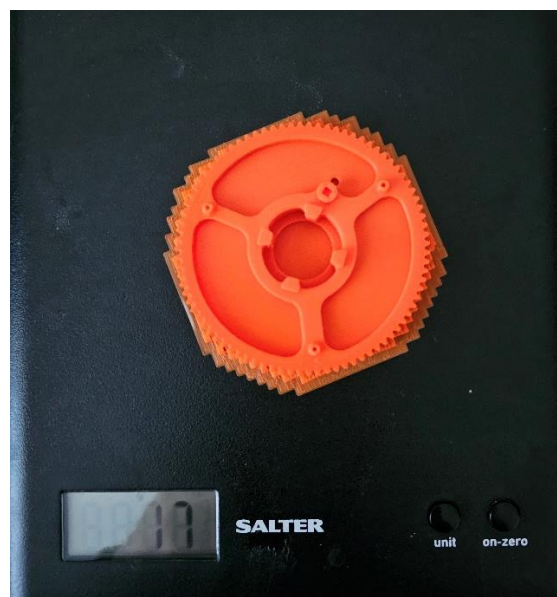
2 priedas. CNC frezavimo programos CAMWorks nuotraukos

| | |
|---|--|
| <p>CAMWorks NC Manager</p> <ul style="list-style-type: none"> Configurations Machine [HAAS VF3SSYT] Stock Manager[POLYURETHANE] Coordinate System [User Defined] Mill Part Setup1 [Group1] <ul style="list-style-type: none"> Rough Mill1[T26 - 12 Flat End] Rough Mill2[T26 - 12 Flat End] Contour Mill1[T26 - 12 Flat End] Contour Mill2[T26 - 12 Flat End] Contour Mill3[T26 - 12 Flat End] Face Mill1[T26 - 12 Flat End] Center Drill1[T20 - 3mm x 90 Deg Countersink] Center Drill2[T20 - 3mm x 90 Deg Countersink] Center Drill3[T20 - 3mm x 90 Deg Countersink] Center Drill4[T20 - 3mm x 90 Deg Countersink] Drill1[T21 - 8x140° Drill] Drill2[T22 - 2.5x118° Drill] Drill3[T22 - 2.5x118° Drill] Drill4[T22 - 2.5x118° Drill] Tap1[T23 - 3.0x0.5MC Tap-Cutting] Drill7[T22 - 2.5x118° Drill] Drill5[T24 - 1.6x130° Drill] Contour Mill4[T28 - 16.5 Keyway] Contour Mill5[T18 - 2 Flat End] Contour Mill6[T19 - 10 X 90 Countersink] Contour Mill7[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill8[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill9[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill10[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill11[T13 - 0.6x0.05 Hog Nose] Contour Mill12[T13 - 0.6x0.05 Hog Nose] Contour Mill13[T09 - 0.8x0.1 Hog Nose] Contour Mill14[T09 - 0.8x0.1 Hog Nose] Mill Part Setup2 [Group2] <ul style="list-style-type: none"> Face Mill2[T17 - 50 Face Mill] Rough Mill4[T16 - 8 Flat End] Face Mill3[T16 - 8 Flat End] Face Mill4[T16 - 8 Flat End] | <ul style="list-style-type: none"> Rough Mill4[T16 - 8 Flat End] Face Mill3[T16 - 8 Flat End] Face Mill4[T16 - 8 Flat End] Face Mill5[T16 - 8 Flat End] Face Mill6[T16 - 8 Flat End] Face Mill7[T16 - 8 Flat End] Face Mill8[T16 - 8 Flat End] Face Mill9[T16 - 8 Flat End] Rough Mill5[T16 - 8 Flat End] Contour Mill15[T16 - 8 Flat End] Contour Mill16[T16 - 8 Flat End] Contour Mill18[T16 - 8 Flat End] Rough Mill6[T01 - 3 Flat End] Contour Mill23[T01 - 3 Flat End] Contour Mill19[T01 - 3 Flat End] Contour Mill20[T01 - 3 Flat End] Contour Mill21[T01 - 3 Flat End] Contour Mill22[T01 - 3 Flat End] Contour Mill24[T01 - 3 Flat End] Contour Mill25[T01 - 3 Flat End] Contour Mill26[T06 - 1 Flat End] Contour Mill27[T06 - 1 Flat End] Rough Mill7[T06 - 1 Flat End] Contour Mill29[T13 - 0.6x0.05 Hog Nose] Center Drill5[T20 - 3mm x 90 Deg Countersink] Drill6[T24 - 1.6x130° Drill] Tap2[T05 - 2.0x0.4MC Tap-Cutting] Contour Mill30[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill31[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill38[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill32[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill33[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill34[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill35[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill36[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Contour Mill37[T14 - 3mm x 90Deg Countersink] Mill Part Setup4 [Group4] <ul style="list-style-type: none"> Contour Mill39[T09 - 0.8x0.1 Hog Nose] Recycle Bin |
| <p>1 dalis</p> | <p>2 dalis</p> |

