



**WAAM-MENETELMÄN HYÖDYNTÄMINEN SELLUTEOLLISUUDEN
PESULAITTEISIIN**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2023

Sam Sinkkonen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko

TkT Sakari Penttilä

Ohjaaja: DI Jarkko Hytönen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Sam Sinkkonen

WAAM-menetelmän hyödyntäminen selluteollisuuden pesulaitteisiin

Konetekniikan diplomityö

2023

89 sivua, 35 kuvaa, 7 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko, TkT Sakari Penttilä

Avainsanat: WAAM, Suorakerrostus, Lisäävä Valmistus, Komponentin Valinta, Selluteollisuus, Pesulaitteet

Diplomityön tavoitteena on ollut löytää soveltuvimmat ja potentiaalisimmat komponentit WAAM-valmistukseen valittujen selluteollisuuden pesulaitteiden komponenttien joukosta. Valinta suoritettiin luomalla kolmivaiheinen karsintamenetelmä, jonka avulla komponentit valittiin suunniteltavaksi WAAM-valmistukseen. Tämän jälkeen komponentteja vertailtiin valituilla mittareilla ja tuloksia arvioitiin WAAM-valmistuksen ja perinteisten valmistusmenetelmien välillä.

Kolmivaiheinen karsintamenetelmä on luotu kirjallisuuskatsauksen perusteella, missä on käyty läpi valitut selluteollisuuden pesulaitteet, WAAM-menetelmä yleisesti ja siihen liittyvät asiat, valmistus- ja hitsauskustannukset sekä aiemmat tieteelliset tutkimukset. Kirjallisuuskatsauksen ja menetelmät-osion perusteella voidaan todeta, että komponentin potentiaalisuuteen ja soveltuvuuteen WAAM-valmistukseen vaikuttaa eniten komponentin kompleksisuus, painon ja työvaiheitten määrän vähentäminen sekä hybridivalmistuksen mahdollisuus. Lopullisessa komponentin valinnassa WAAM-valmistukseen suurin painoarvo on ollut komponentin valmistuskustannuksissa.

Tulosten perusteella luotu kolmivaiheinen karsintamenetelmä on ollut toimiva ja sillä on pystytty karsimaan soveltuvimmat ja potentiaalisimmat komponentit WAAM-valmistukseen. Menetelmän käyttöä pystytään halutessa kehittämään automaattisemmaksi ja laajentamaan sen käyttöä muille tuotealueille. Vain kaksi karsintamenetelmän läpäissyttä komponenttia osoittavat kuitenkin sen, että kohdeyrityksen WAAM-menetelmä vaatii vielä kustannustehokkuuden parantamista.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Sam Sinkkonen

Utilization of WAAM for pulp industry washing equipment

Master's thesis

2023

89 pages, 35 figures, 7 tables and 2 appendices

Examiners: Associate professor Tuomas Skriko, D. Sc, (Tech) Sakari Penttilä

Keywords: WAAM, Direct Energy Deposition, Additive Manufacturing, Part Selection, Pulp Industry, Washing Equipment

The goal of this master thesis is to find the most suitable and potential components for WAAM manufacturing among the components of pulp industry washing equipment. This has been accomplished by creating a three-step qualification process. With qualification process, the components have been selected and designed for WAAM manufacturing. Then, the components have been evaluated by comparing components using selected evaluation criterion between WAAM manufacturing and traditional manufacturing methods.

The three-stage qualification process has been created based on a literature review, where selected pulp industry washing equipment, the WAAM process in general and related issues, manufacturing, and welding costs, and previous scientific researches have been reviewed. Based on the literature review and methods section, it can be concluded that the component's potential and suitability for WAAM manufacturing is most affected by the component's complexity, reducing the weight and number of work steps, and the possibility of hybrid manufacturing. In the final selection of a component for WAAM manufacturing, the biggest weight has been on the manufacturing costs of the component.

Based on the results, the three-phase qualification process has been effective and has been able to select the most suitable and potential components for WAAM manufacturing. If desired, the use of the method can be developed to be more automatic, and its use can be extended to other product areas. However, only two components passed the qualification process, which shows that the target company's WAAM method still requires cost-effectiveness improvement.

