

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2024

Sami Haapalainen

Paineensäätöventtiilin säätötyökalun suunnittelu



Sami Haapalainen

Paineensäätöventtiilin säätötyökalun suunnittelu

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa käyttäjän havaitsemaan tarpeeseen paineensäätöventtiilin paineensäätötyökalu. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Millog Oy. Työkalun käyttötarkoitus on säätää kompressorin päälinjan peruspainetta haluttuun tasoon. Peruspaineen säätäminen tapahtuu niin, että paineensäätöventtiilin säätöruuvia kääntämällä myötäpäivään ilmanpaine kasvaa ja kääntämällä vastapäivään ilmanpaine pienenee.

Venttiili sijaitsee hankalassa paikassa. Päästäkseen säätämään venttiiliä on työntekijän pujotettava työkalu kompressorin moottorin ja sisäisten putkien ohi. Venttiiliin ei ole suoraa näköyhteyttä ja työssä on mahdollista käyttää vain yhtä kättä tilan puutteen takia. Työkalun ominaisuuksista paino ja paikoittaminen venttiilin keskiruuviin on työkalun suunnittelussa tärkeimpiä kohtia, jotta työkalun käyttö olisi mahdollisimman helppoa.

Työkalun kahva on suunniteltu Autodeskin Inventor ohjelmalla ja se tulostettiin 3D-Tulostimella. Valmiin tulostetun kahvan sisälle asennettiin teräslevy käsipuristimella, asennettu teräslevy tekee työkalusta paljon vahvemman kuin pelkästään 3D-tulostettu muovi olisi. Työ meni hyvin ja annetuissa tavoitteissa pysyttiin. Muutama kehitysideakin syntyi matkalla. Kahvaan olisi hyvä lisätä pisteet tai suuntaviivat, jotka ilmaisevat teräslevyn suunnan se helpottaisi asemointia venttiilin keskiruuviin.

Asiasanat: 3D-Tulostettu, Paikoittaminen, Työkalu

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2024 | 39 pages

Sami Haapalainen

Pressure control valve adjustment tool design.

The objective of this thesis was to design and manufacture a hand tool instrument. The idea of the hand tool comes from the user needs and this thesis was commissioned by Millog Ltd. The primary function of the tool is to set the air compressor's primary line pressure to the wanted level. Adjustment happens when the primary line valve's center screw turns clockwise to raise the pressure, or anti clockwise to lower the pressure.

The valve's location is difficult to reach because it is inside the air compressor. To get the tool into the valve's center screw we need to bypass the compressor motor and the internal pipes of the device. There is no direct visual connection to the valve and the bypass route can only be fitted one hand at a time. The tool is shaped in the way that it is easy to use with one hand. The tool's weight and the position to the valve's center screw were considered in the main points of the design, in order to make the tool as easy to use as possible.

The tool's handle was drawn with Autodesk Inventor and printed with a 3D printer. When the handle was ready, it was embedded into a steel plate, pressing by hands. An embedded steel plate makes the tool much stronger than just 3D-printed plastic. The work was successful, and the primary goals were achieved, and a few development ideas were born along the way, for example, added guidelines or dots into the printed handle, which are in the same line as the steel plate. It helps to correct the position to the valve's center screw.

Keywords: 3D-Printed, Position, Tool.

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
1.1 Toimeksianto	8
1.2 Tavoitteet	9
1.3 Rajaukset	9
1.4 Suurpainekompressorin tiedot	9
2 Paineensäätöventtiilin toiminta ja ominaisuudet	10
2.1 Venttiilin varren ja säätöruuvien mitat, työkalun suunnittelua varten.	11
3 Työkalun vaatimukset	13
3.1 Kestävyys	13
4 Työkalun suunnittelu	16
5 Tulostusmateriaalin valinta	19
6 3D-luonnokset ja niiden pisteytys	23
6.1 Kahvan valinta	26
7 Valmistus	29
7.1 3D-tulostin	29
7.2 Materiaali	30
7.3 Tulostusprosessi	31
8 Prototyypin koekäyttö	33
9 Dokumentointi	37
10 Lopuksi	38
Lähteet	39

Kuvat

Kuva 1. Paineensäätöventtiili. (Baure Technical Manual 2014)	10
Kuva 2. Paineensäätöventtiilin osat.	11
Kuva 3. Venttiilin varren mitat sivulta päin.	11
Kuva 4. Venttiilin säätöruuvi.	12
Kuva 5. Vetokokeen tulokset	14
Kuva 6. Ruuvien paikoituspaikat	16
Kuva 7. k-arvon vakiot. (Beer & al. 2006)	17
Kuva 8. Valmistajien ilmoittamat materiaaliarvot, tulostusmateriaaleille	19
Kuva 9. 10 N voiman piste ja suunta simuloinnissa	23
Kuva 10. Työkalu TA1	24
Kuva 11. Työkalu TA2	24
Kuva 12. Työkalu TA3	25
Kuva 13. Työkalu TA4	25
Kuva 14. Työkalu TA5	26
Kuva 15. Ultimaker S5 (Maker3D 2023)	30
Kuva 16. Tulostusprosessin "Grid" verkko	31
Kuva 17. Tulostetun kahvan runko ja lovi	32
Kuva 18. Tulostetun kahvan pohja	32
Kuva 19. Teräslaippa ja tulostettu runko	33
Kuva 20. Valmis työkalu	34
Kuva 21. Työkalun asettuminen	35
Kuva 22. Leikkaantunut laippa	36

Taulukot

Taulukko 1. Tulostusmateriaalien keskiarvojen vertailutaulukko	20
Taulukko 2. Pisteytyksessä käytetty ohjetaulukko.	21
Taulukko 3. Materiaalien pisteytys ja kokonaispisteet.	22
Taulukko 4. Työkalun painoarvotaulukko	27
Taulukko 5. Työkalun pisteytystaulukko.	28

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Lyhenne	Lyhenteen selitys
a	Kiihtyvyys
F	Voima
g	Normaaliputoamiskiihtyvyys
m	Kappaleen massa
r	Vääntövarren pituus metreinä
T	Vääntömomentti
$T_{v\ max}$	Maksimi leikkausjännitys
V_{vm}	Von Mises vertailujännitys
W_v	Vääntövastus
\emptyset	Kappaleen halkaisija

1 Johdanto

Alusympäristössä kompressoreita käytetään laajasti paineilman tuottamiseen, jota tarvitaan lukuisissa prosesseissa ja laitteissa. Kompressorit ovat erityisen tärkeitä niissä sovelluksissa, jotka vaativat korkeaa painetta. Kompressorissa on kaksi painelinjaa, päälinja luo peruspaineen, joka on järjestelmässä estämässä kondenssiveden kertymistä ja ylläpitää peruspainetta hiukkas- ja kosteussuodattimissa. Yksi tärkeä komponentti tässä kompressorijärjestelmässä on päälinjan paineensäätöventtiili. Tämä venttiili ohjaa koko järjestelmän peruspainetta. Toisiolinja auttaa päälinjaa luomaan järjestelmään lopullisen käyttöpaineen.

Tarkka ja turvallinen säätö on välttämätöntä kompressorin suorituskyvyn ja luotettavuuden varmistamiseksi, sekä optimaalisen suodatustehokkuuden saavuttamiseksi. Paineensäätöventtiili sijaitsee hankalassa paikassa, kompressorin sisällä. Kompressorin on sijoitettu aluksen laitetilassa muiden teknisten ratkaisujen takia niin, että valmistajan huoltoritilä on seinää vasten ja normaalin säätöväylän käyttäminen ei onnistu ilman että kompressorin irrotettaisiin painelinjasta. Säätö joudutaan tekemään yläkautta, mikä ei ole virallinen huoltoaukko, vaan käsi pujotetaan moottorin ja kompressorin sisäisten paineilmaputkien välistä. Tämän aukon mitat ovat 10 cm x 15 cm, jonka takia säätötyön pystyy toteuttamaan vain yhdellä kädellä. Lisäksi paineensäätöventtiilin asennon ja sijainnin takia säätöruuvien uraan ei ole mahdollista saada näköyhteyttä.

1.1 Toimeksianto

Tämä opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Millog Oy:n, Merijärjestelmät liiketoimintayksikön kanssa. Toimeksiantona oli suunnitella ja valmistaa prototyyppi säätötyökalusta, jota voidaan käyttää teollisen suurpaineekompressorin pääpaineen paineensäätöventtiilin tarkkaan ja

turvalliseen säätöön. Työkalu pyrittiin suunnittelemaan niin, että se on kokonaan tai osittain valmistettavissa 3D tulostimella.

1.2 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli:

- Analysoida teollisen kompressorin päälinjan paineensäätöventtiilin toimintaa ja vaatimuksia.
- Suunnitella ja mallintaa säätötyökalu, joka täyttää asetetut vaatimukset.
- Valmistaa säätötyökalun prototyyppi.
- Testata prototyypin suorituskykyä.
- Dokumentoida suunnitteluprosessi, prototyypin valmistus ja testitulokset.