3 priedas. Bandinių masė (g)



a) frezuota detalė



b) 3D spausdinta detalė (prieš pašalinant atraminę medžiagą)

4 priedas. Frezuotos detalės šiurkštumo matavimo nuotraukos



a) Išmatuota R_a reikšmė



b) Išmatuota R_z reikšmė



c) Išmatuota R_{z1max} reikšmė



d) Šiurkštumo profilis

5 priedas. 3D spausdintos detalės šurkštumo matavimo nuotraukos



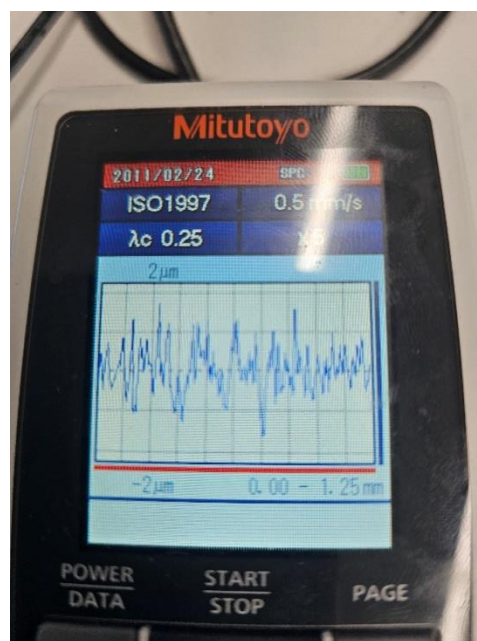
a) Išmatuota R_a reikšmė



b) Išmatuota R_z reikšmė



c) Išmatuota R_{z1max} reikšmė



d) Šurkštumo profilis

6 priedas. Īmonēs X išlaidos medžiagoms (2021-2024 m.)

