

Tuomas Moilanen

**3D-TULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN
TYÖVÄLINEVALMISTUKSESSA**

3D-TULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN TYÖVÄLINEVALMISTUKSESSA

Tuomas Moilanen
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, tuotantotekniikka

Tekijä: Tuomas Moilanen
Opinnäytetyön nimi: 3D-tulostuksen hyödyntäminen työvälinevalmistuksessa
Työn ohjaaja: Esa Kontio
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2018
Sivumäärä: 34 + 0 liitettä

Opinnäytetyö tehtiin V.A.V. Group Oy:lle, joka valmistaa erilaisia tiivisteprofiileja ekstruusiomenetelmällä silikonista ja TPE-muovista. Työ aloitettiin, koska yritykseen hankittiin metallin 3D-tulostin, jolla on tarkoitus valmistaa ekstruusiosuuttimia.

Työssä suunniteltiin ekstruusiosuuttimissa käytettäviä modulaarisia osia, joilla nopeutetaan ja helpotetaan suuttimien suunnittelua ja valmistusta. Tavoitteena oli myös optimoida materiaalin käyttöä 3D-tulostuksessa, jotta tulostuksesta saataisiin mahdollisimman kustannustehokasta. Lisäksi tavoitteena oli laatia työohjeita 3D-tulostuksen vaiheisiin ja suuttimien suunnitteluun, joiden tarkoituksena on toimia apuna uusille työntekijöille.

Modulaaristen osien suunnittelussa käytettiin Inventor 3D CAD -ohjelmaa. Osista suunniteltiin erilaisia prototyypppejä. Prototyypeillä haettiin osien ulkoisia muotoja ja pohdittiin osien kiinnityksen eri vaihtoehtoja. Prototyypeillä testattiin myös, missä asennossa osat kannattaa tulostaa, jotta osille saadaan paras pinnanlaatu tärkeille pinnoille. Materiaalin käyttöä pyrittiin optimoimaan simuloimalla. Simulointi tehtiin Inventorin Stress Analysis -toiminnolla, jolla simuloitiin suuttimeen kohdistuvaa painetta eri materiaalivahvuuksilla. Työohjeita laadittiin 3D-tulostimen käytöstä saadun koulutuksen ja omien kokemusten perusteella. Niissä myös hyödynnettiin yrityksen vanhoja työohjeita ja 3D-tulostimen valmistajan käyttöohjeita.

Tuloksena opinnäytetyössä saatiin suunniteltua modulaariset osat. Osat toimivat mekaanisesti oikein tiivisteprofiiliin valmistuksessa sekä helpottavat ja nopeuttavat uusien ekstruusiosuuttimien suunnittelua. Materiaalin käyttö optimoitiin modulaarista osista virtauksen kannalta edulliseksi. Ekstruusiosuuttimien materiaalin käyttöä voidaan optimoida hyödyntäen simuloinnista saatuja tuloksia. Tuloksista saadaan tietoa, kuinka paljon materiaalia suutin mahdollisesti tarvitsee tietylle paineelle. Työohjeet laadittiin 3D-tulostuksen eri vaiheisiin ja uuden suuttimen suunnitteluun.

Asiasanat: 3D-tulostus, modularisointi, optimointi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme in Mechanical Engineering, Production Technology

Author(s): Tuomas Moilanen
Title of thesis: Using 3D-printing for Tool Manufacturing
Supervisor(s): Esa Kontio
Term and year when the thesis was submitted: spring 2018
Pages: 34 + 0 appendices

This thesis was made to V.A.V. Group Oy, which produce different type of seal profiles in extrusion from silicone and TPE-plastic. This thesis was started because the company got a new metal 3D-printer for manufacturing extrusion dies, which are used to produce seal profiles.

The first objective for this thesis was to design modular parts for extrusion dies. The purpose of the parts is to help design new dies faster and easier. The second objective was to optimize material consumption in 3D-printing so that the printing is as cost-efficient as possible. Last objective was to draw work instructions in different stages of 3D-printing and for designing a new die. The purpose for these instructions is to help new employees to carry out their work.

Modular parts were designed using Inventor 3D CAD -software. First prototypes were designed only to see which printing position is best for surface quality. For material consumption in 3D-printing, dies were simulated with different pressure and material thickness in Inventor's Stress Analysis -function. Work instructions were drawn up using company's old instructions and manufacturer manual for 3D-printer. Own experiences and training were also helpful.

As a result, modular parts were designed. Parts work as supposed, helping design new extrusion dies faster and easier. The material consumption can be optimized using simulation results. Results give information how much die might need material in specific pressure. Work instructions were drawn up for wanted stages in 3D-printing and designing a new die.

Keywords: 3D-printing, modularization, optimization

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty V.A.V Group Oy:lle. Haluan kiittää yritystä todella kiinnostavasta aiheesta. Metallin 3D-tulostus kehittyy tulevaisuudessa entistä merkittävämmäksi valmistusmenetelmäksi, joten sen parissa työskenteleminen on ollut erittäin opettavaista ja mielenkiintoista.

Erityiskiitos opinnäytetyön ohjaajille insinööri Jarno Gullstenille ja lehtori Esa Kontiolle. Heiltä saatu apu ja palaute oli tärkeää tämän opinnäytetyön onnistumisen kannalta. Kiitos myös kaikille toimeksiantajayrityksen työntekijöille avusta opinnäytetyön aikana sekä hyvästä työskentelyilmapiiristä. Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustamisesta opinnäytetyön aikana.

Oulussa 4.4.2018

Tuomas Moilanen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 VALMISTUMENETELMÄT	10
2.1 Ekstruusio	10
2.2 Suuttimien valmistus	11
2.2.1 Kipinätyöstö	11
2.2.2 Lankakipinätyöstö	12
2.3 Materiaalia lisäävät menetelmät	13
2.4 Jauhepetisulatus	14
2.5 SLM-tekniikka	15
2.5.1 Tukirakenteet	15
2.5.2 Suojakaasu	16
3 LÄHTÖTILANNE	17
3.1 Aiemmat menetelmät suuttimien valmistukseen	17
3.2 Suuttimien osat	17
3.3 Uudet menetelmät suuttimien valmistukseen	18
3.4 SLM 125 HL -tulostin	19
3.4.1 Tekniset tiedot	20
3.4.2 Lisälaitteet	20
4 MODULAARISTEN OSIEN SUUNNITTELU	22
4.1 Osien suunnittelu Inventorilla	22
4.2 Osien kiinnitys suuttimiin	23
4.3 Osien testaus	24
5 MATERIAALIN OPTIMOINTI	25
5.1 Modulaaristen osien materiaalin käyttö	25
5.2 Ekstruusiosuuttimien materiaalin käyttö	25
5.3 Simulointi	25

6 TYÖOHJEIDEN LAATIMINEN	28
6.1 3D-tulostuksen työohjeet	28
6.2 Suunnittelun työohje	28
7 YHTEENVETO	30
LÄHTEET	32

SANASTO

3D	kolmiulotteinen grafiikka, joka on mallinnettu kolmen tilaulottuvuuden suhteen
CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (computer-aided design), jota käytetään muun muassa 3D-mallien suunnitteluun
modulaarinen	asia, jota voi muokata poistamalla tai lisäämällä siihen moduuleita
sintraus	materiaalista tehdään kiinteä kappale puristamalla tai kovalla lämmöllä, niin ettei materiaali sula
STL	tiedostomuoto, joka sisältää vain 3D-mallin geometriatiedot ja joka luodaan 3D-tulostusta varten
TPE-muovi	termoplastinen elastomeeri, joka on lämpömuovattava kumimainen kestopuovi

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty V.A.V. Group Oy:lle. V.A.V. Group Oy on perustettu vuonna 2005 lissä. Se on suomalainen kumituotteita valmistava yritys. Tuotteita ovat eri tarkoituksiin räätälöidyt silikoni- ja TPE-profiilit. Profiilit valmistetaan ekstruusiomenetelmällä joko silikonista tai TPE-muovista. (1.)