KIITOKSET

Kiitos Jarkolle ohjauksesta ja kiitokset tarkastajille. Kiitos myös Andritzille mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö ja kiitos Savonlinnan tiimille sekä Lappeenrannan konttoriväelle. Kiitos LUT-yliopistolle mahtavasta viidestä vuodesta ja hyvästä sekä laadukkaasta opetuksesta.

Kiitos perheelle tuesta opintojen varrella. Kiitos myös kaikille ystäville, etenkin LUTin puolelta kenen kanssa on päästy temmeltämään, mutta välillä myös jouduttu opiskelemaan ”halki-poikki-pinoon” -mentaliteetilla.

Ennen kaikkea, haluan kiittää itseäni. Kiitos Sam!

Sam Sinkkonen. Lappeenranta. 12.5.2023

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

C_a	Kokoonpanon kokonaiskustannukset	[€]
C_{mat}	Komponentin materiaalikustannukset	[€]
C_p	Työstökustannukset	[€]
C_t	Työkaluvarustuskustannukset	[€]
C_{tool}	Työkalun hinta	[€]
C_u	Komponentin kokonaiskustannukset	[€]
e	Paloaikasuhde	[%]
H_{Ja}	Hitsausjauheen hinta	[€/kg]
H_{Ju}	Hitsauksen juurituen hinta	[€/m]
$H_{kilohinta}$	WAAM-valmistuksen kilohinta	[€/kg]
H_{Ko}	Hitsauksen koneen tuntihinta	[€/h]
H_{Li}	Hitsauslisäaineen hinta	[€/kg]
H_{Su}	Hitsauksen suojakaasun hinta	[€/m ³]
H_{TY}	Operaattorin työtunnin hinta	[€/h]
H_{Waam}	WAAM-laitteiston tuntihinta	[€/h]
J	Hitsausjauheen ominaiskulutus	[kg/lankakilo]
K_{En}	Hitsauksen energiakustannukset	[€]
K_{Hi}	Hitsausainekustannukset	[€]
K_{Ja}	Hitsausjauhekustannukset	[€]
K_{Ju}	Hitsauksen juuritukikustannukset	[€]

K_{Ko}	Hitsauksen konekustannukset	[€]
K_{Ku}	Hitsauksen kunnossapitokustannukset	[€]
K_{Li}	Hitsauksen lisäainekustannukset	[€]
K_{Su}	Hitsauksen suojakaasukustannukset	[€]
K_{Ty}	Hitsauksen työkustannukset	[€]
k	Kokonaishitsauskustannustekijä	[h]
L	Hitsauspituus	[m]
M	Hitsiainemäärä	[kg]
m	Komponentin massa	[kg]
N	Hyötyluku	[%]
R_{mat}	Materiaalin hinta	[€/kg]
R_p	Työstökustannukset	[€/h]
R_s	Hukattu materiaali	[€/kg]
S	Suhdeluku	[mm^2/kg]
T	Hitsiaineentuotto	[kg/h]
T_t	Työkalun kestoikä	[min]
t_c	Prosessiin kuluva aika	[min]
t_{unit}	Prosessiin kuluva kokonaisaika	[h]
V	Hitsauskaasun virtaus	[l/min]
V_w	Lopputuotteen tilavuus	[m^3]
W_f	Lopputuotteen massa	[kg]
W_o	Komponentin alkuperäinen massa	[kg]
x	Komponentin pituus	[mm]

y Komponentin leveys [mm]

Kreikkalaiset

ρ Materiaalin tiheys [kg/m^3]