1.3 Rajaukset

Tämä opinnäytetyö keskittyy kompressorin päälinjan paineensäätöventtiilin säätötyökalun suunnitteluun ja prototyypin valmistukseen. Se ei käsittele kompressorin muita osia tai järjestelmän kokonaisuutta. Opinnäytetyössä ei myöskään tutkita syvällisesti eri säätömenetelmiä.

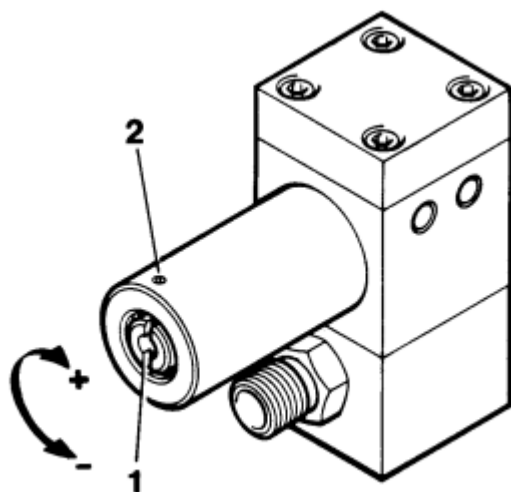
1.4 Suurpainekompressorin tiedot

Kompressori on Bauerin valmistama kolmemäntäinen suurpainekompressori. Malli I 100–3-H. kompressorin normaali käyttöpaine on 400 bar, maksimipaine on 420 bar, virtaus 100 l/min. Kompressorissa on omat paineen tarkistusmittarit. Päälinjan paine pitäisi olla välillä 40–70 bar jotta järjestelmä toimii oikein. Tätä painetta säädetään aiemmin mainitulla paineensäätöventtiilillä.

2 Paineensäätöventtiilin toiminta ja ominaisuudet

Venttiilimalli DNS, PN BK060510 on paineensäätöventtiili, jossa on sisäänrakennettu takaiskuventtiili. Venttiilinsäätö tapahtuu säätöruuvista, joka on esitetty kuvassa yksi. Valmistajan ohjeen mukaan venttiiliä pitäisi säätää vain paineettomassa tilassa. Säätöruuvia kääntämällä myötäpäivään järjestelmän ilmanpaine kasvaa ja kääntäessä vastapäivään järjestelmän ilmanpaine pienenee. Kokemuksien perusteella ruuvia käännetään maksimissaan puoli kierosta myötä- tai vastapäivään, jotta haluttu paine saavutetaan.

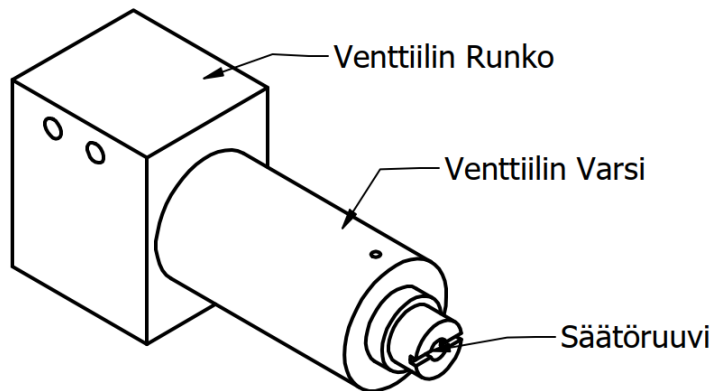
Kun järjestelmän paine on säädetty, tarkistetaan linjan omasta painemittarista, onko päälinjassa saavutettu haluttu paineväli 40–70 bar. Kun haluttu paine on saavutettu, paineensäätöruuvi lukitaan paikalleen lukitusruuvin avulla.



1. Paineen säätöruuvi. 2. Lukitusruuvi

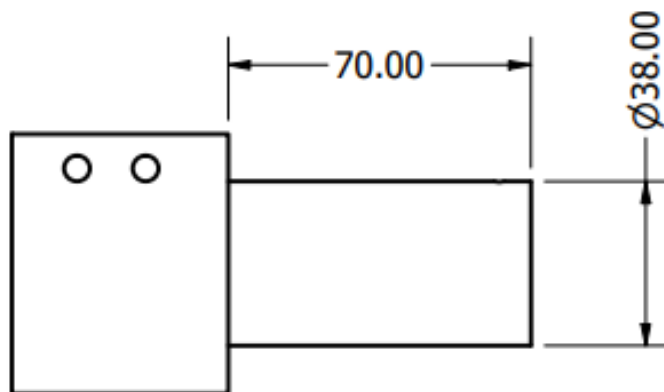
Kuva 1. Paineensäätöventtiili. (Baure Technical Manual 2014)

2.1 Venttiilin varren ja säätöruuvien mitat, työkalun suunnittelua varten.

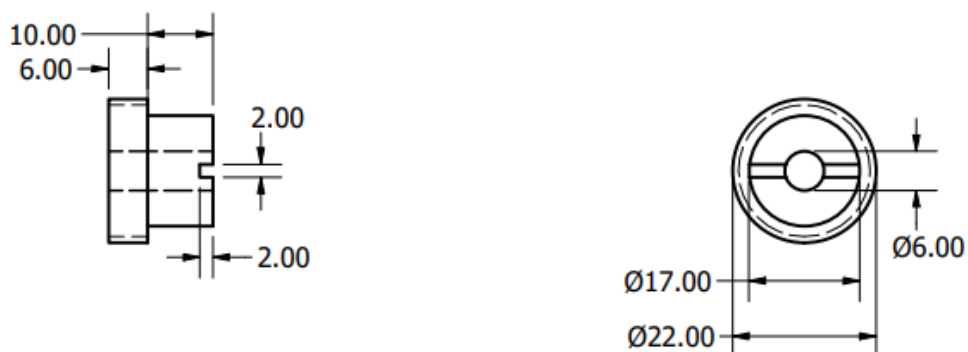


Kuva 2. Paineensäätöventtiilin osat.

Työkalun valmistukseen tarvittavat oleelliset mitat on esitetty venttiilin varren osalta kuvassa kolme sekä säätöruuvien osalta kuvassa neljä. Säätöventtiilin luonnoskuvista on karsittu pois venttiilin alaliitännä, koska se ei ole oleellinen työkalun valmistuksen kannalta. Säätöventtiilin varrenpituus on 70 mm ja sen halkaisija on 38 mm. Lukitusruuvi sijaitsee varren päästä runkoa kohti mitattuna 7,3 mm (Baure Technical Manual 2014)



Kuva 3. Venttiilin varren mitat sivulta päin.



Kuva 4. Venttiilin säätöruuvi.

Venttiilin varressa sijaitsee itse paineensäätöruuvi, jonka kierre on M22 ja ruuvin työstetyn osan halkaisija on 17 mm. Ruuvin päätyura on kaksi millimetriä leveä sekä syvä ja uran pituus 17 mm on säätöruuvinkärjen mittainen. Keskellä sijaitsee 6 mm halkaisijaltaan oleva läpireikä. (Baure Technical Manual 2014)

3 Työkalun vaatimukset

Työkalun tarkoituksena on helpottaa venttiilin säätöruuvien avaamista ja sulkemista yhdellä kädellä. Työkalu on tarkoitettu erityisesti käytettäväksi ahtaassa tilassa, joissa molemmat kädet eivät ole käytettävissä. Työkalun on oltava ergonominen ja mukava käyttää yhdellä kädellä. Kahvan muoto ja koko on suunniteltava siten, että se sopii mukavasti käteen ja antaa hyvän otteen.

Työkalun on oltava riittävän vahva ja kestävä, kestämaan venttiilin ruuvien avaaminen ja sulkeminen. Työkalun on oltava myös tarkka paikoittumaan, koska suoraa näköyhteyttä säätöruuvien kantaan ei ole. Käyttöturvallisuus on huomioitava suunnittelussa. Siinä ei saa olla teräviä reunoja tai muita vaaratekijöitä. (Hedge 2013)

Käsityökalun ergonomisia vaatimuksia on esitetty työterveyslaitoksen tutkimuksessa nimeltä Toisto-Repe. Siinä mainitaan, että yhdellä kädellä käytettävän työkalun painon pitäisi olla alle 1 kg ja kahdella kädellä käytettävän työkalun painon alle 2 kg. Peruskäytössä ranne on lähellä keskiasentoa. Otteet ovat muunneltavissa ja työkalussa ei ole liikaa muotoilua estämässä tukevaa otetta. (Ketola & Laaksonlaita 2004)

3.1 Kestävyys

Säätöventtiilin ruuvien kiertämiseen tarvittava momentti mitattiin paineettomassa tilassa. Mittaus suoritettiin vetokokeena, (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2021a) jossa käytettiin räikkäavainta ja käsivaakaa. Tässä tapauksessa ei ollut saatavilla momenttiavainta, jonka minimimomentti olisi alle neljä newtonmetriä. Käsivaaka kiinnitettiin räikkäavaimen nippusiteellä 220 mm päähän vääntöpisteestä. Käsivaakana käytettiin Digital force meter FK 50, jonka mittaustarkkuus on 0,5 %. Tarkkuus on riittävä kyseisessä mittauksessa. Kuvassa viisi on esitetty toistojen määrät ja saatu tulos kilogrammoina. Lopuksi on laskettu tulosten keskiarvo.