V.A.V. Group Oy hankki syksyllä 2017 uuden metallin 3D-tulostimen, minkä takia tämä opinnäytetyö käynnistettiin. 3D-tulostus mahdollistaa ekstruusiosuuttimien valmistuksen nopeammin aikaisemmin käytössä olleeseen kipinätyöstöön verrattuna. Lisäksi se helpottaa monimutkaisten suuttimien muotojen valmistusta. 3D-tulostus myös mahdollistaa muiden osien ja kappaleiden valmistamisen.

Opinnäytetyön päätavoitteena on suunnitella modulaarisia osia ekstruusiosuuttimiin. Osat halutaan modulaarisiksi, jotta niitä ei tarvitsisi aina suunnitella ja piirtää uudestaan. Modulaaristen osien on tarkoitus toimia pohjana, kun suunnitellaan uutta ekstruusiosuutinta. Osat suunnitellaan Inventor 3D CAD -ohjelmistolla. Suuttimet ja modulaariset osat tulostetaan 3D-tulostimella, jolloin myös tulostamiseen käytettävän materiaalin optimointi on osa opinnäytetyötä. Lisäksi opinnäytetyössä tehdään työohjeita 3D-tulostimen käytön eri vaiheisiin ja suuttimien suunnitteluun.

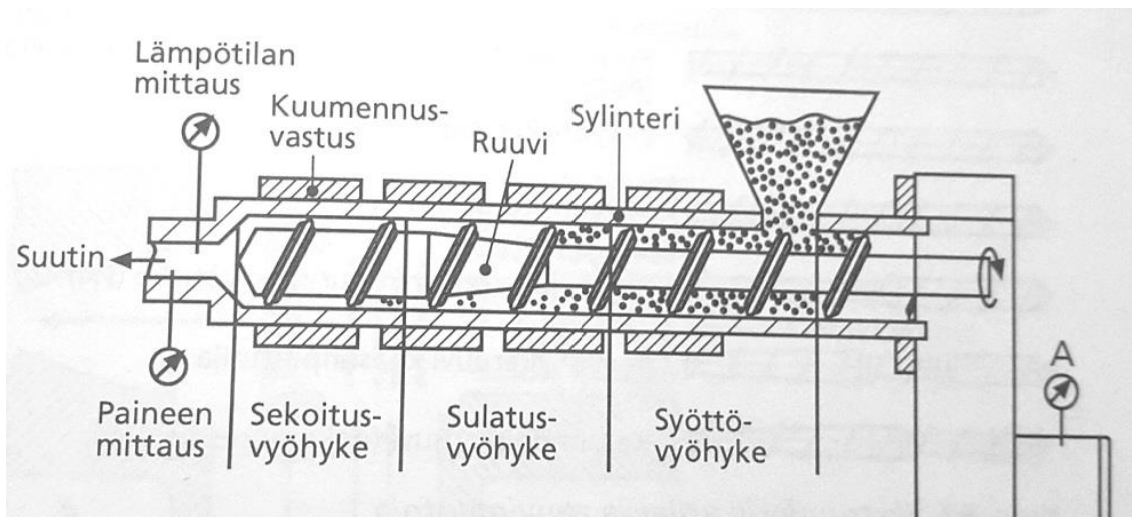
2 VALMISTUMENETELMÄT

Opinnäytetyöhön liittyy erilaisia valmistusmenetelmiä, joilla valmistetaan tiiviste-profiileja ja ekstruusiosuuttimia. V.A.V. Group Oy valmistaa tiiviste-profiilit ekstruusiomenetelmällä silikonista tai TPE-muovista. Tiiviste-profiileja on paljon erilaisia, joko yleismalleja tai erikoisempia asiakkaan tarpeeseen sopivia. Sen ta-kia ekstruusiosuuttimia tarvitaan paljon erilaisia. Yrityksessä ekstruusiosuuttimet valmistetaan lankakipinätyöstönä ja materiaalia lisäävällä menetelmä metallin 3D-tulostimella.

2.1 Ekstruusio

Ekstruusio eli suulakepuristus on massan pursottamista tietyn profiilin mukaisen suulakkeen läpi. Massana toimivat erilaiset muoviseokset, jotka sisältävät lisäai-neita ja väriaineita. Usein ekstruusio on osa isoa kokonaisuutta, jossa tuotteelle annetaan tarkka muoto ja lopulliset mitat. Ekstruusioilla voidaan valmistaa kal-voja, putkia, tankoja, köysiä ja kaapeleiden, kankaiden, paperien ja kartonkien päällysteitä. Kaikkia edellä mainittuja tuotteita yhdistää niiden valmistus, joka ta-pahtuu ekstruuderilla. (2, s. 98.)

Ekstruuderissa muoviraaka-aine ja mahdolliset lisäaineet sekoitetaan, sulatetaan ja syötetään suuttimelle. Ekstruuderin muodostuu sylinteristä, jonka sisällä pyörii muotoiltu kierukkaruuvi (kuva 1). Ruuvin tehtävänä on siirtää massa syöttösoppi-losta suuttimelle ja sulattaa se matkalla joko kitkalla tai sähkövastusten avulla. (2, s. 98 - 99.)



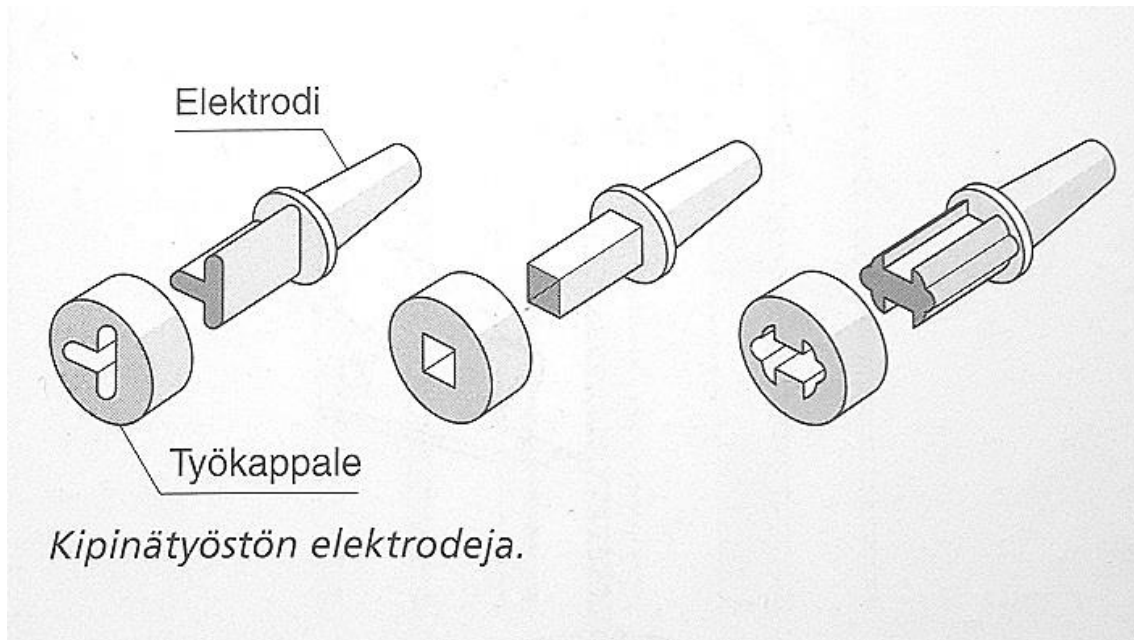
KUVA 1. Ekstruuderin rakenne (2, s. 99)

2.2 Suuttimien valmistus

Suuttimissa on paljon erikoisia muotoja, joita on vaikea tai mahdotonta valmistaa lastuavalla työstöllä. Kipinätyöstö on yleinen tapa valmistaa erikoisia kappaleita, kuten suuttimia. (3, s. 322.)