Lyhenteet

AM Additive Manufacturing

BTF Buy-To-Fly

CAD Computer Aided Design

DED Direct Energy Deposition

DMLS Direct Metal Laser Sintering

EBAM Electron Beam Additive Manufacturing

MIG/MAG Metal Inert Gas / Metal Active Gas

ROI Return On Investment

TIG Tungsten Inert Gas

WAAM Wire Arc Additive Manufacturing

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Kohdeyritys	10
1.2	Tutkimusongelma ja -kysymykset	11
1.3	Työn tavoitteet ja rakenne	12
1.4	Tutkimusmenetelmät.....	13
1.5	Työn rajaus ja toimenpiteet.....	14
2	Kirjallisuuskatsaus.....	16
2.1	Kohdeyrityksen pesulaitteet	16
2.1.1	DD-pesuri.....	16
2.1.2	GF-suodin	19
2.1.3	Painediffusööri.....	20
2.2	WAAM – lankapohjainen suorakerrostusmenetelmä	22
2.2.1	WAAM lisäävässä valmistuksessa	22
2.2.2	WAAMin valmistusprosessi	25
2.2.3	Kohdeyrityksen WAAM-laitteisto.....	27
2.2.4	Topologinen optimointi ja rajoittavat tekijät WAAM-valmistuksessa.....	27
2.2.5	Hybridivalmistus ja WAAM.....	30
2.3	Valmistuskustannukset.....	31
2.4	Hitsauskustannukset.....	35
2.5	Aiempi tutkimus.....	38
2.5.1	Ohjelmat.....	38
2.5.2	Tieteelliset julkaisut	44
3	Pesulaitteiden komponenttien soveltuvuus WAAM-valmistukseen	46
3.1	Pesulaitteiden komponenttien karsiminen.....	46
3.1.1	Ensimmäinen karsintakierros.....	47

3.1.2	Toinen karsintakierros	55
3.1.3	Komponentin valinta.....	60
3.2	Valittujen komponenttien valmistaminen WAAMilla.....	62
3.3	WAAM-valmistukseen valittujen komponenttien arviointi.....	67
4	Tulokset ja niiden analysointi.....	68
4.1	Tulokset.....	68
4.1.1	Ensimmäinen ja toinen karsintakierros.....	68
4.1.2	Komponentin valinta.....	69
4.2	Tuloksien analysointi	70
4.2.1	Komponenttien karsintavaiheiden analysointi.....	71
4.2.2	WAAM-valmistukseen suunniteltujen komponenttien analysointi.....	74
5	Pohdinta ja jatkokehityskohteet.....	77
6	Johtopäätökset	81
7	Yhteenveto.....	83
	Lähteet	85

Liitteet

Liite 1. Osien arviointimatriisi

Liite 2. Kokoonpanojen arviointimatriisi

1 Johdanto

Viimeisten vuosikymmenten aikana lisääntynyt tarve valmistaa metallista laadukkaita ja kompleksisia komponentteja on vauhdittanut lisäävän valmistuksen kehitystä. Siinä missä esimerkiksi jauhepetiteknikkaan keskittyvät lisäävän valmistuksen menetelmät ovat dimensionaalisesti tarkkoja, rajoittaa tulostettavan komponentin koko sekä myös hidas valmistusaika niiden käyttöä. WAAM-menetelmä on lankaan ja valokaareen perustuva suorakerrostusmenetelmä (Wire Arc Additive Manufacturing). Vaikka se ei ole pinnanlaadullisesti ja dimensionaalisesti esimerkiksi jauhepetimenetelmän veroinen, pystytään WAAMilla valmistamaan suuria kompleksisia komponentteja korkeammalla tuottavuudella. (Lin et al. 2021. s. 24. & Rodrigues et al. 2019. s. 1.)

Kehittynyt tekniikka ja kyky valmistaa suuriakin komponentteja tarkoittaa, että menetelmälle on löydettävä käyttökohteita eli tulostettaviksi soveltuvia komponentteja. Kohdeyrityksellä oleva WAAM-valmistukseen tarkoitettu laitteisto luo tarpeen sille, että komponentteja on löydettävä WAAM-valmistukseen, mikä antaa myös tälle työlle motivaation. Tämän tutkimuksen tarkoituksena onkin selvittää valituista selluteollisuuden pesulaitteista potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen. Tutkimus keskittyy luomaan menetelmän, jolla nämä potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen löydetään eri laitekokonaisuuksista.

1.1 Kohdeyritys

ANDRITZ on maailmanlaajuisesti johtava laitosten, laitteiden, järjestelmien ja palveluiden toimittaja muun muassa sellu- ja paperiteollisuudelle, metalli- ja terästeollisuudelle sekä vesivoimateollisuudelle, missä sellu- ja paperiteollisuus käsittää lähes puolet koko konsernin tuloista. Lähes 30 000 työntekijän konserni on lähtöjään Itävallasta ja nykyisin sillä on työntekijöitä muun muassa Pohjois- ja Etelä-Amerikassa, Euroopassa ja Aasiassa. ANDRITZ Oy vastaa Suomen toiminnoista ja on osa ANDRITZ AG konsernia. ANDRITZ Oy käsittää noin 1600 työntekijää ja vastaa pääasiassa sellu- ja paperiteollisuuden laitosten, laitteiden, järjestelmien ja palveluiden suunnittelusta. (Andritz. 2022c.)