	Vetokoe										
Toisto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Keskiarvo
Tulos Kg	0,54	0,52	0,54	0,53	0,53	0,54	0,51	0,53	0,53	0,54	0,53

Kuva 5. Vetokokeen tulokset

Käytettäessä voiman laskemisessa keskiarvoa 0,53 kg, niin voima lasketaan tekniikan kaavaston mukaan. (Mäkelä & al. 2021a)

$$F = m * a$$

$$F = 0,53 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 5,19 \text{ N}$$

$$F = \sim 5,2 \text{ N}$$

Jossa:

F on voima N

g on putoamiskiihtyvyys (yleensä suomessa käytetään sovittua arvoa 9,81 m/s²)

m on kappaleen massa

a on kiihtyvyys

Näin ollen voimaksi saadaan noin 5,2 Newtonia. Seuraavaksi lasketaan tarvittava momentti. Käsivaaka sijaitsi 220 mm päässä venttiilin ruuvien keskipisteestä. Momentti lasketaan tekniikan kaavaston mukaan seuraavasti. (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2021b)

$$r = 220 \text{ mm} * 10^{-3}$$

$$r = 0,22 \text{ m}$$

$$T = N * r$$

$$T = 5,2 \text{ N} * 0,22 \text{ m}$$

$$T = 1,144$$

$$T \sim 1,1$$

Jossa:

r on vääntövarren pituus

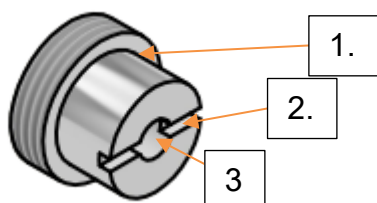
T on vääntömomentti

Säätöventtiilin ruuvien kääntämiseen tarvittavan työkalun pitää kestää vähintään noin 1,1 Nm vääntömomentti.

4 Työkalun suunnittelu

Työkalun suunnittelussa otetaan huomioon aiemmin havaittuja asioita.

Paikoittaminen on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista kyseisen työkalun kohdalla. Kuvassa kuusi on esitetty venttiilin ruuvien mahdolliset paikoituspisteet ja kosketusalat. Numero 1. sisähalkaisija 17 mm ja leveys 2 mm. Numero 2. ruvin ura syvyys 2 mm ja pituus 17 mm. Numero 3. keskireikä Ø6 mm. Lisäksi venttiilin varresta, jonka ulkohalkaisija oli 38 mm saadaan yksi paikoituspiste. Tämän takia mahdollisia paikoituspisteitä on yhteensä neljä kappaletta.



Kuva 6. Ruuvien paikoituspisteet

Tiedämme että ruuvien vääntämiseen tarvittava momentti on 1,1 Nm, joten pitää selvittää, mikä on minimi murtolujuus valittavalle materiaalille. Tiedetään, että ruuvien uran leveys on 2 mm, syvyys 2 mm ja pituus 17 mm.

Selvitetään vääntökerroin suorakulmiolle lujuusopin mukaan. Ensin selvitetään a/b arvo, tämän avulla valitaan kuvasta seitsemän tarvittava kerroin. (Beer, Johnstone & Dewolf 2006)

$$a/b$$

$$a/b = \frac{17 \text{ mm}}{2 \text{ mm}}$$

$$a/b = 8,5$$

Jossa:

a on alueen leveys

b on alueen paksuus

Seuraavaksi valitaan kuvan seitsemän mukaan kerroin k perustuen a/b arvoon, joka oli 8,5 joten taulukosta selviää, että luku lähenee kymmentä, joten kertoimeksi valitaan 0,312. koska $k = c_1 = c_2$.

a/b	c_1	c_2
1.0	0.208	0.1406
1.2	0.219	0.1661
1.5	0.231	0.1958
2.0	0.246	0.229
2.5	0.258	0.249
3.0	0.267	0.263
4.0	0.282	0.281
5.0	0.291	0.291
10.0	0.312	0.312
∞	0.333	0.333

Kuva 7. k -arvon vakiot. (Beer & al. 2006)

Lasketaan suorakulmiolle vääntövastus. Tekniikan kaavaston mukaan seuraavasti. (Beer & al. 2006)

$$W_v = ab^2k$$

$$W_v = 17mm * (2mm)^2 * 0,312$$

$$W_v = 21,22 mm^3$$

Jossa:

W_v on vääntövastus

k on vakiokerroin

a on alueen leveys

b on alueen paksuus

Seuraavaksi lasketaan maksimi leikkausjännitys. Eli maksimi jännitys, mitä materiaalin pitää vähintään kestää.

$$\tau_{vmax} = T/W_v$$

$$\tau_{v \max} = 1100 \text{ Nmm} / 21,22 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{v \max} = 51,84 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{v \max} = 51,84 \text{ MPa}$$

Jossa:

$\tau_{v \max}$ on maksimi leikkausjännitys

T on vääntömomentti

W_v on vääntövastus

Lasketaan Von Mises vertailujännitys, jotta voimme käyttää jatkossa materiaalien vetokokeen tuloksia materiaalien kestävyysarviointiin.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x * \sigma_y + 3\tau^2}$$

Jossa:

σ_{vm} kuvaa x- ja y-akselien normaalijännityksiä ja leikkausjännityksen muodostamaa yhteisjännitystä.

Koska kyseessä on puhdas leikkausjännitys eikä siinä esiinny normaalijännityksiä, voimme supistaa Von Mises kaavan muotoon. (Kähkönen 2019)

$$\sigma_{vm} = \sqrt{3} * \tau_{v \max}$$

$$\sigma_{vm} = \sqrt{3} * 51,84 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{vm} = 89,79 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{vm} = 89,79 \text{ MPa}$$

5 Tulostusmateriaalin valinta

Tulostusmateriaalien kirjo on runsas. Vertailuun on valittu yleisimpiä kuluttajille saatavia tulostusmateriaaleja. ABS-materiaalia käytetään yleensä leluissa, koriste-esineissä ja prototyypeissä. PLA-muovia käytetään yleensä sisustusesineisiin, pakkauksiin ja lääketieteellisiin malleihin. PETG:tä käytetään useimmiten pakkausten osissa ja ulkonäköä vaativissa esineissä. Nylon puolestaan soveltuu suojakoteloihin ja joustavuutta tarvitseviin osiin. PEEK on vahva materiaali ja soveltuu parhaiten työkaluihin, urheiluvälineisiin ja koneen osiksi.

Kuvassa kahdeksan esitetyt materiaaliarvot on kerätty eri valmistajien antamien tietojen perusteella helpottamaan materiaalin valinnassa. Niistä on laskettu keskiarvot, jotka on esitetty taulukossa yksi. Esitetyt arvot ovat valmistajilta: Spectrum Filament, Polymaker, Colorfabb, treeD filament ja Francofil. (Trancofil 2024; treedfilaments 2024; colorfabb 2024; Polymaker 2024; Spectrum Filament 2024)