2.2.1 Kipinätyöstö

Kipinätyöstön periaate perustuu sähkövirtaan, joka johdetaan työkalusta eli elektrodista työkappaleeseen väliaineen läpi. Sähkövirta kulkee kipinäenä, joka irrottaa työkappaleesta pieniä ainesosia, jolloin työkalu tekee työstettävään kappaleeseen oman muotonsa (kuva 2). (3, s. 322.)



KUVA 2. Työkalu eli elektrodi (3, s. 322)

Työssä käytettävä väliaine on huuhteluneste, jonka tehtävänä on kuljettaa hiukaset pois. Neste ei saa suoraan johtaa sähköä, vaan sen pitää auttaa kipinän syntymistä. Kipinätyöstössä ei tapahdu varsinaista kosketusta työkalun ja työstettävän kappaleen välillä. Työkalun eli elektrodin ja työstettävän kappaleen välissä on niin sanottu kipinäväly, joka on muutamasta sadasosamillimetristä muutama kymmenesosamillimetriin. Työstö on myös hyvin hidasta, mutta sillä päästään noin 0,01 millimetrin tarkkuuteen. Kipinätyöstö voidaan jakaa seuraaviin menetelmiin: upotus, lävistys ja kaiverrus. Nämä menetelmät ovat niin sanottua upokipinätyöstöä, eli työstö tapahtuu upotettuna huuhtelunesteeseen. Lisäksi on vielä olemassa kipinätyöstöhionta ja lankakipinätyöstö. (3, s. 322.)

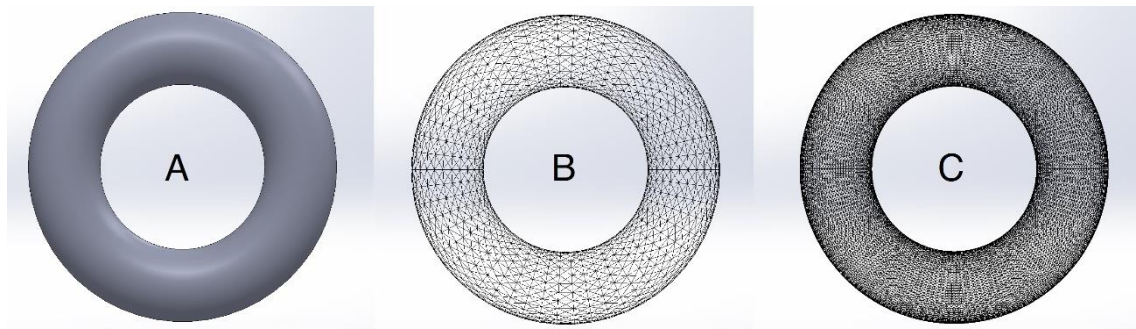
2.2.2 Lankakipinätyöstö

Lankakipinätyöstössä eli lankasahauksessa ei ole erillistä työkalua, vaan siinä käytetään ohutta lankaa, joka toimii elektrodina. Lanka liikkuu samalla periaatteella, kuin vannesahan terä. Tällä ehkäistään se, ettei lanka pääse kuumeneemaan liikaa. Lankasahauksella pystytään valmistamaan erittäin kapeita uria, koska syötön ohjaus tapahtuu numeerisesti, jolloin monimutkaiset muodot on mahdollista valmistaa. (3, s. 323.)

2.3 Materiaalia lisäävät menetelmät

Materiaalia lisäävä valmistus (additive manufacturing) on yleistynyt termi, jota käytetään, kun puhutaan nopeasta prototyyppien valmistuksesta (rapid prototyping). Puhekielessä sitä yleensä kutsutaan 3D-tulostamiseksi. (4, s. 1.)

Materiaalia lisäävät menetelmät perustuvat samaan prosessiin, jossa kappale rakennetaan tulostamalla kerros kerrokselta. Prosessia varten luodaan tulostettava kappaleesta 3D-malli jollain CAD-ohjelmalla. 3D-mallista tehdään STL-tiedosto, joka viipaloi 3D-mallin kaksiulotteisiksi kerroksiksi (kuva 3). Viipaleet sisältävät kunkin kerroksen geometrian, joiden perusteella kappale tulostetaan. (4, s. 4.)



KUVA 3. Kuvassa A on 3D-malli, B ja C ovat STL-tiedostoja eri tarkkuudella (5)

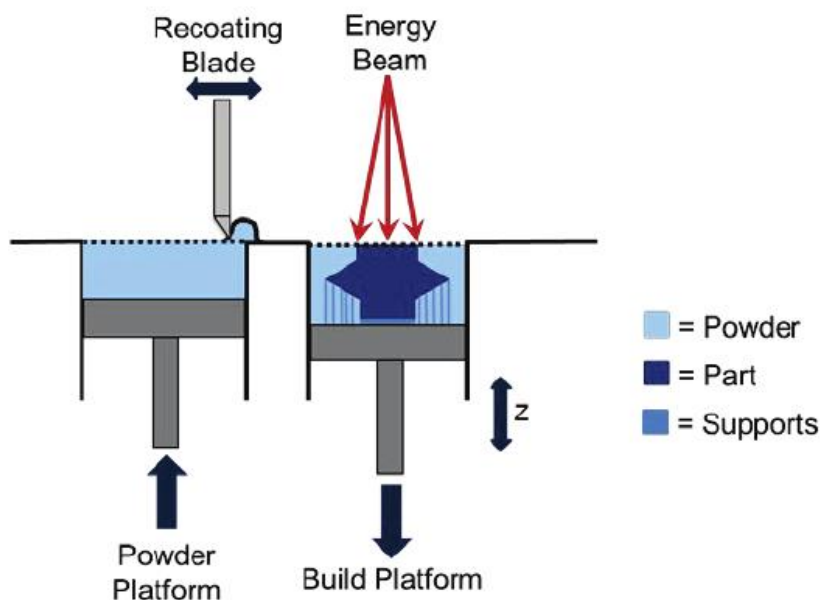
Materiaalia lisääviä menetelmiä käytetään paljon tuotekehityksessä ja prototyyppien valmistuksessa, koska tulostamalla saadaan nopeasti testattua, miten suunniteltu kappale tai tuote toimii käytännössä. Nykyään menetelmiä käytetään prototyyppien tekemisen lisäksi enemmän ja enemmän valmiin tuotteen valmistamiseen. Tämä on mahdollista, koska laitteet kehittyvät tarkemmiksi ja materiaalit paremmiksi. (4, s. 1 - 2.)

Standardin ISO/ASTM 52900:2015 mukaan materiaalia lisäävät menetelmät voidaan jaotella seitsemään eri ryhmään. Standardissa käsitellään menetelmien peruseräaatteet ja niiden erot sekä selitetään materiaalia lisäävään menetelmiin liittyvät termit. (6.)

Eri menetelmät ovat nimeltään seuraavia: sideaineen suihkutetus, pursotus, materiaalin suihkutetus, jauhepetisulatus, kerroslaminointi, valokovetus altaassa ja suorakerrostus (7, s. 8 - 10). Tässä teoriaosassa käsitellään edellä mainituista menetelmistä jauhepetisulatus, koska vain se liittyy tähän opinnäytetyöhön.