ANDRITZ Oy Savonlinnan toimipisteellä sekä ANDRITZ Oy:n tytäryhtiö konepaja ANDRITZ Savonlinna Works Oy työllistävät yhdessä noin 340 henkilöä. Toiminta keskittyy pääasiassa selluteollisuuden liiketoimintaan, mihin tässä tapauksessa kuuluvat keitto-, kuitulinja- ja valkoliipeälaitoksen laitteet. Suomen toiminnoista vastaava ANDRITZ Oy muodostaa yhden maailman johtavista sellun tuotantojärjestelmien, laitteiden ja prosessien toimittajista. Tästä esimerkkinä on yli 90 kuitulinjan toimitusta vuodesta 1992 lähtien. Savonlinnan konepajan toiminta keskittyy pääasiassa erilaisten projektien tuotteiden valmistukseen sekä toimitukseen sekä olemassa olevien keiton ja kuitulinjan laitteiden huoltoon. Hyvänä esimerkkinä suunnitelluista tuotteista on ANDRITZ Oy:n Savonlinnan keihäänkärkituote, DD-pesuri, joita on toimitettu maailmalle jo yhteensä yli 400 kappaletta. (Andritz 2022d.)

WAAM-menetelmän osalta ANDRITZ Savonlinna Works Oy on yksi edelläkävijöistä Suomessa (Varis 2022.). Varis, S. on diplomityössään ”Lankapohjaisen suorakerrostuksen hyödyntäminen sellu- ja paperiteollisuuden konepajavalmistuksessa” luonut pohjatyön ja perustan WAAM-menetelmän kehitykselle konepajalla. Tämä myös toimii yhtenä tämän työn motivaationa sille, miksi kohdeyritys tarvitsee menetelmän potentiaalisten komponenttien löytämiseksi WAAM-valmistukseen.

1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset

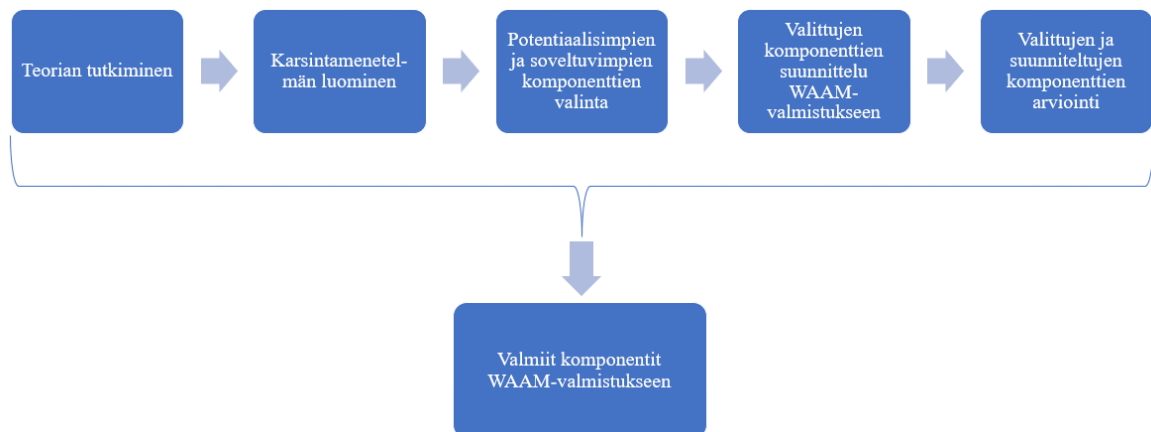
Kohdeyrityksellä on jo täydet valmiudet WAAM-menetelmän käyttöön. Lähtökohtaisesti tämän työn ja myös kohdeyrityksen tehtävänä on määrittää ja arvioida, mitä on hyödyllistä ja järkevää valmistaa WAAM-menetelmällä. Tämä toimii myös tämän tutkimuksen motivaationa luoden samalla tutkimuksen tavoitteen. Jotta ongelma voidaan ratkaista, on luotava karsintamenetelmä, minkä avulla karsitaan potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen valituista selluteollisuuden pesulaitteista. Näin ollen ongelma jakautuu siten, että ensimmäisenä tehtävänä on karsia komponenttien joukosta potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen. Toisena tehtävänä on arvioida WAAM-valmistukseen suunniteltujen komponenttien hyödyt verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmin valmistettuun komponenttiin. Voidaankin sanoa, että työn menetelmäosuus jakautuu kahteen vaiheeseen, komponenttien karsintaan ja WAAM-valmistukseen suunniteltujen komponenttien arviointiin.