Valmistaja:	Materiaali	Lujuus (MPa)	Joustavuus (GPa)	Tiheys (g/cm³)	Liukoisuus	Tulostuslämpötila (°C)	Kemikaalien kesto	UV-säteilyn kesto	Hinta (€/kg)	Tulostusvaikeus
Spectrum Filament	ABS	38,00	0,10	1,35	Ei liukene	220	Hyvä	Hyvä	21	Helppo
	PLA	10,00	0,30	1,65	Liukenee asetoniin	190	Hyvä	Huono	26	Helppo
	PETG	26,00	0,25	1,28	Ei liukene	245	Hyvä	Hyvä	34	Keskivaikea
	TPU	50,00	0,40	1,10	Ei liukene	220	Hyvä	Huono	46	Vaikea
	Nylon	40,00	0,15	1,20	Ei liukene	250	Erinomainen	Hyvä	53	Vaikea
	PEEK	140,00	0,30	1,30	Ei liukene	360	Erinomainen	Erinomainen	110	Erittäin vaikea
Polymaker	ABS	44,00	0,20	1,28	Ei liukene	230	Hyvä	Hyvä	25	Helppo
	PLA	16,00	0,50	1,57	Liukenee asetoniin	220	Hyvä	Huono	25	Helppo
	PETG	38,00	0,10	1,36	Ei liukene	250	Hyvä	Hyvä	31	Keskivaikea
	TPU	54,00	0,30	1,80	Ei liukene	210	Hyvä	Huono	52	Vaikea
	Nylon	49,00	0,25	1,10	Ei liukene	260	Erinomainen	Hyvä	66	Vaikea
	PEEK	123,00	0,30	1,32	Ei liukene	360	Erinomainen	Erinomainen	160	Erittäin vaikea
Francofil	ABS	43,00	0,10	1,10	Ei liukene	230	Hyvä	Hyvä	23	Helppo
	PLA	10,00	0,20	1,62	Liukenee asetoniin	190	Hyvä	Huono	39	Helppo
	PETG	28,00	0,30	1,32	Ei liukene	240	Hyvä	Hyvä	26	Keskivaikea
	TPU	80,00	0,50	1,15	Ei liukene	210	Hyvä	Huono	48	Vaikea
	Nylon	58,00	0,23	1,20	Ei liukene	240	Erinomainen	Hyvä	54	Vaikea
	PEEK	140,00	0,30	1,40	Ei liukene	330	Erinomainen	Erinomainen	130	Erittäin vaikea
treedfilament	ABS	44,00	0,30	1,35	Ei liukene	210	Hyvä	Hyvä	28	Helppo
	PLA	30,00	0,50	1,72	Liukenee asetoniin	220	Hyvä	Huono	38	Helppo
	PETG	40,00	0,30	1,28	Ei liukene	240	Hyvä	Hyvä	25	Keskivaikea
	TPU	75,00	0,45	1,10	Ei liukene	220	Hyvä	Huono	55	Vaikea
	Nylon	55,00	0,20	1,18	Ei liukene	260	Erinomainen	Hyvä	70	Vaikea
	PEEK	130,00	0,10	1,40	Ei liukene	350	Erinomainen	Erinomainen	190	Erittäin vaikea
Colorfabb	ABS	40,00	0,30	1,12	Ei liukene	230	Hyvä	Hyvä	28	Helppo
	PLA	16,00	0,30	1,55	Liukenee asetoniin	200	Hyvä	Huono	36	Helppo
	PETG	40,00	0,30	1,30	Ei liukene	240	Hyvä	Hyvä	30	Keskivaikea
	TPU	80,00	0,50	1,10	Ei liukene	230	Hyvä	Huono	51	Vaikea
	Nylon	60,00	0,20	1,10	Ei liukene	260	Erinomainen	Hyvä	63	Vaikea
	PEEK	140,00	0,30	1,40	Ei liukene	370	Erinomainen	Erinomainen	170	Erittäin vaikea
Keskiarvo	ABS	41,80	0,20	1,24	Ei liukene	224	Hyvä	Hyvä	25	Helppo
	PLA	16,40	0,36	1,62	Liukenee asetoniin	204	Hyvä	Huono	32,8	Helppo
	PETG	34,40	0,25	1,31	Ei liukene	243	Hyvä	Hyvä	29,2	Keskivaikea
	TPU	67,80	0,43	1,25	Ei liukene	218	Hyvä	Huono	50,4	Vaikea
	Nylon	52,40	0,21	1,16	Ei liukene	254	Erinomainen	Hyvä	61,2	Vaikea
	PEEK	134,60	0,26	1,36	Ei liukene	354	Erinomainen	Erinomainen	152	Erittäin vaikea

Kuva 8. Valmistajien ilmoittamat materiaaliarvot, tulostusmateriaaleille

	Materiaalit:					
	ABS	PLA	PETG	TPU	Nylon	PEEK
Lujuus (MPa)	41,80	16,40	34,40	67,80	52,40	134,60
Kimmomoduuli (GPa)	0,20	0,36	0,25	0,43	0,21	0,26
Tiheys (g/cm ³)	1,24	1,62	1,31	1,25	1,16	1,36
Liukoisuus	Ei liukene	Liukenee asetoniin	Ei liukene	Ei liukene	Ei liukene	Ei liukene
Tulostuslämpötila (°C)	224	204	243	218	254	354
Kemikaalien kesto	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Erinomainen	Erinomainen
UV-säteilyn kesto	Hyvä	Huono	Hyvä	Huono	Hyvä	Erinomainen
Hinta (€/kg)	25,00 €	32,80 €	29,20 €	50,40 €	61,20 €	152,00 €
Tulostusvaikeus	Helppo	Helppo	Keskivaikea	Vaikea	Vaikea	Erittäin vaikea

Taulukko 1. Tulostusmateriaalien keskiarvojen vertailutaulukko

	Pisteet:			
	1	2	3	4
Lujuus (MPa)	0–25	25–50	50–75	<75
Kimmomoduuli (GPa)	≤0,4	0,39–0,35	0,34–0,20	>0,20
Tiheys (g/cm ³)	<1,50	1,49–1,40	1,39–1,30	>1,29
Liukoisuus	mahdollinen liukeneminen	-	-	Ei liukene
Tulostuslämpötila (°C)	<250	226–250	200–225	>199
Kemikaalien kesto	Ei kestä	-	Hyvä	Erinomainen
UV-säteilyn kesto	Ei kestä	-	-	Kestää
Hinta (€/kg)	<66	46–66	26–45	0–25
Tulostusvaikeus	Erittäin vaikeaa	Vaikea	Keskivaikea	Helppo

Taulukko 2. Pisteytyksessä käytetty ohjetaulukko.

Taulukko 2. Pisteytyksessä käytetty ohjetaulukko. Ylärivillä on kerrottu pisteytysarvot ja pisteet 1–4. Pisteytyskohdat on mainittu ensimmäisessä sarakkeessa vasemmassa reunassa. Arvosteluperusteet käsiteltiin pienryhmässä. Materiaalinlujuus vaikuttaa työkalun kestävyys. Aiemmin laskimme tarvittavan minimilujuuden, joista tämän arvon ylittää vain PEEK materiaali. Työkalun materiaali ei saa olla liian joustava, jotta kiertoliike onnistuu ja lipeämisen mahdollisuus pienenee. Materiaalin tiheys on suoraan verrannollinen työkalun painoon.

Aikaisemmin totesimme, että yhden käden työkalun painon pitää olla alle 1 kg, jotta työnteke olisi ergonomista. Materiaalin liukoisuus on mukana arvostelussa. Vaikka työkalu ei ole suorassa kosketuksessa liuottimien kanssa, on mahdollisuus, että niiden jäämiä on jäänyt pintoihin.

Tulostuslämpötilan nousu nostaa tarvittavan energian määrää lämmityksessä. Laitetilassa voi olla erilaisien kemikaalien ja puhdistusaineiden jäämiä. Käytön

aikana työkaluun ei kohdistu UV-valoa mutta asia pitää huomioida varastoinnin ja kuljetuksen kannalta.

Kyseessä on prototyyppi, johon toimeksiantaja on määrittänyt maksimi hinnan. Tavoitteena on tehdä työkalu sisäisellä tuotannolla, eikä tarkoituksena ole käyttää muita ulkopuolisia valmistajia tai toimijoita.

	ABS	PLA	PETG	TPU	Nylon	PEEK
Lujuus (MPa)	1	1	2	3	3	4
Joustavuus (GPa)	3	3	3	4	4	4
Tiheys (g/cm ³)	4	1	3	4	3	3
Liukoisuus	4	1	4	4	4	4
Tulostuslämpötila (°C)	3	3	2	4	2	1
Kemikaalien kesto	3	3	3	3	4	4
UV-säteilyn kesto	3	1	3	1	3	4
Hinta (€/kg)	4	3	3	2	2	1
Tulostusvaikeus	4	4	3	2	2	1
Pisteet yhteensä.	29,00	20,00	26,00	27,00	27,00	26,00

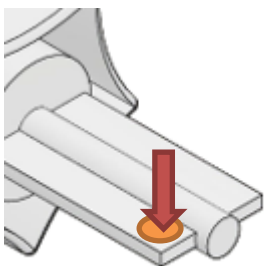
Taulukko 3. Materiaalien pisteytys ja kokonaispisteet.

Taulukossa kolme on esitetty, pisteiden kertymä kullekin vaatimuskohdalle. Materiaalit on lueteltu taulukon ylärivissä. Voimme huomata, että eniten pisteitä sai ABS materiaali 29 pistettä. PEEK, joka oli materiaaleista vahvin ja sietää parhaiten liuottimia ja muita kemikaaleja sai taloudellisten ja valmistusvaatimuksien takia vain 26 pistettä. Voimme kuitenkin todeta, että ainoastaan tarpeeksi korkean lujuusarvon saavuttaa PEEK. Tästä voimme päätellä, että emme voi valmistaa koko kappaletta 3D tulostimella vaan pitää yhdistää kaksi materiaalia, jotta vääntömomentti ei riko vääntimen kärkeä, joka sijoitetaan säätöruuvien uraan.