2.4 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus (Powder Bed Fusion) on tekniikka, jossa muovi- tai metallijauhetta sulatetaan tai sintrataan yhteen kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti kerros kerrokselta. Siinä (kuva 4) jauhetta levitetään rakennusalustalle jauheenlevittimellä (recoating blade). Sen jälkeen lasersäde sulattaa tai sintraa sen hetkisen kerroksen. Tämän jälkeen rakennusalusta (build platform) laskeutuu kerrospaksuuden verran alaspäin, joka on tavallisesti 0,02 - 0,05 millimetriä. Rakennusalustan laskun jälkeen levitetään uusi kerros jauhetta, joka sulatetaan tai sintrataan. Tätä työkiertoa toistetaan, kunnes kappale on rakennettu valmiiksi. Metallijauheesta tulostaessa tarvitaan tukirakenteet kappaleen tukemiseksi, koska jauhe ei tue kappaletta tarpeeksi. Muovijauheella ei tarvita tukirakenteita, koska silloin jauhe pystyy tukemaan tulostettavaa kappaletta. (7, s. 9.)



KUVA 4. Jauhepetisulatuksen kaaviokuva (8)

Metallista tulostaessa prosessi on hitaampi kuin esimerkiksi vastaavassa muovin tulostusprosessissa, koska metallijauhe vaatii enemmän energiaa materiaalin sulattamiseen. Tämän takia jokaisen kerroksen sulattamiseen menee enemmän aikaa, jotta saadaan tarpeeksi energiaa toimitettua metallijauheeseen. (4, s. 54.)

2.5 SLM-tekniikka

SLM (Selective Laser Melting) on jauhepetisulatustekniikka, jossa metallijauhe sulatetaan kokonaan lasersäteiden avulla. Näin tulostettujen kappaleiden materiaaliheys on erittäin korkea ja niistä tulee lujempia kuin esimerkiksi sintraamalla. Materiaaliksi soveltuvat vain tietyt metallit kuten ruostumaton teräs, työkaluteräs, titaani, alumiini ja kobolttikromi. (9.)

2.5.1 Tukirakenteet

Tulostettavalle kappaleelle joudutaan luomaan erilaisia tukirakenteita (kuva 5), kappaleen muodon mukaisesti. Tukien on tarkoitus tukea tulostettavan kappaleen niin sanottuja yliroikkuvia osia. Tukia lisätään myös tulostettavan kappaleen ja tulostusalustan väliin, jotta kappale saadaan irrotettua alustasta paremmin rikkomatta sitä. Tukirakenteet suunnitellaan yleensä ontoiksi tai kennomaisiksi, koska ne joudutaan hajottamaan kappaleen irrotuksessa. Tukirakenteet luokitellaan jätteeksi, koska ne kuluttavat materiaalia sekä aikaa valmistuksessa ja jälkiyöstössä. Siksi tulostettavat kappaleet on syytä suunnitella siten, että ne tarvitsevat mahdollisimman vähän tukirakenteita. (10, s. 1247 - 1248.)



KUVA 5. Tukirakenteita erilaisissa tulostetuissa kappaleissa (11)

Tukirakenteet toimivat myös jäähdyttiminä tulostettavalle kappaleelle, koska ne siirtävät hyvin lämpöä (12, s. 2). Jäähdytys onkin tärkeää, sillä tulostusprosessi vaatii paljon energiaa, koska materiaali pitää lämmittää sen sulamispisteeseen. Korkea lämpötilan nousu taas saattaa aiheuttaa tulostetuissa kappaleissa sisäisiä jännityksiä ja muodonmuutoksia. (9.)

2.5.2 Suojakaasu

Tärkeä osa SLM-prosessia on suojakaasun käyttö. Suojakaasun tehtävänä on luoda oikeanlainen ympäristö tulostuskammioon tulostusprossin ajaksi, jotta prosessin aikana ei tapahdu mitään ylimääräistä kemiallista reaktiota. Suojakaasun avulla saavutetaan myös parempi pinnanlaatu tulostettavissa kappaleissa, koska kaasu poistaa erilaisia jauhejäämiä, jotka höyrystyvät kappaleen pinnalle sulatuksessa. (13, s. 356.)

Suojakaasuna tulostuksessa käytetään argon- tai typpikaasua. Ne syrjäyttävät hapen suljetussa tilassa ja luovat inertin ympäristön tulostuskammioon. Argon- ja typpikaasua käytetään usein myös muissakin metalleihin liittyvissä työstömenetelmissä, jotka vaativat suojakaasun käyttöä, esimerkiksi hitsauksessa. (14.)

3 LÄHTÖTILANNE

Opinnäytetyötä tehdessä oli tärkeää ymmärtää, miten ekstruusiosuuttimet ja niiden osat on valmistettu ja mikä on osien tarkoitus. Lisäksi pitää ymmärtää 3D-tulostimen toiminta ja tulostukseen liittyvät työvaiheet, jotta pystytään suunnittelemaan modulaarisia osia. Työvaiheet on käyty läpi yrityksen työntekijän kanssa, jotta niissä ei ole asiavirheitä tai väärää tietoa.

3.1 Aiemmat menetelmät suuttimien valmistukseen

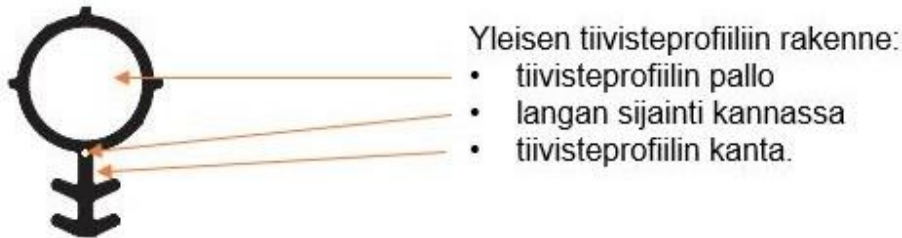
Ekstruusiosuuttimet valmistetaan lankakipinätyöstöllä. Lankasahalla leikataan metallikiekkoon halutunlainen reikä, joka vastaa valmistettavan tiivisteprofiilin poikkileikkausta. Lankasaha toimii NC-ohjelmalla, joka tehdään Mastercam-ohjelmistolla.

Ekstruusiosuutin vaatii toimiakseen oikeanlaiset päästöt suuttimen massansyötöpuolelle. Päästöt joudutaan tekemään käsin hiomalla sekä taltalla lyömällä. Tämä onkin suuttimien vaikein valmistuksen vaikein osa, koska jos päästöistä tulee liian isot, on mahdollista, että koko suutin menee pilalle. Päästöjen tekeminen oikeaan arvoon saattaa viedä paljon aikaa, koska joudutaan tekemään aina koeajo muokkausten jälkeen ja ennen muokkausta suutin pitää puhdistaa massasta. Koeajoja saatetaan joutua tekemään useampia, ennen kuin päästöt saadaan kohdalleen. Päästöjen tekeminen vaatiikin paljon käytännön kokemusta.

3.2 Suuttimien osat

Ekstruusiosuuttimiin tulee osia tiivisteprofiilin mukaan eli kaikkia osia ei tule jokaiseen suuttimeen. Suuttimissa käytettävät osat ovat: lankaneula, tukirakenne ja talkkiputki. Lankaneula on osa, jota pitkin tiivisteprofiilin kantaan syötetään lanka. Langan tehtävänä on estää tiivisteprofiilia venymästä. Tukirakenteen tai talkkiputken tehtävänä on olla tuki, jonka avulla tiivisteeseen sisään syötetään ilmaa. Näistä vain toinen tulee kerrallaan kiinni suuttimeen. Tukirakenteeseen tai talkkiputkeen kiinnitetään myös suuttimen luoti. Luodin on tarkoitus tehdä tiivisteeseen sisäpuolelle ontelo eli niin sanottu tiivisteeseen pallo, johon kulkee ilma. Luoti on pie-

nempi kuin tiivisteprofiilin reikä suuttimessa. Talkkiputken kautta kulkee talkkilanka profiilin sisään. Talkkilangan tarkoituksena on kuljettaa tiivisteprofiilin sisään talkkia ja näin estää tiivisteeseen pallon sisäseiniä tarttumasta yhteen. Osien merkitys on havainnollistettu kuvassa 6.