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svori s 1m, kg | Viso, kg | Savikaino s suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokuments |
|-------|------------|---|------------|--------|--------------|----------------------|-------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| 62710 | ABS | ABS Hard Plastic (High impact resistance) 6mm | 2021.11.22 | 40 | vnt. | 7,2 | 288,00 | 1760,00 | 369,60 | 2129,60 | HLV0313646 |
| 62710 | ABS | ABS Hard Plastic (High impact resistance) 6mm | 2021.08.25 | 6 | vnt. | 7,2 | 43,20 | 615,00 | 129,15 | 744,15 | PLA717149 |
| 62883 | PA 6 G | PA-6G poliamido lakštas 25mm | 2021.09.03 | 1 | m2 | 30 | 30,00 | 131,00 | 27,51 | 158,51 | PLA717415 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2021.10.01 | 25,01 | m2 | 9,6 | 240,10 | 1056,42 | 221,85 | 1278,27 | PLA719167 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2021.10.27 | 6,25 | m2 | 9,6 | 60,00 | 317,66 | 66,71 | 384,37 | INV0021304 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.01.05 | 130 | m. | 0,42 | 54,60 | 230,10 | 48,32 | 278,42 | GLF210027 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.01.26 | 60 | m. | 0,42 | 25,20 | 114,00 | 23,94 | 137,94 | GLF 210271 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.04.09 | 50 | m. | 0,42 | 21,00 | 90,00 | 18,90 | 108,90 | GLF211039 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.04.30 | 40 | m. | 0,42 | 16,80 | 77,60 | 16,30 | 93,90 | GLF211348 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.05.28 | 30 | m. | 0,42 | 12,60 | 58,20 | 12,22 | 70,42 | GLF211769 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.07.23 | 9 | m. | 0,42 | 3,78 | 87,30 | 18,33 | 105,63 | GLF212567 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.09.01 | 5 | m. | 0,42 | 2,10 | 9,70 | 2,04 | 11,74 | GLF213233 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.10.08 | 40 | m. | 0,42 | 16,80 | 77,60 | 16,30 | 93,90 | GLF213782 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svoris 1m, kg | Viso, kg | Savikainos suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|--|------------|--------|-----------|---------------|----------|----------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2021.12.20 | 50 | m. | 0,42 | 21,00 | 103,00 | 21,63 | 124,63 | GLF214653 |
| 62883 | PA 6 G | PA-6G poliamido lakštas 25mm | 2022.02.23 | 0,55 | m2 | 30 | 16,50 | 160,00 | 33,60 | 193,60 | PLA725691 |
| 62883 | PA 6 G | PA-6G poliamido lakštas 25mm | 2022.07.01 | 0,55 | m2 | 30 | 16,50 | 205,00 | 43,05 | 248,05 | PLA733262 |
| 68056 | PA 6 G | PA6-G poliamido strypas D16 | 2022.10.04 | 2 | m. | 0,24 | 0,48 | 19,20 | 4,03 | 23,23 | PLA738724 |
| 68191 | PA 6 G | PA-6G poliamido ruošinys 25mm storio 530x550mm | 2022.10.17 | 1 | pcs. | 8,49 | 8,49 | 184,00 | 38,64 | 222,64 | PLA739447 |
| 68191 | PA 6 G | PA-6G poliamido ruošinys 25mm storio 530x550mm | 2022.12.21 | 2 | pcs. | 8,49 | 16,98 | 364,00 | 76,44 | 440,44 | PLA742562 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.05.24 | 68,783 | m2 | 9,6 | 660,32 | 4192,32 | 880,39 | 5072,71 | HLV0331540 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.12.22 | 25,012 | m2 | 9,6 | 240,12 | 1524,48 | 320,14 | 1844,62 | HLV0348624 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.05.12 | 62,52 | m2 | 9,6 | 600,19 | 3751,50 | 787,82 | 4539,32 | PLA726446 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.05.12 | 31,26 | m2 | 9,6 | 300,10 | 1590,64 | 334,03 | 1924,67 | PLA728956 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.06.22 | 12,505 | m2 | 9,6 | 120,05 | 636,25 | 133,61 | 769,86 | PLA732726 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.10.16 | 37,515 | m2 | 9,6 | 360,14 | 1908,92 | 400,87 | 2309,79 | PLA739410 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.11.23 | 31,26 | m2 | 9,6 | 300,10 | 1750,56 | 367,62 | 2118,18 | INV0030490 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2022.12.15 | 12,51 | m2 | 9,6 | 120,10 | 700,56 | 147,12 | 847,68 | INV0030712 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svoris 1m, kg | Viso, kg | Savikaino suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|---|------------|--------|--------------|---------------------|-------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|