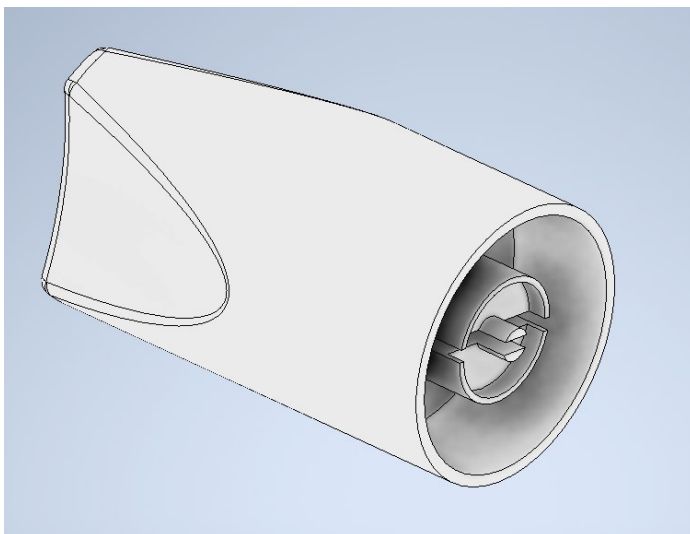
6 3D-luonnokset ja niiden pisteytys

Työkalussa yhdistetään kaksi materiaalia. Tulostamalla tehty kahva, johon kiinnitetään helposti saatavilla olevaa 2 mm paksuista AISI304 ruostumatonta terästä. Teräksen murtolujuus on 415 MPa, joka on huomattavasti korkeampi, kun aiemmin laskemamme Von Mises vertailujännityksen arvo. Lopuksi varmistamme, että työkalun kahvaan ei kohdistu liiallista leikkausjännitystä ruostumattomasta teräksestä. Leikkausjännityksen pitää olla alle ABS-materiaalin lujuuden, joka on 41,80 MPa. Tähän leikkausjännitykseen voimme vaikuttaa teräksen ja kahvan välisen kosketuspinnan pinta-alalla.

Työkalu mallinnettiin Inventor ohjelmalla. Aiemmin totesimme materiaalin valinnassa, että ABS olisi paras vaihtoehto tämän prototyyppiin valmistukseen. Inventor ohjelmassa on mahdollisuus valita kyseinen materiaali, jonka pohjalta Inventor laskee automaattisesti massan annetulla tiheydellä $1,24 \text{ g/cm}^3$. Lisäksi suoritettiin työkalun simulointi. Tämän avulla saatiin selville kahvan pinta-ala ja rakenteen tukevuus. Simuloinnissa asetettiin 10 N vasempaan keskilaippaan kuvan yhdeksän mukaan, jotta saatiin aikaiseksi vääntö ja kiertoliike. Simulointi laskee automaattisesti poikkeaman millimetreinä. Tätä arvoa hyödynnetään rakenteen tukevuuden pisteytykseen, joka on esitetty taulukossa 6.

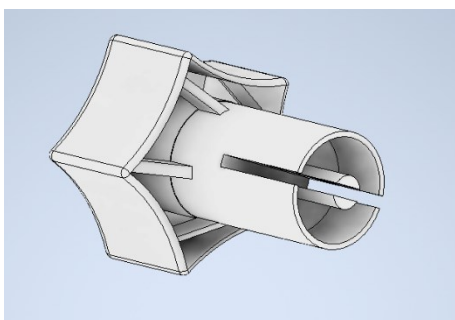


Kuva 9. 10 N voiman piste ja suunta simuloinnissa



Kuva 10. Työkalu TA1

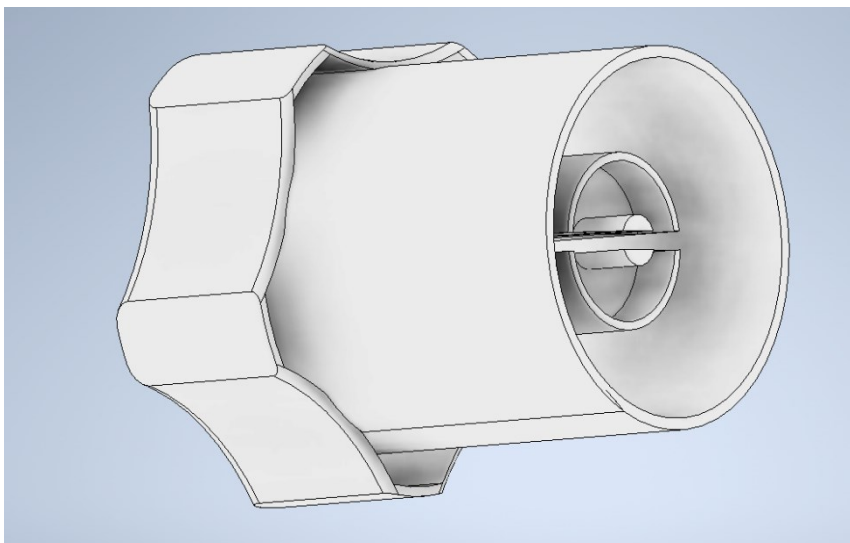
Työkalussa TA1 varsi on umpinainen ja kolmella painanteella muotoiltu pitävämpää otetta varten. Työkalussa on neljä paikoittamispistettä. Tällä työkalulla on mahdollista kääntää ruuvi 33 mm syvyyteen, joka on hyvinkin riittävä syvyys. Tämä työkalu on luonnoksista painavin 0,059 kg. Työkalun otteen pinta-ala on 7546,28 mm². Rakenteen tukevuutta kuvaava poikkeama on 0,0789 mm. Kappaleen vääntövastus on 300,4 mm³



Kuva 11. Työkalu TA2

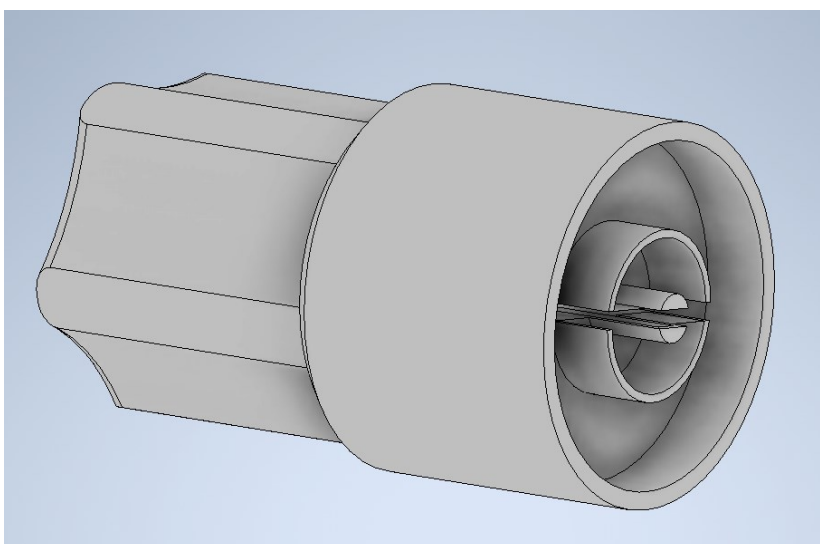
Työkalussa TA2 kahva on tähdenmallinen, joten se ei ole niin tarkka asennostaan. Jotta ote olisi pitävä, painaumia on viisi kappaletta. Työkalussa on kolme paikoituspistettä ja kahvan sekä keskivarren välissä on lisätuennat lisäämässä jäykkyyttä. Muuten kahva on ontto. Tämän työkalun massa on 0,008 kg ja sillä pystyy kääntämään ruuvien 24,5 mm syvyyteen. TA2 kahvan

pinta-ala on pienin $1927,28 \text{ mm}^2$. Rakenteen tukevuutta kuvaava poikkeama on $0,0979 \text{ mm}$. Kappaleen vääntövastus on $78,4 \text{ mm}^3$



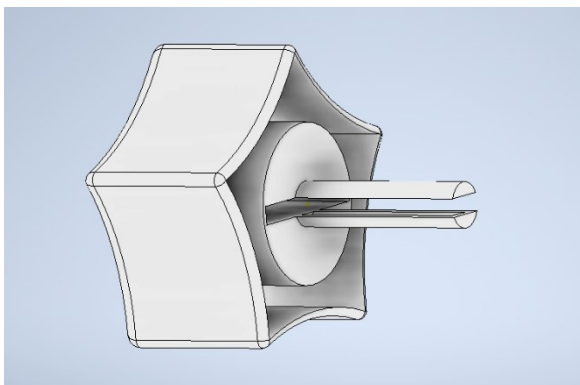
Kuva 12. Työkalu TA3

Työkalussa TA3 paikoituspisteitä on neljä, kahvan pinta-ala on $2816,00 \text{ mm}^2$. Kahva on kuppimainen, jonka pohjaan on kiinnitetty paikoituspisteet ja keskiväännin. Painoa tälle työkalulle kertyi $0,019 \text{ kg}$. Rakenne on tukevin, poikkeama on vain $0,008$ millimetriä. Kappaleen vääntövastus on $181,8 \text{ mm}^3$