KUVA 6. Poikkileikkaus yleisestä tiivisteprofiilista

Osat valmistetaan tarpeen mukaan metalliputkesta tai -palkista. Suuttimiin osat kiinnitetään joko juottamalla hopealla tai ruuviliitoksella. Tukirakenteeseen tai talkkiputken tuleva luoti myös juotetaan kiinni. Osia joudutaan vaihtamaan suuttimiin erilaisten vikojen vuoksi, kuten kulumisen tai taipumisen takia.

3.3 Uudet menetelmät suuttimien valmistukseen

Ekstruusiosuuttimet ja suuttimen osat suunnitellaan edelleen Inventor 3D CAD -ohjelmistolla. Suuttimissa käytetään apuna tiivisteprofiilista tehtyä 3D-mallia. Suuttimien päästöt voidaan myös suunnitella Inventorilla ja tulostaa suoraan suuttimen pintaan. Suunnittelun jälkeen 3D-mallista ja tarvittavista osista tehdään STL-tiedostot. STL-tiedostot avataan Materialise Magics -ohjelmalla, jolla luodaan tulostimelle oma tiedosto. Ohjelmalla tulostettavat osat asetellaan oikeinpäin tulostusalustalle sekä niille lisätään tarvittavat tukirakenteet.

Materialise Magics on teollisuuteen luotu monipuolinen STL-tiedostojen käsittelyohjelma. Ohjelmalla pystyy myös jälkikäsittelemään 3D-mallia, kuten poistamaan tai lisäämään erilaisia muotoja kappaleeseen. (15.)

3.4 SLM 125 HL -tulostin

Yritykseen hankittiin syksyllä 2017 SLM 125 HL -metallin 3D-tulostin (kuva 7). Tulostimen on valmistanut saksalainen SLM Solutions Group AG.



KUVA 7. SLM 125 HL -metallin 3D-tulostin yrityksessä

3D-tulostin hankittiin helpottamaan ekstruusiosuuttimien valmistusta. Tulostin käyttää jauhepetisulatus tekniikoista SLM-tekniikkaa. Tulostimen käytöstä järjestettiin kattava koulutus valmistajan toimesta. Koulutus pidettiin syksyllä 2017 yrityksessä, samalla kun tulostin saapui yritykseen ja se asennettiin käyttövalmiiksi. Hankittu 3D-tulostin on valmistajan tuotevalikoiman pienin. SLM 125 HL riittää yrityksen tarpeisiin mainiosti, koska suuttimet, joita sillä pääasiassa tulostetaan ovat kokoluokaltaan noin 40 - 80 mm.

Muita valmistajan 3D-tulostimia ovat SLM 280 ja SLM 500, joissa on isompi rakennustilavuus ja useampi lasersäde. Ne ovat nopeampia ja niillä pystyy rakentamaan isompia kappaleita, kuin SLM 125 HL. (16, linkit Products -> Machines.)

3.4.1 Tekniset tiedot

Taulukossa 1 on lueteltu 3D-tulostimen tekniset tiedot sekä tärkeimmät ominaisuudet, kuten käytettävät materiaalit. Tarkempaa tietoa 3D-tulostimesta ja sen ominaisuuksista on saatavissa valmistajan Internet-sivulta (16).

TAULUKKO 1. 3D-tulostimen tekniset tiedot ja ominaisuudet (17)

Rakennustilavuus	125 x 125 x 125 mm ³
Laser	400 W IPG kuitulaser (1kpl)
Rakennusnopeus	25 cm ³ /h
Materiaalin kerrospaksuus	20 - 75 µm
Tulostusmateriaalit	ruostumaton teräs, työkaluteräs, kobolttikromi, nikkeli-seos, alumiini, titaani

Yrityksessä tulostusmateriaalina käytetään 316L-metallijauhetta. Metallijauhe on korroosion kestävä ruostumatonta terästä. Metallijauheen valmistaa sekä toimittaa 3D-tulostimen valmistaja, SLM Solutions Group AG. (18.)

3.4.2 Lisälaitteet

3D-tulostin vaatii toimiakseen erillisen jäähdytysyksikön, koska tulostusprosessin aikana syntyy paljon lämpöä. Eniten lämpöä tuottavat laser ja erilaiset optiset osat. Jäähdytysyksikkö kierrättää vettä tulostimen sisällä eri osissa jäähdyttäen niitä tulostusprosessin aikana. (19.)

Tulostettujen kappaleiden ja tulostuskammion puhdistusta varten on olemassa erillinen imuri (kuva 8). Imuri on teollisuuteen tarkoitettu märkäimuri, jolla on Ex-luokitus. Ex-luokitus tarkoittaa imurissa sitä, että sillä saa imuroida materiaalia, joka saattaa räjähtää. Imurilla on tarkoitus poistaa metallijauhe, joka jää jäljelle, kun tulostettu kappale on poistettu ja suurin osa ylimääräisestä jauheesta on jo pyyhitty tulostuskammion putkia pitkin ylijäämäpulloihin. (20.)



KUVA 8. Yrityksessä oleva teollisuusimuri AMC 330

Ylijäämäpullot tyhjennetään erilliseen siivöintiyksikössä olevaan jauhepulloon. Siivöintiyksikössä metallijauhe kulkee suodattimen läpi, joka poistaa jauheesta epäpuhtaudet. Puhdistettu metallijauhe voidaan näin käyttää uudestaan tulostuksessa. (19.)

4 MODULAARISTEN OSIEN SUUNNITTELU

Työssä suunniteltiin modulaarisia osia ekstruusiosuuttimiin käyttäen Inventor 3D CAD -mallinnusohjelmaa. Modulaaristen osien on tarkoitus toimia suoraan valmiina osana tai pohjana, kun suunnitellaan uutta ekstruusiosuutinta. Muuttamalla osien mittoja tai tekemällä osiin muutoksia saadaan nopeasti suunniteltua suuttimen osat, eikä niitä tarvitse aina piirtää ja suunnitella uudelleen. Modulaarisiksi haluttavat osat ovat lankaneula, tukirakenne ja talkkiputki. Suunnitelluista osista ei esitellä malleja tai yksityiskohtaisia kuvia yrityksen pyynnöstä.

4.1 Osien suunnittelu Inventorilla

Osien suunnittelussa pohjana käytettiin vanhoja käytössä olevia osia sekä jo tulostettuja osia. Aikaisemmin tulostetut osat oli teetetty alihankintana ennen kuin yritykseen hankittiin oma 3D-tulostin. Olemassa olevista osista otettiin mittoja, kuten reikien sijainteja suuttimen pinnassa. Mittojen oli tärkeää olla samoja kuin vanhoissa osissa, koska uusien osien tulisi myös tarvittaessa sopia vanhoihin suuttimiin.

Modulaaristen osien suunnittelussa piti ottaa huomioon tulostusasento, missä tullaan tulostamaan, sekä osien muoto ja niiden vaatimat tukirakenteet. Osien piti olla sellaisia, että tukirakenteiden poisto ja muu jälkityöstö ei vahingoita kappalegeometriaa, koska esimerkiksi lankaneulassa on ohut putki, joka voi taipua tai siihen voi tulla halkeamia.