Karsintamenetelmä ja WAAM-valmistukseen suunnitellun komponentin arviointi tulee perustumaan hyvin paljon näkökulmaan, missä katsotaan WAAM-valmistuksen hyötyjä kohdeyrityksen näkökulmasta. Menetelmiä luodessa on tärkeää miettiä, millä mittareilla mahdollisia hyötyjä mitataan. Vaikka vihreät arvot ovat nousseet yhä tärkeämpään asemaan globaalisti, on raha yleisesti tärkein mittari. Tässä tapauksessa voidaan puhua komponentin valmistuskustannuksista. Etenkin WAAM-valmistukseen suunnitellun komponentin arvioinnin määrittämistä varten on tärkeää tutkia, mistä komponenttien valmistuskustannukset koostuvat. Vaikka WAAM-valmistukseen soveltuvia komponentteja voi löytyä useita, on tärkeämpää varmistua uudelleensuunnitteluvaiheessa siitä, että uudelleensuunniteltu komponentti on oikeasti hyödyllistä valmistaa konkreettisesti. Perustuen edellä selitettyyn tutkimusongelmaan, pyrkii tämä diplomityö vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millä tavalla valittujen pesulaitteiden komponenttien potentiaalisuutta ja soveltuvuutta valmistettavaksi WAAMilla mitataan?
2. Mitkä ovat karsintamenetelmän mittarit? Eli millä mittareilla valitaan potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen?
3. Millä tavalla arvioidaan WAAM-valmistukseen suunniteltujen komponenttien hyöty ja toimivuus?

1.3 Työn tavoitteet ja rakenne

Tämän diplomityön päällimmäisenä tavoitteena on löytää jokaisesta valitusta selluteollisuuden pesulaitteesta potentiaalinen ja soveltuva komponentti sekä suunnitella se WAAM-valmistukseen. Jotta tähän tavoitteeseen päästään, määritetään työhön välitavoitteita, joiden avulla saavutetaan ensisijainen päätavoite. Kuvassa 1 esitetään tavoitteet ja samalla myös tutkimuksen kulku. Esitettyjen välitavoitteiden avulla päästään päällimmäiseen tavoitteeseen ja nämä luovat työlle suunnan ja rakenteen.



Kuva 1. Työn tavoitteet ja rakenne.

Kun työhön ja karsintamenetelmän luomiseksi tarpeellinen teoria on käyty läpi, voidaan karsintamenetelmän luominen aloittaa. Tarkoituksena on luoda karsintamenetelmä, jolla karsitaan valittujen selluteollisuuden pesulaitteiden komponenteista potentiaalisimmat ja soveltuvimmat tarkempaa tarkastelua varten. Edellisen vaiheen jälkeen suoritetaan komponenttien valinta. Tavoitteena on valita jokaisesta valitusta selluteollisuuden pesulaitteesta komponentti WAAM-valmistukseen ennalta määritettyjen kriteerien eli mittareiden perusteella. Valitut komponentit suunnitellaan WAAM-valmistukseen. Kun komponentit on valittu ja ne on suunniteltu WAAM-valmistukseen, voidaan suorittaa viimeinen vaihe.

Viimeisessä vaiheessa on tarkoitus arvioida valittuja ja WAAM-valmistukseen suunniteltuja komponentteja. Arviointi suoritetaan vertailemalla mitä hyötyjä saavutetaan WAAM-valmistuksella kyseisten komponenttien kohdalla verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Eli yksinkertaistaen onko WAAM-valmistukseen suunniteltu komponentti parempi ja järkevämpi valmistaa WAAM-menetelmällä kuin miten se on aikaisemmin tehty. Kun kaikki edellä mainitut välitavoitteet on suoritettu onnistuneesti, on työn tuloksena valmiit komponentit WAAM-valmistukseen, mikä on myös työn päällimmäinen tavoite.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Diplomityön teoreettisena perustana toimii kirjallisuuskatsaus. Menetelmät-osio luodaan kirjallisuuskatsauksen ja kohdeyrityksestä saatavan tiedon perusteella. Kun menetelmät on

luotu, suoritetaan työn varsinainen empiirinen osuus, mikä käsittää komponenttien karsimisen luodun menetelmän avulla, valittujen komponenttien uudelleensuunnittelua WAAM-valmistukseen sekä kyseisten komponenttien arvioimista. Kirjallisuustutkimuksessa tullaan pääasiassa hyödyntämään LUT-Primon tietokantaa. Tämän lisäksi käytetään kohdeyrityksestä saatavia tietoja WAAM-valmistuksen ja komponenttien kustannuksista.