Kuva 13. Työkalu TA4

Työkalu TA4 on hyvin vastaava kuin TA3 mutta kahva on pidennetty ja jätetty ontoksi. Paikoituspisteitä on 4 kappaletta. Työkalulle painoa kertyi 0,026 kg. Kahvan pinta-ala on 3884,84 mm². Rakenteen tukevuutta kuvaava poikkeama on 0,0999 mm. Kappaleen vääntövastus on 197,6 mm³



Kuva 14. Työkalu TA5

Työkalu TA5 on kaikista kevyin 0,006 kg. Paikoituspisteitä on vain kaksi. Kahvan pinta-ala on myös pienin 1927,28 mm². Rakenteen tukevuutta kuvaava poikkeama on suurin 1,092 mm. Kappaleen vääntövastus on 102,1 mm³

6.1 Kahvan valinta

Pisteytyksen avuksi luotiin painoarvotaulukko, jossa painoarvot määritettiin kyselyn perusteella. Käyttäjä 1 ja käyttäjä 2 ovat henkilöitä, jotka arvostelivat painoarvoja käyttäjän näkökulmasta. Toim.1 edusti toimeksiantajaa.

Painoarvot annettiin pisteiden välillä 1–5. Tulokset laskettiin yhteen ja muutettiin prosenteiksi, mikä muodostaa lopullisen painoarvon. Tulokset löytyvät taulukosta neljä.

Esitetyt pisteet ovat seuraavat: 1. Täysin eri mieltä. Ei vaikuta työkalun valintaan. 2. Osittain eri mieltä. Pitää ehkä huomioida valinnassa. 3. Neutraali. Ei osaa sanoa miten vaikuttaa valintaan. 4. Osittain samaa mieltä. Vaikuttaa osittain valintaan. 5. Täysin samaa mieltä. Vaikuttaa vahvasti valintaan.

Kyselyn perusteella suurimman painoarvon sai paikoittaminen 28 %. Toiseksi tuli rakenteen tukevuus 27 %. Kolmanneksi ergonomia 21 %. Neljänneksi valmistettavuus 15 % ja pienimmän painoarvon sai työkalun fyysinen paino 9 %.

Pisteytys kysely. Pisteet 1–5						
Työkalun Painoarvon jako		Käyttäjä 1	Käyttäjä 2	Toim. 1	%	Paino arvot
Vaatimus:	Paikoittaminen	5	5	5	28 %	0,28
	Ergonomia	2	5	4	21 %	0,21
	Rakenteen tukevuus	5	5	4	27 %	0,27
	Paino	2	1	2	9 %	0,09
	Valmistettavuus	3	1	4	15 %	0,15
Yht.		17	17	19	100 %	1

Taulukko 4. Työkalun painoarvotaulukko

Taulukossa viisi on esitetty työkalujen pisteytykset ja painoarvoilla painotetut pisteet.

Paikoittamisessa pisteet määräytyivät seuraavilla perusteilla: yhdestä paikoituspaikasta sai yhden pisteen ja maksimi pistemäärä on neljä.

Ergonomian pisteet perustuvat kahvan pinta-alaan, perustuen tutkimuksiin (Hedge 2013; Matuszek & Drobina 2018) joissa käsitellään työkalun sopivuutta ja puristusvoimia. Koska materiaali on kaikissa sama, niihin ei ole syntynyt kitkaeroja materiaalien perusteella. Pisteet jaettiin sijoituksen mukaan 1–5.

Rakenteen tukevuus perustuu Inventor ohjelman simuloimaan poikkeamaan. Pisteet jaettiin tämän perusteella seuraavasti: Pienin poikkeama sai viisi pistettä ja suurin poikkeama yhden pisteen.

Painon pisteytys perustuu kappaleen simuloituun massaun. Kevyin sai viisi pistettä ja painavin yhden pisteen.

Valmistettavuus perustuu työkalun rakenteen monimutkaisuuteen. Tässä huomioitiin, miten paljon oli yhtenäisiä pintoja, sekä kulmien ja urien määriä. Lisäksi valmistettavuudessa huomioitiin tulostusmateriaalin tarve, jota arvioitiin painon perusteella. Pisteet jaettiin sijoituksen mukaan 1–5.

	Työkalu:					
Työkalun vaatimus pisteytys	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	Painoarvot
Paikoittaminen	4	3	4	4	2	0,28
Ergonomia	5	2	3	4	1	0,21
Rakenteen tukevuus	4	2	5	3	1	0,27
Paino	1	4	3	2	5	0,09
Valmistettavuus	4	3	3	4	5	0,15
Pisteet:	18	14	18	17	14	
Pisteet painoarvon kanssa:	2,87	1,91	2,58	2,71	1,64	1,00

Taulukko 5. Työkalun pisteytystaulukko.

Taulukosta käy ilmi, että työkalut TA1 ja TA3 saivat saman verran pisteitä. Kun pisteet lasketaan painoarvojen mukaan työkalu TA1 sai eniten pisteitä 2,87 ja TA3 2,58 pistettä. Kolmanneksi painoarvopisteiden jälkeen tuli TA4, joka sai 2,71 pistettä. Vähiten pisteitä sai TA5, 1,64 pistettä.

7 Valmistus

Työkalun prototyyppi valmistettiin yrityksen sisäisellä osaamisella ja laitteistolla. Tulostuksessa ja valmistuksessa käytettiin saatavilla olevia resursseja.

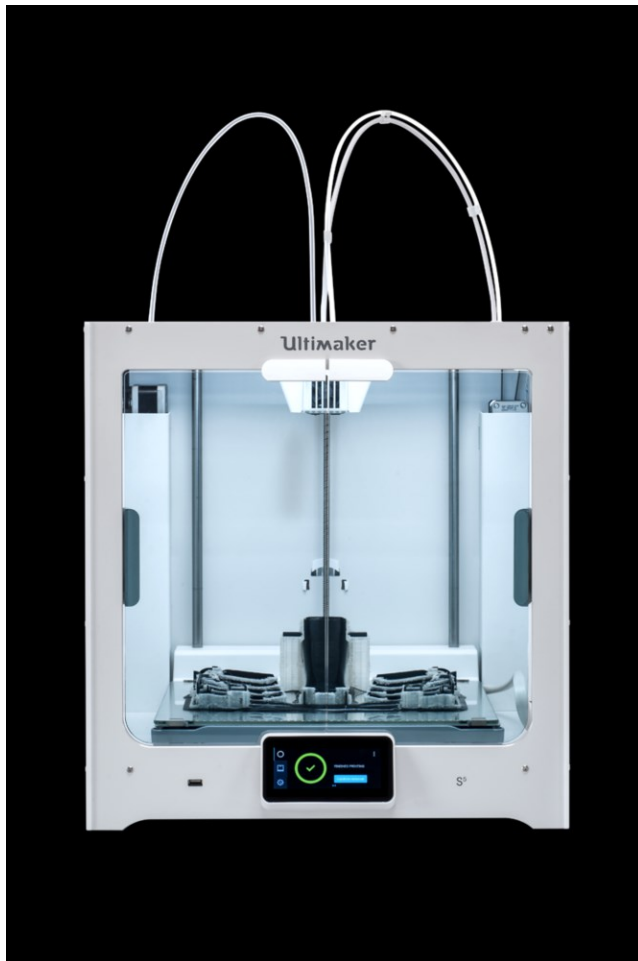
7.1 3D-tulostin

Tulostimena toimi Millog Oy:n oma 3D-tulostin kuvassa 15 oleva Ultimaker S5.

S5:ssä on kaksi suutinta, jotka mahdollistavat samanaikaisen tulostamisen kahdella materiaalilla tai värillä. Tämä lisää tulostimen monipuolisuutta ja mahdollistaa monimutkaisempien muotoilujen ja ominaisuuksien tulostamisen. Tulostusalue on 330 x 240 x 300 mm, mikä on riittävän suuri useimmille käyttötarkoituksille. S5:n tulostusnopeus on parhaillaan 24 mm³/s. Hyvä tulostuslaatu saavutetaan 0,25 mm:n suuttimen minimikerrospaksuuden ansiosta. Tarkkuus on 6,9 mikronia XY-suunnassa ja 2,5 mikronia Z-suunnassa.

Tulostin tukee laaja-alaista materiaalivalikoimaa, mukaan lukien PLA, ABS, nylon, TPU, PC ja PP. Se on yhteensopiva myös kolmannen osapuolen materiaalien kanssa. Suuttimia on saatavana kolmessa eri koossa (0,25 mm, 0,4 mm ja 0,8 mm). S5:ssä on 4,7 tuuman kosketusnäyttö, jonka avulla tulostimen käyttö on yksinkertaista.