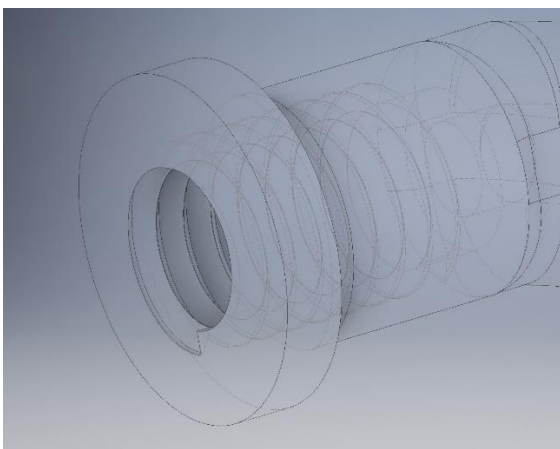
Suunnittelu eteni pääasiassa prototyyppien kautta. Ensimmäisillä versioilla testattiin, miten osat tulostuvat ja miten paljon ne vaativat tukirakenteita. Testikappaleita tulostettiin erilaisissa asennoissa. Erilaisilla tulostusvaihtoehdoilla selvitettiin, mikä asento vaatii vähiten jälkityöstöä ja miten osiin saadaan paras pinnanlaatu tärkeille pinnoille. Tärkeitä pintoja osissa ovat liitospinnat, jotka vastaavat suuttimen pintaan. Näiden pintojen tulisi olla tasaisia ja tiiviitä, jotta ekstruusiossa materiaali ei pääse vuotamaan liitospintojen kohdalta.

4.2 Osien kiinnitys suuttimiin

Osien kiinnitys suuttimiin oli tärkeä osa suunnittelua, koska osien kiinnitystä suuttimiin haluttiin parantaa ja helpottaa. Aiemmin osat kiinnitettiin juottamalla ja ruuviliitoksilla. Juottamisesta haluttiin eroon, koska osien kiinnittäminen on vaikeaa ja aikaa vievää, sillä osat pitää mitoittaa käsin suuttimen pintaan. Jos osa pitää vaihtaa suuttimesta, se täytyy lämmittää, jotta se saadaan irti. Tämä saattaa olla työlästä, koska osan irrottaminen voi myös rikkoa sen, jolloin joudutaan valmistamaan tilalle uusi.

Tulostamalla modulaariset osat saadaan aina samanlaisiksi ja ne sopivat suuttimeen ilman ylimääräisiä mittauksia. Osien kiinnitys suuttimiin toi omat haasteensa, koska osat piti saada helposti kiinni ja irti suuttimesta. Aluksi kiinnitykseen suunniteltiin erilaisia lukitusrenkaita tai kiilatappeja, joilla osat olisi saanut nopeasti kiinni ja irti suuttimesta. Kumpikaan ei toiminut halutulla tavalla, koska ne eivät pitäneet osaa tarpeeksi tiukasti kiinni suuttimen pinnassa. Osien ja suuttimen väliin jäi pieni välys, josta materiaali pääsee vuotamaan ekstruusiossa. Sen takia päädyttiin käyttämään ruuviliitosta kaikissa osissa.

Ruuviliitos on toimiva tapa, mutta koska tulostettavat osat ovat pieniä ja niissä on todella pienet kierteet, tulostus oli hieman hankalampaa. Kierteitä ei pystynyt tekemään suoraan Inventorissa olevalla komennolla, koska 3D-mallissa olevat kierteet eivät tule mallin geometriaan mukaan, kun se muutetaan STL-tiedostoksi. Kierteet täytyi mallintaa erikseen 3D-malliin (kuva 9).



KUVA 9. Inventorilla piirretyt kierteet

Sen lisäksi, että kierteet täytyi mallintaa itse, niitä pitää myös jonkin verran puhdistaa tai avata tulostuksen jälkeen, jotta ne toimivat oikein. Tämä tuo hieman ylimääräistä työtä jälkityöstöön.

4.3 Osien testaus

Modulaaristen osien prototyyppien toimivuutta testattiin tuotannossa. Osien toimivuudesta saatiin palautetta ja osiin tehtiin muutoksia saadun palautteen perusteella. Toimivat versiot jäivät tuotantoon, vaikka osista tehtiinkin kokonaan uusia versioita, joissa esimerkiksi kiinnitys on erilainen ja parempi. Näin tehtiin koska, osia testattiin uusiin suuttimiin, joita tarvittiin tuotantoon, eikä niihin ollut aikaa tehdä muutoksia sillä hetkellä. Prototyyppien perusteella saatiin tuotantokäyttöön soveltuvat versiot osista. Osien 3D-mallit helpottavat suunnittelua ja niistä on helppo muokata tarvittavat osat tiivisteprofiilin valmistukseen.

5 MATERIAALIN OPTIMOINTI

Tulostettaviin suuttimien modulaarisiin osiin ja ekstruusiosuuttimiin käytettävän materiaalin optimointi on tärkeää, jotta materiaalia kuluisi mahdollisimman vähän, jolloin säästetään materiaalikustannuksissa. Lisäksi tulostettaviin kappaleisiin tarvittava materiaalin määrä vaikuttaa tulostusaikaan.

5.1 Modulaaristen osien materiaalin käyttö

Modulaarisista osista tulostettujen prototyyppien perusteella pohdittiin, mistä materiaalia voidaan vähentää ja paljonko osissa tarvitsee käyttää tukirakenteita. Osien kestävydestä todettiin, että ohuetkin osat kestävät ekstruusiossa syntyvän paineen, sillä paine ei kohdistu osiin niin voimakkaasti, jos osat on suunniteltu virtausvastuksen kannalta edullisesti. 3D-tulostus mahdollistaakin osien suunnittelun niin, että virtaus olisi paras mahdollinen.

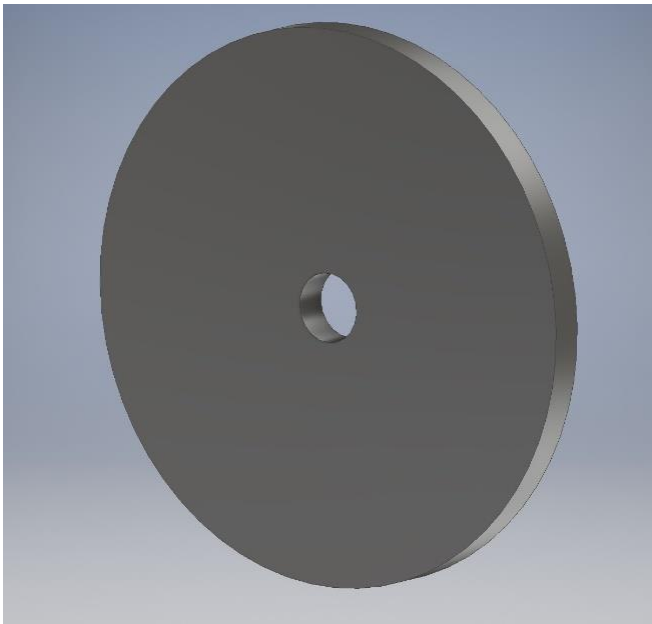
5.2 Ekstruusiosuuttimien materiaalin käyttö

Ekstruusiosuuttimissa materiaalin optimointi on paljon tärkeämpää, koska niihin kuluu materiaalia kaikista eniten. Suuttimet ovat yleensä 80 mm halkaisijaltaan ja vahvuudeltaan 4 - 5 mm. Suuttimien materiaalin optimoinnissa haasteena oli paine, joka kohdistuu niihin ekstruusion aikana. Paine vaihtelee valmistettavan tiivisteprofiilin mukaan, mutta yleensä se on 100 - 200 bar. Tämän takia suutin ei saa olla liian ohut, jotta se kestää siihen kohdistuvan paineen eikä pullistu.

5.3 Simulointi

Materiaalin optimoinnissa ekstruusiosuuttimia ei tulostettu, materiaali hukana, vaan apuna käytettiin Inventorista löytyvää simulointitoimintoa, Stress Analysis. Simuloinnilla pyrittiin saamaan tietoa, paljonko suutin tarvitsee materiaalia, jotta se kestää siihen kohdistuvan paineen. Simulointia varten Inventoriin luotiin uusi materiaali 3D-tulostuksessa käytettävän metallijauheen arvoilla, jotta simuloinnin tulokset olisivat mahdollisimman oikeat. Metallijauheen 316L materiaaliominaisuudet löytyvät valmistajan Internet-sivulta (18).