1.5 Työn rajaus ja toimenpiteet

WAAMin hyödyntäminen konepajavalmistuksessa on erittäin laaja teema ja tämän takia työtä rajataan palvelemaan kohdeyrityksen tarpeita. Ensisijaisesti työ rajataan tutkimaan ja käsittelemään jo mainittujen tavoitteiden ja työn rakenteen mukaisesti valittujen pesulaitteiden komponenttien soveltuvuuteen WAAM-valmistukselle. Kyseinen tavoite ja rajaus luo myös raamit koko tutkimukselle.

Kirjallisuustutkimus on rajattu tässä työssä käsittelemään seuraavia aiheita: yhtiön pesulaitteet, WAAM valmistusmenetelmänä, topologinen optimointi ja rajoitteet WAAM-menetelmässä, hybridivalmistus, valmistus- ja hitsauskustannukset sekä aiemmat tutkimukset sisältäen kaupalliset ohjelmat ja tieteelliset julkaisut. Yrityksen pesulaitteet rajataan nimensä mukaisesti kohdeyrityksen pesulaitteisiin, mitkä ovat DD-pesuri, GF-suodin ja painediffusööri. Kirjallisuuskatsauksessa on tarkoitus esitellä laitteiden rakenne ja toimintaperiaate lyhyesti, mutta kattavasti. WAAMin osalta esitellään kirjallisuuskatsauksessa sen teoria valmistusmenetelmänä, sekä tutustutaan käytössä olevaan laitteistoon kohdeyrityksessä. Käytävissä oleva laitteisto ja esimerkiksi mahdolliset tulostusmateriaalit asettavat tietyt rajaukset tutkitaville ja mahdollisesti valmistettaville komponenteille. Topologisen optimoinnin periaate esitellään sekä lyhyesti kerrotaan rajoittavia tekijöitä WAAM-valmistuksessa. Myös hybridivalmistus yhdessä WAAM-valmistuksen kanssa pääperiaatteineen esitellään. Valmistuskustannukset-osiossa on tarkoitus syventyä siihen, mistä valmistuskustannukset koostuvat. Tätä on tarkoitus tutkia laajemmasta näkökulmasta, mutta kuitenkin siten, että sitä on helppo soveltaa erilaisiin valmistusmenetelmiin. Tämän jälkeen on tarkoitus syventyä hitsauskustannuksiin. Koska WAAM-menetelmä perustuu hitsaamiseen, ovat hitsauskustannukset olennainen osa työn kannalta. Viimeisessä osassa on tarkoitus käydä läpi aiempia tieteellisiä tutkimuksia ja olemassa olevat kaupalliset menetelmät tämän työn aiheeseen liittyen.

Komponentin uudelleensuunnitteluvaihe pyritään rajaamaan siten, että uudelleensuunniteluun valitaan komponentteja yksi per laite eli maksimissaan kolme komponenttia. Uudelleensuunniteltavat komponentit valitaan sen mukaan, mikä on kaikista soveltuvin valmistaa WAAMilla. Luotava arviointimenetelmä keskittyy tarkastelemaan uudelleensuunnitellun komponentin ja edeltävän komponentin eroja ja sitä onko uudelleensuunniteltu komponentti valituilla mittareilla järkevää valmistaa WAAMilla.