| 66595 | PC | Exolon FR 099 clear 2x2050x3050 mm | 2022.06.02 | 1 | vnt. | 15,01 | 15,01 | 142,37 | 29,90 | 172,27 | HLV0332600 |
| 66595 | PC | Exolon FR 099 clear 2x2050x3050 mm | 2022.08.11 | 1 | vnt. | 15,01 | 15,01 | 130,00 | 27,30 | 157,30 | HLV0339032 |
| 66421 | PEHD500 | PEHD500 - Rochling Polystone D, 20mm, lakštas | 2022.05.04 | 2 | vnt. | 48 | 96,00 | 353,80 | 74,30 | 428,10 | PLA729606 |
| 66544 | PMMA | PMMA organinis stiklas 5mm 2050x3050mm lakštas | 2022.05.18 | 1 | vnt. | 37,52 | 37,52 | 200,89 | 42,19 | 243,08 | PLA730567 |
| 67559 | PP-C | PP-C polipropilenas, spalva šv. pilka RAL 7032, 4mm | 2022.09.02 | 1 | m2 | 4,8 | 4,80 | 92,00 | 19,32 | 111,32 | PLA737080 |
| 67604 | PP-H | Polipropileno PP-H strypas D35, spalva RAL 7032 | 2022.09.09 | 1 | m. | 1,15 | 1,15 | 7,90 | 1,66 | 9,56 | PLA737491 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.01.06 | 75 | m. | 0,42 | 31,50 | 154,50 | 32,45 | 186,95 | GLF214767 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.01.31 | 210 | m. | 0,42 | 88,20 | 462,00 | 97,02 | 559,02 | GLF220262 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.03.21 | 110 | m. | 0,42 | 46,20 | 242,00 | 50,82 | 292,82 | GLF220731 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.03.24 | 50 | m. | 0,42 | 21,00 | 110,00 | 23,10 | 133,10 | GLF220876 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.05.24 | 85 | m. | 0,42 | 35,70 | 219,30 | 46,05 | 265,35 | GLF221722 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.06.27 | 40 | m. | 0,42 | 16,80 | 103,20 | 21,67 | 124,87 | GLF222119 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.09.07 | 80 | m. | 0,42 | 33,60 | 234,40 | 49,22 | 283,62 | GLF 222948 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2022.12.15 | 200 | m. | 0,42 | 84,00 | 544,00 | 114,24 | 658,24 | GLF224028 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svoris 1m, kg | Viso, kg | Savikaino suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|---|------------|--------|--------------|---------------------|-------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|
| 68676 | PVC | PVC baltas lakštas 2mm | 2022.12.21 | 2 | m2 | 2,4 | 4,80 | 44,00 | 9,24 | 53,24 | PLA742562 |
| 66420 | UHMWPE | UHMWPE - Rochling Polystone M, 3mm | 2022.05.13 | 10 | m2 | 3,6 | 36,00 | 640,00 | 134,40 | 774,40 | PLA730296 |
| 66420 | UHMWPE | UHMWPE - Rochling Polystone M, 3mm | 2022.05.18 | 15 | m2 | 3,6 | 54,00 | 960,00 | 201,60 | 1161,60 | PLA730566 |
| 66420 | UHMWPE | UHMWPE - Rochling Polystone M, 3mm | 2022.09.02 | 1 | m2 | 3,6 | 3,60 | 65,00 | 13,65 | 78,65 | PLA737080 |
| 66420 | UHMWPE | UHMWPE - Rochling Polystone M, 3mm | 2022.12.21 | 2 | m2 | 3,6 | 7,20 | 64,50 | 13,55 | 78,05 | PLA742562 |
| 62710 | ABS | ABS Hard Plastic (High impact resistance) 6mm | 2023.02.22 | 51 | vnt. | 7,2 | 367,20 | 4196,28 | 881,22 | 5077,50 | HLV0356801 |
| 70437 | HGW | HGW 2372.4 G11, stiklo tekstolitas 5x1020x2040 mm | 2023.04.24 | 4 | pcs. | 12,48 | 49,92 | 965,20 | 202,69 | 1167,89 | HLV0362710 |
| 70437 | HGW | HGW 2372.4 G11, stiklo tekstolitas 5x1020x2040 mm | 2023.05.15 | 66 | pcs. | 12,48 | 823,68 | 14124,00 | 2966,04 | 17090,04 | HLV0364668 |
| 45240 | PA 6 G | PA6-G dia-16mm | 2023.12.15 | 9 | m. | 0,24 | 2,16 | 21,60 | 4,54 | 26,14 | PLA762173 |
| 68056 | PA 6 G | PA6-G poliamido strypas D16 | 2023.05.24 | 6 | m. | 0,24 | 1,44 | 18,00 | 3,78 | 21,78 | PLA750297 |
| 69280 | PA 6 G | PA-6G poliamido ruošinys 25mm storio | 2023.01.11 | 0,735 | m2 | 30 | 22,05 | 271,25 | 56,96 | 328,21 | HLV0353137 |