Valmistajan mukaan tulostin on hyvä valinta prototyyppien, loppukäyttötuotteiden ja monimutkaisten muotojen tulostamiseen laaja-alaisella materiaalikokeilulla.



Kuva 15. Ultimaker S5 (Maker3D 2023)

7.2 Materiaali

Tulostusmateriaaliksi valikoitui Ultimakerin ABS Black

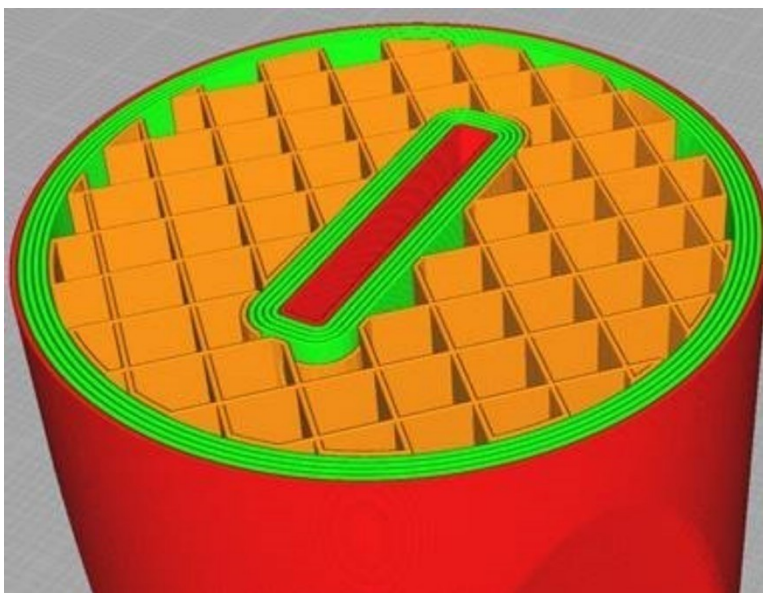
Ultimaker Black ABS oli käytettävissä tämän prototyypin valmistukseen, koska materiaalia oli valmiiksi varastossa. Ultimakerin ABS Blackissa on hyvät mekaaniset ominaisuudet, jotka tekivät siitä sopivan materiaalin tähän prototyyppiin. Se on erittäin kestävä, ja sillä on korkea iskunkestävyys ja kemikaalien kestävyys. Tämä tekee siitä sopivan esimerkiksi koneenosien, työkalujen ja prototyyppien tulostamiseen. Materiaalin vetomoduuli on 1681,5

MPa ja myötölujuus 42,3 MPa. Valmistaja on käyttänyt testausmenetelmänä ISO 527 standardia.

Ultimaker Black ABS:ia on mahdollisuus tuottaa tasaista ja sileää viimeistelyä, joka sopii erinomaisesti visuaalista kohdetta varten. Se mahdollistaa yksityiskohtaisen tulostuksen, ja sillä on alhainen kerrospaksuusominaisuus. Tämä tekee siitä sopivan monimutkaisten muotojen ja pienten piirteiden tulostamiseen. Se on suhteellisen helppokäyttöinen materiaali, jolla on alhainen taipuma riski. Se tarttuu hyvin tulostusalustaan, mikä vähentää irtoamisen riskiä tulostuksen aikana. (Ultimaker 2017)

7.3 Tulostusprosessi

Pohjaan ja yläosaan tulostettiin 10 mm paksu, täysin umpinainen alue. Materiaalin säästämiseksi sisäinen rakenne luotiin kennomaiseksi, jossa on 20 % täyttö niin kutsuttu "Grid" verkko, joka on esitetty kuvassa 16. Seinämien kiinteäksi paksuudeksi määritettiin 2 mm. Suuttimena toimi 0,4 mm suutin, jolla saavutettiin vain 0,2 mm kerroskorkeus. Tulostusprosessissa valmistetun kahvan runko on esitetty kuvissa 17 ja 18.



Kuva 16. Tulostusprosessin "Grid" verkko



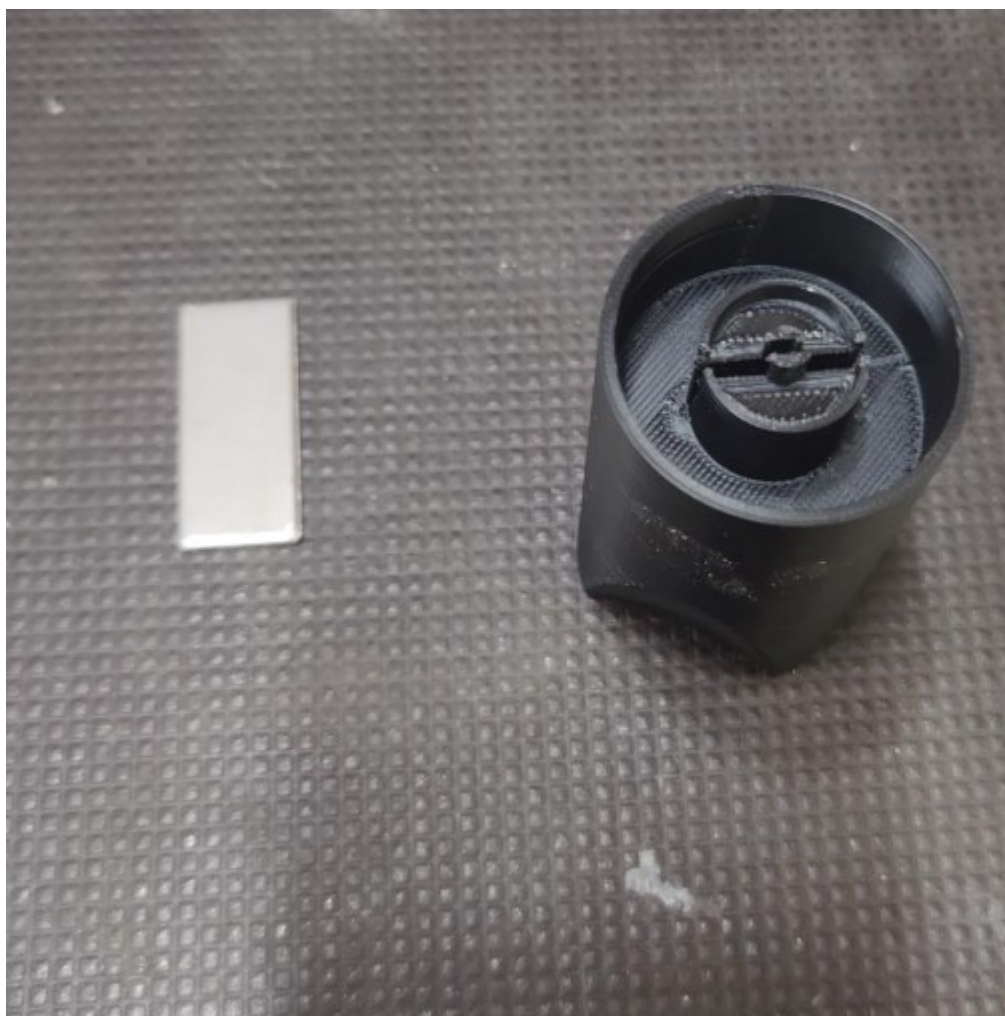
Kuva 17. Tulostetun kahvan runko ja lovi



Kuva 18. Tulostetun kahvan pohja

8 Prototyypin koekäyttö

Prototyyppi koottiin kahdesta osasta kuvassa 19, 3D tulostetusta rungosta ja ruostumattomasta teräksenlaipasta. Rungossa on jätetty laipalle kolo, johon laippa puristettiin käsipuristimella sisälle, kuten esitetty kuvassa 20. Puristimen avulla oli mahdollista saada aikaan tasainen puristus, jolla välttyttiin siltä, että laippa alkaisi mennä vinoon asennuksen aikana. Puristin ei myöskään aiheuta iskevää voimaa kumpaakaan kappaleeseen.