Simulointia varten myös mallinnettiin yksinkertainen testisuutin (kuva 10). Testisuutin tarvittiin, koska tuotannossa on paljon erilaisia suuttimia, jotka eroavat toisistaan niin paljon, että niitä on vaikea vertailla keskenään. Testisuuttimelle myös mallinnettiin kiinnikeholkki, jolla suutin tulee kiinni ekstruuderiin. Kiinnikeholkkiin kohdistuu myös paine ekstruusiossa, mutta sillä ei ole simuloinnin kannalta merkitystä. Kiinnikeholkin on tarkoitus toimia vain tukipisteenä suuttimelle simulaatiossa. Testisuutin ei vastaa tuotannossa käytössä olevia suuttimia, sillä siinä on vain 10 mm reikä keskellä.



KUVA 10. Simuloinnissa käytetty testisuutin

Testisuuttimien materiaalin käyttöä pyrittiin optimoimaan muuttamalla materiaalivahvuutta välillä 2 - 5 mm. Testisuuttimeen kohdistuvaa painetta, simuloitiin arvoilla 100 - 200 bar. Aluksi testisuutinta simuloitiin ilman minkäänlaisia muutoksia ulkoisiin muotoihin. Sen jälkeen testisuuttimeen mallinnettiin erilaisia muutoksia kuten kevennyksiä, viisteitä ja tukiripoja, joilla pyrittiin vähentämään materiaalin määrää suuttimessa. Niissä piti myös ottaa huomioon suuttimien mahdollinen 3D-tulostus, sillä muutoksissa ei saisi olla liian vaikeita muotoja, jotta niihin ei tarvitsisi lisätä ylimääräisiä tukirakenteita. Muutoksilla saatiin erilaisia tuloksia paineen jakautumisesta ja materiaalin käyttäytymisestä paineen alla kuin ilman muutoksia tehdyillä simuloinneilla.

Simuloinnista saatuja tuloksia verrattiin keskenään. Tuloksista saatiin tietoa, paljonko suuttimeen tarvitsee käyttää materiaalia, jotta se kestää siihen kohdistuvan paineen. Tuloksia ei kuitenkaan suoraan pysty vertaamaan tuotannossa oleviin suuttimiin, koska ne eroavat geometrialtaan niin paljon testigeometriasta. Tulokset kuitenkin antavat suuntaa, kuinka paljon suutin mahdollisesti tarvitsee materiaalia ja mihin kohtiin suurin paine kohdistuu suuttimessa. Lisäksi tuloksista voidaan päätellä, mistä kohtaa suutinta voidaan tai kannattaa keventää.

6 TYÖOHJEIDEN LAATIMINEN

Työohjeita ei ollut vielä olemassa 3D-tulostukseen, koska tekniikka on vielä uusi yrityksessä. Tämän vuoksi ohjeet laadittiin tulostuksen eri vaiheisiin. Suuttimien suunnitteluun on olemassa jo työohje, mutta 3D-tulostus toi työvaiheisiin uusia vaiheita ja menetelmiä. Sen vuoksi suuttimien suunnittelulle laadittiin uusi työohje. Työohjeiden tarkoitus on toimia muistilistana ja apuna uusille työntekijöille, joilla on tarvittavat perustiedot 3D-tulostukseen ja suunnitteluohjelmien käyttöön. Työohjeet tehtiin pääasiassa omien kokemusten ja tietämyksen pohjalta. Apuna työohjeiden laatimisessa käytettiin jo olemassa olevia yrityksen työohjeita ja 3D-tulostimeen käyttöohjeita.

6.1 3D-tulostuksen työohjeet

3D-tulostuksen työohjeet on laadittu Microsoftin Powerpoint-ohjelmalla. Ohjeet laadittiin itse opittujen ja koettujen asioiden perusteella sekä 3D-tulostimesta pidetyn koulutuksen perusteella. Lisäksi apuna käytettiin 3D-tulostimen valmistajan käyttöohjeita, joista löytyvät kattavat ohjeet tulostimen käyttöön. Työohjeiden on tarkoitus olla apuna ja muistilistana eri vaiheille. Silloin oletetaan, että työntekijä on perehtynyt 3D-tulostimen käyttöön ja hänellä tietämys sen toiminnasta ja työvaiheista. Työohjeissa on lyhyesti esitetty työn eri vaiheet valokuvan ja listattujen työvaiheiden avulla. Työohjeet laadittiin seuraaviin vaiheisiin: jauheenlevittimen kohdistukseen, siivilöintikoneen käyttöön, uuden jauhepullon asennukseen ja ylijäämäpullojen tyhjennykseen.

6.2 Suunnittelun työohje

Suunnittelun työohje on laadittu Microsoftin Word-ohjelmalla. Työohjeet ovat tarkemmat kuin 3D-tulostukseen laaditut, sillä työohjeessa selostetaan vaihe vaiheelta, miten uusi suutin suunnitellaan mahdollisimman helposti. Siinä ei opasteta suunnitteluohjelman Inventor ja STL-tiedostojen hallintaohjelman Materialize Magcis käyttöä, koska oletetaan, että työntekijä hallitsee ohjelmien käytön. Työohjeissa selostetaan, miten modulaarisia osia tulisi käyttää apuna suunnittelussa ja miten niitä kannattaa muokata. Lisäksi siinä selostetaan tarkasti, miten ja minne suunnittelussa syntyvät tiedostot tulee tallentaa. Tiedostot tulee tallentaa

oikeassa muodossa, jotta ne toimivat oikein eri ohjelmissa ja 3D-tulostimessa. Tiedostojen on myös tärkeää olla oikeissa kansiossa löydettävyyden kannalta, mikäli niitä tarvitsee muokata tai käyttää mallina uusille suuttimille tulevaisuudessa. Tallennusta varten yrityksen verkkolevyille luotiin kansiorakenne. Kansioihin on tarkoitus tallentaa kaikki suunnittelussa syntyvät dokumentit. Myös modulaaristen osien 3D-mallit löytyvät kansioista.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä suunniteltiin modulaarisia osia ekstruusiosuuttimiin. Osat haluttiin modulaarisiksi, koska aikaisemmin ne on valmistettu jokaiselle suuttimelle erikseen ja tarpeeseen, mikä on ollut turhan työlästä ja hankalaa. V.A.V. Group Oy hankki syksyllä 2017 metallin 3D-tulostimen ekstruusiosuuttimien valmistukseen. Se mahdollistaa suuttimien valmistuksen lisäksi modulaaristen osien yhteisen valmistuksen. Tulostuksessa käytettävän materiaalin optimointi oli myös tärkeä osa opinnäytetyötä. Työssä myös laadittiin työohjeita 3D-tulostuksen eri vaiheisiin ja uuden suuttimen suunnitteluun.

Modulaariset osat suunniteltiin Inventor 3D CAD -ohjelmistolla. Osista saatiin tuotantoon mekaanisesti toimivat versiot. Osien 3D-malleja on helppo käyttää pohjana, kun suunnitellaan uutta ekstruusiosuutinta. Muuttamalla osista mittoja ja lisäämällä niihin tarvittavat muodot tiivisteprofiilin valmistamiseksi saadaan nopeasti suunniteltua uusi suutin. Silloin suunnitteluun ei tarvitse käyttää niin paljon aikaa.