| 69336 | PA 6 Nylon | PA6 NYLON BLACK, Lakštas 2 mm | 2023.01.27 | 2 | m2 | 4,8 | 9,60 | 72,00 | 15,12 | 87,12 | PLA744080 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.04.24 | 37,515 | m2 | 9,6 | 360,14 | 1908,76 | 400,84 | 2309,60 | PLA748440 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.07.13 | 62,525 | m2 | 9,6 | 600,24 | 3181,27 | 668,07 | 3849,34 | PLA753317 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svoris 1m, kg | Viso, kg | Savikaino suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|---|------------|---------|--------------|---------------------|-------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.09.11 | 18,75 | m2 | 9,6 | 180,00 | 954,00 | 200,34 | 1154,34 | PLA756774 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.10.11 | 68,7775 | m2 | 9,6 | 660,26 | 3301,32 | 693,28 | 3994,60 | PLA758666 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.12.01 | 31,2625 | m2 | 9,6 | 300,12 | 1500,60 | 315,13 | 1815,73 | PLA761463 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.11.28 | 25,01 | m2 | 9,6 | 240,10 | 1200,48 | 252,10 | 1452,58 | PLA761249 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.12.15 | 43,7675 | m2 | 9,6 | 420,17 | 2100,84 | 441,18 | 2542,02 | PLA762142 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.01.17 | 31,26 | m2 | 9,6 | 300,10 | 1750,56 | 367,62 | 2118,18 | INV0031139 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.02.15 | 50,02 | m2 | 9,6 | 480,19 | 2801,12 | 588,24 | 3389,36 | INV0031603 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2023.04.04 | 62,525 | m2 | 9,6 | 600,24 | 3076,23 | 646,01 | 3722,24 | LA23002404 |
| 70746 | PC | Polycarbonate (PC), lakštas 5mm | 2023.05.30 | 6,25 | m2 | 6 | 37,50 | 200,08 | 42,02 | 242,10 | INV0034029 |
| 71218 | PC | Polycarbonate (PC), lakštas 2mm, su UV apsauga ir apsauginėmis plēvelēmīs iš abiejū pusiū | 2023.07.14 | 6,25 | m2 | 2,4 | 15,00 | 87,16 | 18,30 | 105,46 | PLA753378 |
| 72103 | PC | Makrolon FR 099 clear 2x1250x2050 mm | 2023.11.03 | 15,375 | m2 | 2,4 | 36,90 | 330,00 | 69,30 | 399,30 | INV0037296 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.03.30 | 6,25 | m2 | 3,6 | 22,50 | 96,47 | 20,26 | 116,73 | PLA747197 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.03.31 | 6,25 | m2 | 3,6 | 22,50 | 96,48 | 20,26 | 116,74 | PLA747221 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svoris 1m, kg | Viso, kg | Savikainos suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|--|------------|---------|-----------|---------------|----------|----------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.05.15 | 50,02 | m2 | 3,6 | 180,07 | 771,81 | 162,08 | 933,89 | PLA749450 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.05.24 | 6,25 | m2 | 3,6 | 22,50 | 96,48 | 20,26 | 116,74 | PLA747621 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.06.13 | 12,505 | m2 | 3,6 | 45,02 | 192,95 | 40,52 | 233,47 | PLA751530 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.06.20 | 6,2525 | m2 | 3,6 | 22,51 | 96,48 | 20,26 | 116,74 | PLA751746 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.06.20 | 6,2525 | m2 | 3,6 | 22,51 | 96,48 | 20,26 | 116,74 | PLA751875 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.09.07 | 6,2525 | m2 | 3,6 | 22,51 | 96,48 | 20,26 | 116,74 | PLA756675 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.10.18 | 43,7675 | m2 | 3,6 | 157,56 | 675,36 | 141,83 | 817,19 | PLA759050 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.11.03 | 12,505 | m2 | 3,6 | 45,02 | 192,96 | 40,52 | 233,48 | PLA759824 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2023.11.06 | 12,505 | m2 | 3,6 | 45,02 | 192,96 | 40,52 | 233,48 | PLA759915 |
| 68451 | POM-C | POM-C poliacetalis lakštas #30x1000x2000mm, Juodos spalvos | 2023.02.06 | 1 | m2 | 36 | 36,00 | 535,00 | 112,35 | 647,35 | PLA744542 |
| 68451 | POM-C | POM-C poliacetalis lakštas #30x1000x2000mm, Juodos spalvos | 2023.03.31 | 2 | m2 | 36 | 72,00 | 990,00 | 207,90 | 1197,90 | PLA747238 |
| 68451 | POM-C | POM-C poliacetalis lakštas #30x1000x2000mm, Juodos spalvos | 2023.05.29 | 2 | m2 | 36 | 72,00 | 1030,00 | 216,30 | 1246,30 | PLA750442 |
| 68451 | POM-C | POM-C poliacetalis lakštas #30x1000x2000mm, Juodos spalvos | 2023.06.29 | 2 | m2 | 36 | 72,00 | 1034,80 | 217,31 | 1252,11 | PLA752403 |
| 71585 | POM-C | POM-C poliacetalis ruošinys #30x75x300mm, Juodos spalvos | 2023.09.12 | 80 | pcs. | 0,81 | 64,80 | 1008,00 | 211,68 | 1219,68 | PLA756792 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svoris 1m, kg | Viso, kg | Savikaino suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|--|------------|---------|--------------|---------------------|-------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|