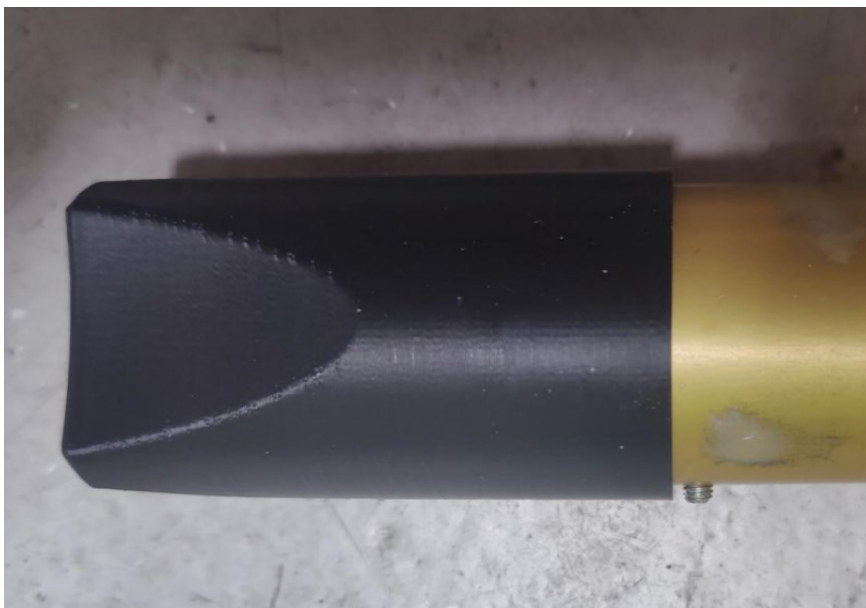


Kuva 19. Teräslaippa ja tulostettu runko



Kuva 20. Valmis työkalu

Kuvassa 21 prototyyppiä kokeiltiin ensin irtonaiseen venttiiliin ja se paikoittui hyvin jokaisesta paikoituspisteestä. Teräslaippa hakeutuu venttiilin ruuvien uraan pienellä kiertoliikkeellä ja istuu tukevasti paikoilleen, joten kohdistuksen huomaa hyvin työkalua kääntämällä. Tämän ansiosta voi olla varma, että työkalu on paikoillaan eikä välitöntä lipeämisen vaaraa ole. Tämä voi aiheuttaa työtapaturmia tai välineiden rikkoutumista. Työkalua on miellyttävä pitää kädessä ja sen keveyden ansiosta sitä on helppo liikutella pelkästään sormien varassa. Tämä on hyvä ominaisuus, koska työkalua käytetään ahtaissa tiloissa.



Kuva 21. Työkalun asettuminen

Prototyypin kokeiltiin normaalissa käyttöympäristössä. Työkalun sai hyvin pujotettua käden mukana kompressorin läpi säätöventtiilille. Lisäksi työkalun asennon vaihtaminen oli vaivatonta, joten sen asettaminen venttiilin ruuvia vasten onnistui kiitettävästi.

Työkalun ja kompressorin pohjan väliin jäi tilaa vain muutama millimetri, joten työkalusta ei saa otetta koko kämmenalalla. Työkalun kääntäminen onnistui kuitenkin vaivattomasti sen kahvan muotoilun ansiosta. Muotoilu mahdollisti kääntämisen sormilla ja ote oli silti tukevan oloinen ilman, että työkalu olisi huojunut tai lipsunut otteesta tai venttiilistä.

Prototyypin kokeilussa huomattiin ominaisuus, jonka lisääminen lopputuotteeseen olisi suositeltavaa. Kahvaan voisi lisätä kohopisteet, jotka osoittavat teräslaipan suunnan. Tällöin olisi vielä helpompaa asettaa työkalu paikoilleen ja ruuvien kääntymistä olisi helpompi seurata.

Prototyypistä tulostettiin mielenkiinnon vuoksi myös toinen versio, joka on esitetty kuvassa 22. Tässä versiossa ei käytetty ollenkaan teräslaippaa vaan kaikki oli tulostettu samasta materiaalista yhtenä kappaleena. Tämän version koekäytössä havaittiin, että työkalulle kävi juuri niin kuin aiemmin oli

laskennallisesti todettu. Materiaali ei kestänyt kierto liikettä vaan tulostettu laippa leikkaantui.



Kuva 22. Leikkaantunut laippa

9 Dokumentointi

Millog Oy:ssä on käytössä M-files tiedonhallintaohjelmisto, joka on hyvin yleisesti käytössä oleva tiedonhallintaohjelma. Koko prosessi tallennetaan ja dokumentoidaan M-files järjestelmään, jossa se on saatavilla yrityksen sisäistä käyttöä varten.

Sinne tallennetaan prototyypin rakennekuvat, inventor ohjelmiston 3D-malli ja 3D-luonnoksen Step-tiedosto, jonka avulla on mahdollista tulostaa kyseisen työkalun runko, missä tahansa Step-tiedostoa tukevassa 3D-tulostimessa. Lisäksi kyseinen opinnäytetyö tallennetaan M-files järjestelmään samaan virtuaalikansioon, jossa edellä mainitut tiedostot sijaitsevat.

Kun prototyyppiä päivitetään tai muokataan, se tallennetaan uudella versionumerolla, jotta alkuperäinen työkalu säilyy.

10 Lopuksi

Lopputyön tavoitteena oli suunnitella paineensäätöventtiilin työkalu, työkalun tarpeellisuus havaittiin käyttäjien toimesta. Työkalu mahdollistaa työskentelyn yhdellä kädellä ilman näköyhteyttä säädettävään venttiiliin. Rakenteen ja muotoilun suunnittelussa käytettiin apuna Inventor 3D- suunnittelu ohjelmaa. Ohjelma mahdollisti myös FEM-simuloinnin, jolla voitiin tarkkailla työkalun kiertymistä kuormittuneena. Työkalun lujuuslaskennat suoritettiin käsin ja kirjattiin kyseiseen opinnäytetyöhön. Von Mises kaavaa hyödyntämällä päästiin parhaaseen lopputulokseen.

Työkalun kahvan materiaaliksi valikoitu ABS-muovi, hinnan ja saatavuuden perusteella, vaikka se ei ollut kaikkein kestävin materiaali. Ongelmasta kuitenkin selvittiin kasvattamalla teräksisen keskilaipan kokoa. Muotoilussa kiinnitettiin erityistä huomiota rakenteen keveyteen ja otepinnan muotoiluun, hyvän otteen takaamiseksi.

Työkalun runko tulostettiin 3D-tulostimella ja teräslaippa leikattiin ohutlevyleikkurilla, jonka jälkeen osat yhdistettiin käsipuristimen avulla yhdeksi kokonaisuudeksi. Toteutettu työkalu valmistui koekäyttöä varten annetussa aikataulussa ja määrätyssä budjetissa.

Työkalun kokeilussa havaittiin muutamia puutteita, jotka on hyvä huomioida tulevaisuudessa. Laipan asennon havaitsemisen voisi ratkaista, koho kuvioinnin tai muun loven avulla niin että sen havaitsee pelkästään sormenpäillä. Tätä kuviota voitaisiin myös hyödyntää työkalun kiertoliikkeen seuraamiseen koska yleensä tarvittava kiertoliike on maksimissaan $\frac{1}{4}$ kierosta.

Oli mielenkiintoista havaita, että vaikka laskettu vääntömomentti oli vain 1,1 niin laipankärjen maksimi leikkausjännitys nousee niinkin korkeaksi kuin 52. Lisäksi normaalijännityksen ja leikkausjännityksen muodostama yhteisjännitys nousi 89 MPa:han. Tällä perusteella työkalu ei voinut kestää ilman terälaippaa ja se todistettiin luvussa kahdeksan.

Lähteet

Baure Technical Manual 2014. Bauer, pp. 16.

Beer, F., Johnstone, R. & Dewolf, J. 2006. Mechanics of material Fourth Edition in SI Units. MvGraw-Hill. New York.

colorfabb 2024. colorFabb. URL: <https://colorfabb.com/filaments>. Accessed: 28 May 2024.

Hedge, A. 2013. HAND TOOL DESIGN. URL: <https://ergo.human.cornell.edu/studentdownloads/DEA3250pdfs/Hand%20Tools.pdf>. Accessed: 28 May 2024.

Kähkönen, M. 2019. WQ-profiilin käyttö yläpaarteena teräsristikossa.

Ketola, R. & Laaksonlaita, S. 2004. Toisto-Repe : Toistotyön arviointimenetelmä.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2021a. Tekniikan Kaavasto. AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka. Tampere.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2021b. Tekniikan Kaavasto. Tammertekniikka AMK-Kustannus Oy. Tampere.

Maker3D 2023. Ultimaker 5S.

Matuszek, J. & Drobina, R. 2018. Designing handle oh hand tools in the aspect of comfort and safety. University Of Bielsko-Biana. Bielsko-Biana. URL: https://www.researchgate.net/publication/330018563_Designing_Handles_of_Hand_Tools_in_the_Aspect_of_Comfort_and_Safety_Design_For_Accessibility. Accessed: 4 September 2024.

Polymaker 2024. 3d-printing-filament. URL: <https://polymaker.com/>. Accessed: 28 May 2024.

Spectrum Filament 2024. Spectrum. URL: <https://spectrumfilaments.com/en/filament-types/abs-en/>. Accessed: 28 May 2024.

Trancofil 2024. Francofil. URL: <https://francofil.fr/en/product-category/filaments/>. Accessed: 28 May 2024.

treedfilaments 2024. TreeD Filaments. URL: <https://treedfilaments.com/>. Accessed: 28 May 2024.

Ultimaker 2017. Tekniset tiedot ABS.