Materiaalin käytön optimoinnissa keskityttiin enemmän ekstruusiosuuttimiin kuin modulaarisiin osiin, koska suuttimissa materiaalia kuluu huomattavasti enemmän. Modulaarisista osista muotoiltiin virtausvastuksen kannalta edullisia, koska ekstruusiomassan virtaus on tärkeämpää kuin materiaalin määrä osissa. Suuttimien materiaalin käyttöä pyrittiin optimoimaan erilaisten simulaatioiden avulla, joissa simuloitiin testisuutinta eri materiaalivahvuuksilla. Testisuuttimeen tehtiin myös erilaisia muutoksia kuten kevennyksiä, viisteitä ja tukiripoja. Näillä pyrittiin vähentämään käytettävän materiaalin määrää suuttimessa. Simuloinnista saatiin tietoa, kuten miten paine vaikuttaa suuttimeen, kun materiaalia on vähemmän. Lisäksi simuloinnilla saatiin tietoa, miten paine jakaantuu, kun suuttimeen tehdään kevennyksiä ja viisteitä tai lisätään tukirimoja.

Työn aikana laaditut työohjeet tulevat käyttöön ja ovat osa perehdytystä uusille työntekijöille, joiden työ liittyy 3D-tulostukseen ja suuttimien suunnitteluun. 3D-tulostuksen eri vaiheisiin laaditut työohjeet toimivat eräänlaisina muistilistoina,

joista on helppo tarkistaa työvaiheet. Työvaiheet on esitetty yksinkertaisesti kuvan ja luettelon avulla. Suuttimien suunnitteluun laadittu työohje on tarkempi kuin 3D-tulostukseen laaditut. Siinä selostetaan vaihe vaiheelta, miten suutin tulee suunnitella ja miten modulaarisia osia hyödynnetään. Lisäksi siinä selostetaan, miten suunnittelussa syntyvät tiedostot tulee tallentaa yrityksen verkkoasemalle. Tätä varten verkkoasemalle tehtiin kansiorakenne, jonne tiedostot tallennetaan ja josta modulaaristen osien 3D-mallit löytyvät helposti.

Työssä saavutettiin sen alussa asetetut tavoitteet, niiden perusteella myös syntyi uusia kehityskohteita tulevaisuuteen. Mahdollisia kehityskohteita tulevaisuudessa ovat materiaalin käyttö suuttimissa ja modulaarisissa osissa. Modulaaristen osien ulkomuotoja pystyy myös parantamaan, mikä voi vaikuttaa materiaalin virtaukseen ekstruusiossa. Tulostettavien kappaleiden jälkityöstöön käytettävää aikaa voidaan lyhentää muuttamalla kappaleiden muotoja siten, että ne tarvitsevat mahdollisimman vähän tukirakenteita.

Saadut tulokset ovat hyvä pohja 3D-tulostuksen kehittämiseen yrityksessä. Ekstruusiosuuttimien valmistus onkin kehittynyt paljon 3D-tulostuksen takia, koska nyt suuttimista ja suuttimien osista saadaan valmistettua aina samanlaisia koneellisesti. Lisäksi osien liittäminen suuttimiin on helpottunut huomattavasti, koska juottamisesta on päästy kokonaan eroon. Tulostamalla voidaan myös valmistaa useita suuttimia ja osia kerralla, mikä taas nopeuttaa valmistusprosessia.

LÄHTEET

1. V.A.V Group Oy. Saatavissa: <http://www.vav-group.com/>. Hakupäivä 28.2.2018
2. Kurri, Veijo – Malén, Timo – Sandell, Timo – Virtanen, Matti 1999. Muovitekniikan perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.
3. Maaranen, Keijo 2004. Koneistustekniikat. Porvoo: WS Bookwell.
4. Gibson, Ian – Rosen, David – Stucker, David 2015. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition. New York: Springer Science.
5. Keane, Philip 2016. What is Design for Additive Manufacturing. Engineers rule. Technology for Design and Engineering. Saatavissa: <https://www.engineersrule.com/design-additive-manufacturing/>. Hakupäivä 20.1.2018.
6. EN ISO/ASTM 52900. 2015. Additive manufacturing. General principles. Terminology. Sveitsi: Kansainvälinen standardisoimisliitto ISO.
7. Chekurov, Sergei – Eklund, Pentti – Kujanpää, Veli – Pekkarinen, Joonas – Syrjälä, Kai – Vihinen, Jorma 2017. 3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksentekopas yrityksille. Dimecc Publications Series No. 12. Tampere: Grano Oy. Saatavissa: https://teknologiainfo.net/sites/teknologiainfo.net/files/download/DIMECC_3D_tulostuksen_suunnittelu_ja_paatoksenteko_opas_yrityksille.pdf. Hakupäivä 10.1.2018.
8. Lane, Brandon – Moylan, Shaw – Slotwinski, John – Whinton, Eric 2014. Infrared Thermography for Laser-Based Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Processes. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/261017818_Infrared_Thermography_for_Laser-Based_Powder_Bed_Fusion_Additive_Manufacturing_Processes. Hakupäivä 31.1.2018

9. Castells, Ryan 2016. DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing. Element Materials Technology. Saatavissa: <https://www.element.com/nu-cleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>. Hakupäivä 31.1.2018.
10. Starno, G. – Hao, L. – Everson, R. – Evans, K. 2012. A new approach to the design and optimization of support structures in additive manufacturing. Teoksessa International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 66 Issue 9 – 12. Lontoo: Springer-Verlag London Limited 2012. S. 1247 – 1254. Saatavissa: <http://web.b.ebscohost.com.ezp.oamk.fi:2048/ehost/detail/detail?vid=3&sid=b9e14987-e52a-45c7-968e-c4a2830e9b58%40pdc-v-sessmgr01&bdata=JnN-pdGU9ZWVhvc3QtbGl2ZQ%3d%3d#db=afh&AN=87785772> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 31.1.2018.
11. How does it work? The basics explained of SLM. 2015. Croft Additive Manufacturing Unit T1. Saatavissa: <http://www.croftam.co.uk/how-does-it-work/>. Hakupäivä 10.2.2018.
12. Cloots, Michael, – Spierings, Adrian B. – Wegener, Konrad 2013. Assessing New Support Minimizing Strategies for the Additive Manufacturing Technology SLM. Austin: International Solid Freeform Fabrication Symposium -konferenssi. Saatavissa: https://www.icvr.ethz.ch/ConfiguratorJM/publications/Assessing__137896928667863/austin.pdf. Hakupäivä 31.1.2018.
13. Ferrar, B. – Mullen, L. – Jones, E. – Stamp, R. – Sutcliffe, C.J. 2012. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. Teoksessa Journal of Material Processing Technology. 2015. Vol. 212 Issue 2. Amsterdam: Elsevier. S 355 - 364. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.ezp.oamk.fi:2047/science/article/pii/S0924013611002792#!> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 10.2.2018.
14. Halteman, TE. 2015. Industrial Gases Key to Metal Additive Manufacturing -- Air Products Launches Website to Guide Industry. Saatavissa:

<https://3dprint.com/55526/industrial-gases-am-process/>.

Hakupäivä

10.2.2018.

15. Materialize Magcis Product Information. Leuven: Materialise. Saatavissa: <http://www.materialise.com/en/software/magcis/product-information>.

Hakupäivä 5.2.2018.

16. SLM Solutions Group AG. Saatavissa: <https://slm-solutions.com/products/machines>. Hakupäivä 29.1.2018.

17. SLM 125 Selective Laser Melting Machine. Lübeck: SLM Solutions Group AG. Saatavissa: https://slm-solutions.com/sites/default/files/downloads/131en171015-01-002-slm125_web.pdf. Hakupäivä 29.1.2018.

18. 3D Metals Discovery the variety of Metal Powders. Lübeck: SLM Solutions Group AG. Saatavissa: https://slm-solutions.com/sites/default/files/downloads/201en171023-01-001-powder_web.pdf. Hakupäivä 12.2.2018.

19. Selective Laser Melting -laite SLM 125 HL. 2015. Käyttöohje. SLM Solutions Group AG.

20. EVO-teollisuusimuri AMC 330. 2017. Käyttöohje. EVO-PRODUCTS.