| 71323 | PP-H | Polipropileno PP-H strypas D40x1000mm | 2023.08.07 | 1 | m. | 1,51 | 1,51 | 12,20 | 2,56 | 14,76 | PLA754904 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2023.04.13 | 150 | m. | 0,42 | 63,00 | 408,00 | 85,68 | 493,68 | GLF231105 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2023.05.19 | 65 | m. | 0,42 | 27,30 | 176,80 | 37,13 | 213,93 | GLF231512 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2023.06.30 | 50 | m. | 0,42 | 21,00 | 136,00 | 28,56 | 164,56 | GLF232007 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2023.12.07 | 60 | m. | 0,42 | 25,20 | 150,60 | 31,63 | 182,23 | GLF233983 |
| 70698 | PVC | Ø14× 1200mm, PVC solid rod, non-porous, Colour: Grey, Tolerance for diameter +-0,2mm | 2023.06.12 | 7800 | vnt. | 0,22 | 1716,00 | 9058,81 | 0,00 | 9058,81 | CJA2301 |
| 71038 | UPM 203 | Durostone UPM 203, lakštas 10mm | 2023.09.21 | 17,8608 | m2 | 12 | 214,33 | 2060,60 | 432,73 | 2493,33 | LA23005036 |
| 71038 | UPM 203 | Durostone UPM 203, lakštas 10mm | 2023.12.14 | 17,8608 | m2 | 12 | 214,33 | 1881,66 | 395,15 | 2276,81 | LA24000921 |
| 71180 | UPM 203 | Durostone® UPM 203, 10mm, 1000x2000mm lakštas | 2023.07.14 | 10 | m2 | 12 | 120,00 | 1095,00 | 229,95 | 1324,95 | HLV0371196 |
| 72396 | EPM 203 | Durostone® EPM 203, EPGM 203, 66 mm, 1000x1900 mm lakštas | 2024.01.04 | 1,9 | m2 | 108 | 205,20 | 5863,64 | 1231,36 | 7095,00 | PLA762655 |
| 45240 | PA 6 G | PA6-G dia-16mm | 2024.02.19 | 6 | m. | 5 | 30,00 | 289,79 | 60,86 | 350,64 | PLA764787 |
| 73152 | PA 6 G | PA-6G poliamido ruošinys 25mm storio 550x755mm | 2024.02.26 | 1 | pcs. | 25,45 | 25,45 | 316,59 | 66,48 | 383,08 | PLA765336 |
| 69336 | PA 6 Nylon | PA6 NYLON BLACK, Lakštas 2 mm | 2024.03.20 | 2 | m2 | 8,6 | 17,20 | 98,54 | 20,69 | 119,24 | PLA766598 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2024.01.30 | 37,515 | m2 | 16,9 | 634,00 | 3170,02 | 665,70 | 3835,72 | PLA763874 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat. vnt. | Svoris 1m, kg | Viso, kg | Savikaino suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|--|------------|---------|--------------|---------------------|-------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2024.09.03 | 18,7575 | m2 | 16,9 | 317,00 | 1585,01 | 332,85 | 1917,86 | PLA776764 |
| 63919 | PC | Polycarbonate (PC), Lakštas 8mm | 2024.10.02 | 25,01 | m2 | 16,9 | 422,67 | 2113,35 | 443,80 | 2557,15 | PLA778667 |
| 70746 | PC | Polycarbonate (PC), lakštas 5mm | 2024.04.03 | 6,2525 | m2 | 6 | 37,52 | 187,58 | 39,39 | 226,97 | PLA767511 |
| 66544 | PMMA | PMMA organinis stiklas 5mm 2050x3050mm lakštas | 2024.01.03 | 2 | vnt. | 47,52 | 95,04 | 301,56 | 63,33 | 364,89 | PLA762579 |
| 66544 | PMMA | PMMA organinis stiklas 5mm 2050x3050mm lakštas | 2024.01.09 | 1 | vnt. | 47,52 | 47,52 | 150,78 | 31,66 | 182,44 | PLA762798 |
| 66544 | PMMA | PMMA organinis stiklas 5mm 2050x3050mm lakštas | 2024.04.03 | 2 | vnt. | 47,52 | 95,04 | 301,55 | 63,32 | 364,87 | PLA767511 |
| 66544 | PMMA | PMMA organinis stiklas 5mm 2050x3050mm lakštas | 2024.06.28 | 1 | vnt. | 47,52 | 47,52 | 179,05 | 37,60 | 216,65 | PLA772900 |
| 70228 | PMMA | PMMA organinis stiklas 3mm 2050x3050mm lakštas | 2024.08.26 | 6,2525 | m2 | 3,6 | 22,51 | 96,48 | 20,26 | 116,74 | PLA776207 |
| 71585 | POM-C | POM-C poliacetalis ruošinys #30x75x300mm, Juodos spalvos | 2024.01.02 | 80 | pcs. | 0,81 | 64,80 | 952,00 | 199,92 | 1151,92 | PLA62562 |
| 73313 | POM-C | Ruošinys iš POM-C #40x300x300mm | 2024.03.20 | 1 | pcs. | 4,32 | 4,32 | 65,00 | 13,65 | 78,65 | PLA766751 |
| 73321 | POM-H | POM-H strypas D75, baltas | 2024.04.05 | 5 | m. | 5,3 | 26,50 | 573,10 | 120,35 | 693,45 | HLV0395576 |
| 73879 | POM-H | POM-H strypas D80, baltas, L=1000mm | 2024.06.07 | 6 | m. | 8,03 | 48,18 | 721,10 | 151,43 | 872,53 | HLV0402225 |
| 73879 | POM-H | POM-H strypas D80, baltas, L=1000mm | 2024.07.01 | 5 | m. | 8,03 | 40,15 | 600,92 | 126,19 | 727,11 | HLV0404202 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2024.02.21 | 100 | m. | 0,42 | 42,00 | 251,00 | 52,71 | 303,71 | GLF240492 |

| Kodas | Kategorija | Pavadinimas | Data | Kiekis | Mat . vnt. | Svori s 1m, kg | Viso, kg | Savikaino s suma, Eur | Pvm suma, Eur | Viso suma, Eur | Palydintis dokumentas |
|-------|------------|---|------------|--------|------------|----------------|----------|-----------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2024.06.04 | 130 | m. | 0,42 | 54,60 | 326,30 | 68,52 | 394,82 | GLF241767 |
| 48453 | PVC | PVC PN 16 vamzdis dia 40x3 | 2024.08.28 | 40 | m. | 0,42 | 16,80 | 100,40 | 21,08 | 121,48 | GLF242768 |
| 72692 | PVC-U | Ø12,8±1× 1200mm, PVC-U solid rod, non-porous, Colour: Grey | 2024.02.07 | 5715 | pcs. | 0,29 | 1657,35 | 8583,33 | 1802,50 | 10385,83 | HLV0389896 |
| 72692 | PVC-U | Ø12,8±1× 1200mm, PVC-U solid rod, non-porous, Colour: Grey | 2024.03.06 | 285 | pcs. | 0,29 | 82,65 | 428,04 | 89,89 | 517,93 | HLV0392678 |
| 72692 | PVC-U | Ø12,8±1× 1200mm, PVC-U solid rod, non-porous, Colour: Grey | 2024.09.12 | 2900 | pcs. | 0,29 | 841,00 | 4647,63 | 976,00 | 5623,63 | HLV0410652 |
| 72692 | PVC-U | Ø12,8±1× 1200mm, PVC-U solid rod, non-porous, Colour: Grey | 2024.10.16 | 5600 | pcs. | 0,29 | 1624,00 | 8889,26 | 1866,75 | 10756,01 | HLV0414089 |
| 72698 | PVC-U | PVC-U tamsiai pilkas d12 strypas, l=2000mm | 2024.01.11 | 1 | pcs. | 0,29 | 0,29 | 2,15 | 0,45 | 2,60 | HLV0387592 |
| 72698 | PVC-U | PVC-U tamsiai pilkas d12 strypas, l=2000mm | 2024.03.15 | 80 | pcs. | 0,27 | 21,60 | 192,00 | 40,32 | 232,32 | HLV0393605 |
| 72927 | UPGM 203 | Polyester glass mat laminate, UP GM 203, White,10mm, 1010x2020mm sheet | 2024.02.19 | 4 | pcs. | 24,48 | 97,92 | 647,80 | 136,04 | 783,84 | 2400030061 |
| 72928 | UPGM 203 | Polyester glass mat laminate, UP GM 203, White, 10mm, 1040x2200mm sheet | 2024.02.29 | 6 | pcs. | 27,46 | 164,76 | 1406,59 | 295,38 | 1701,98 | 2400030076 |
| 71038 | UPM 203 | Durostone UPM 203, lakštas 10mm | 2024.03.27 | 29,77 | m2 | 12 | 357,24 | 3385,39 | 710,93 | 4096,32 | LA24002098 |
| 72823 | UPM 203 | Durostone® UPM 203, ruošinys #35mm x 31mm x 20mm | 2024.01.30 | 90 | pcs. | 0,03 | 2,70 | 162,00 | 34,02 | 196,02 | PLA763887 |

7 priedas. Detalės gamybai CNC staklėmis naudotų įrankių kainos [55]

| Eil. Nr. | Kodas | Kaina, Eur | Pavadinimas |
|----------|--------------|---------------|--|
| 1 | 202273 12 | 131,00 | Garant VHM freza MTC, DLC, \varnothing h6 DC: 12mm |
| 2 | 121040 3 | 34,60 | Garant VHM-NC centravimo grąžtas 90° susuktas spirale, TiAlN, \varnothing DC h6: 3mm |
| 3 | 122776 8 | 49,50 | HOLEX Pro Steel VHM grąžtas cilindrinio kotu DIN 6535 HA, TiAlN, \varnothing DC h7 (mm arbs coliai): 8 |
| 4 | 122250 2,5 | 10,80 | Garant VHM spiralinis grąžtas, be dangos, \varnothing DC h7: 2,5mm |
| 5 | 132721 M3 | 26,20 | GARANT Master Tap mašininis sriegiklis Forma B, AlTiX, M: M3 |
| 6 | 122250 2,5 | 10,80 | GARANT VHM spiralinis grąžtas, be dangos, \varnothing DC h7: 2,5mm |
| 7 | 122251 1,6 | 12,95 | GARANT VHM spiralinis grąžtas, TiAlN, \varnothing DC h7: 1,6mm |
| 8 | 194030 16X8 | 74,20 | GARANT T formos griovelių freza, be dangos, \varnothing DC \times LC d11 \times d11: 16X8mm |
| 9 | 52133020 | 70,26 | BlueLine – Finish milling cutter |
| 10 | 208121 10 | 37,50 | HOLEX VHM nuožulų freza 90°, TiAlN, \varnothing h6 DC: 10mm |
| 11 | 208156 3 | 36,00 | GARANT VHM spiralinis užvartų nuėmiklis 90°, TiSiN, \varnothing h6 DC: 3mm |
| 12 | 206041 0,6X3 | 62,80 | GARANT VHM freza toroidiniu galu R1 0,05, DLC, \varnothing DC \times L1: 0,6X3mm |
| 13 | 206042 0,8X6 | 62,80 | GARANT VHM freza toroidiniu galu R1 0,1, DLC, \varnothing DC \times L1: 0,8X6mm |
| 16 | 202272 8 | 52,20 | GARANT VHM freza MTC, DLC, \varnothing DC: 8mm |
| 17 | 202292 3 | 27,30 | GARANT VHM freza, AlCrN, \varnothing e8 DC: 3mm |
| 18 | 202244 1 | 40,00 | GARANT VHM freza MTC, be dangos, \varnothing DC: 1mm |
| 19 | 206041 0,6X3 | 62,80 | GARANT VHM freza toroidiniu galu R1 0,05, DLC, \varnothing DC \times L1: 0,6X3mm |
| 20 | 121040 3 | 34,60 | GARANT VHM-NC centravimo grąžtas 90° susuktas spirale, TiAlN, \varnothing DC h6: 3mm |
| 21 | 122251 1,6 | 12,95 | GARANT VHM spiralinis grąžtas, TiAlN, \varnothing DC h7: 1,6mm |
| 22 | 208156 3 | 36,00 | GARANT VHM spiralinis užvartų nuėmiklis 90°, TiSiN, \varnothing h6 DC: 3mm |
| | Viso: | 885,26 | |