2 Kirjallisuuskatsaus

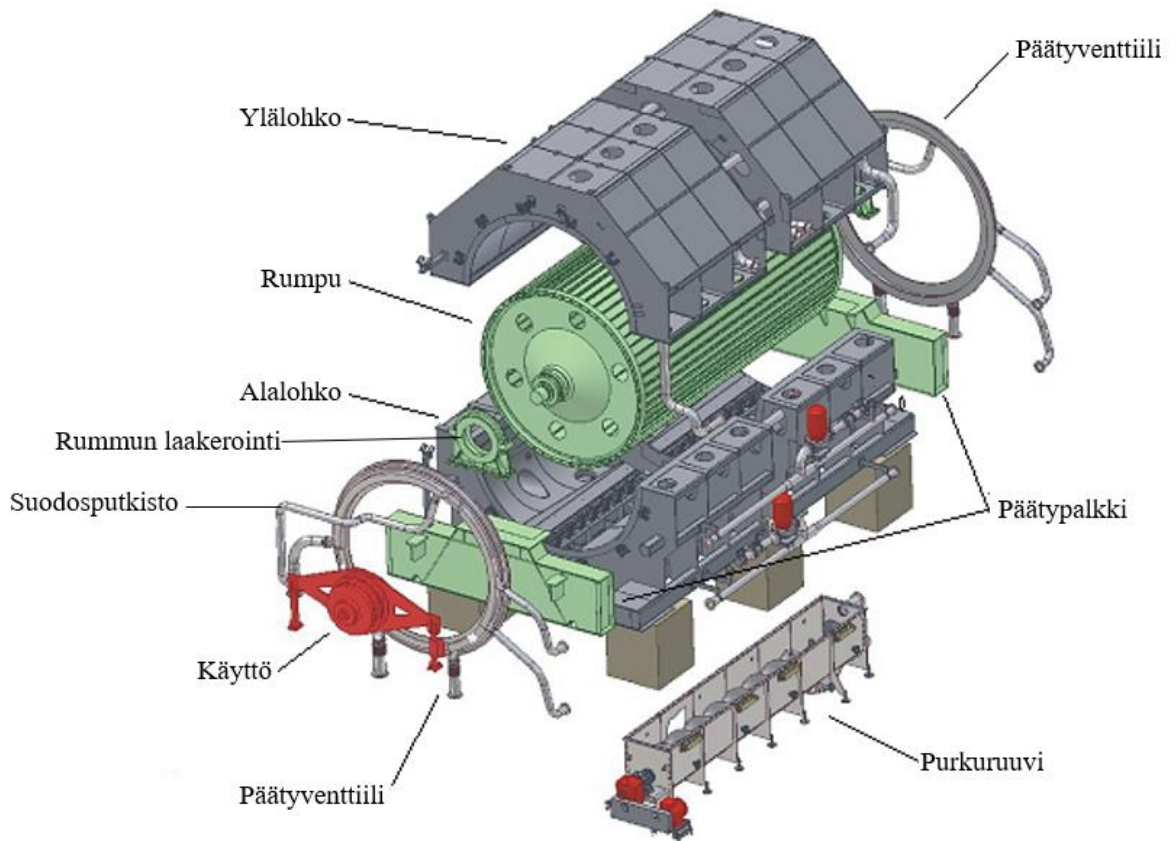
Kirjallisuuskatsauksessa eli työn teoriaosassa on tarkoitus esitellä kohdeyrityksen pesulaitteet, lisäävä valmistus ja WAAM-menetelmä, valmistus- ja hitsauskustannukset sekä aiempi tieteellinen tutkimus kuin myös kaupalliset työkalut siitä, miten komponenttien soveltuvuutta arvioidaan valmistettavaksi jollakin lisäävän valmistuksen menetelmällä. Edellä mainitut läpikäytävät asiat luovat vakaan teoriapohjan tälle työlle.

2.1 Kohdeyrityksen pesulaitteet

Tuotekoti eli kohdeyrityksen pesulaitteet sisältävät kolme eri laitetta, jotka ovat DD-pesuri, GF-suodin ja Painediffusööri. Näistä DD-pesuri ja GF-suodin kuuluvat rumpusuotimiin. Rumpusuotimet jakautuvat kahteen tyyppiin sen mukaan, millä tavalla massa suotautetaan pyörivän rummun pinnalle. GF-suotimessa rummun sisäosan paine voi olla alhaisempi kuin ilmanpaine, jolloin käytetään termiä imurumpusuodin. DD-pesurissa rummun ulkopuolinen paine voi olla ilmanpainetta suurempi, jolloin käytetään termiä rumpusuodin. Kummallekin on yhteistä, että massa saostuu rummun pinnalle ja paine tai imu työntää tai vetää massassa olevan nesteen suodattimen reikien läpi. Painediffusööri toimii syrjäytysperiaatteella ja sitä käytetään tyypillisesti vain ruskean massan pesussa jatkuvan keiton jälkeen. (KnowPulp 2022.)

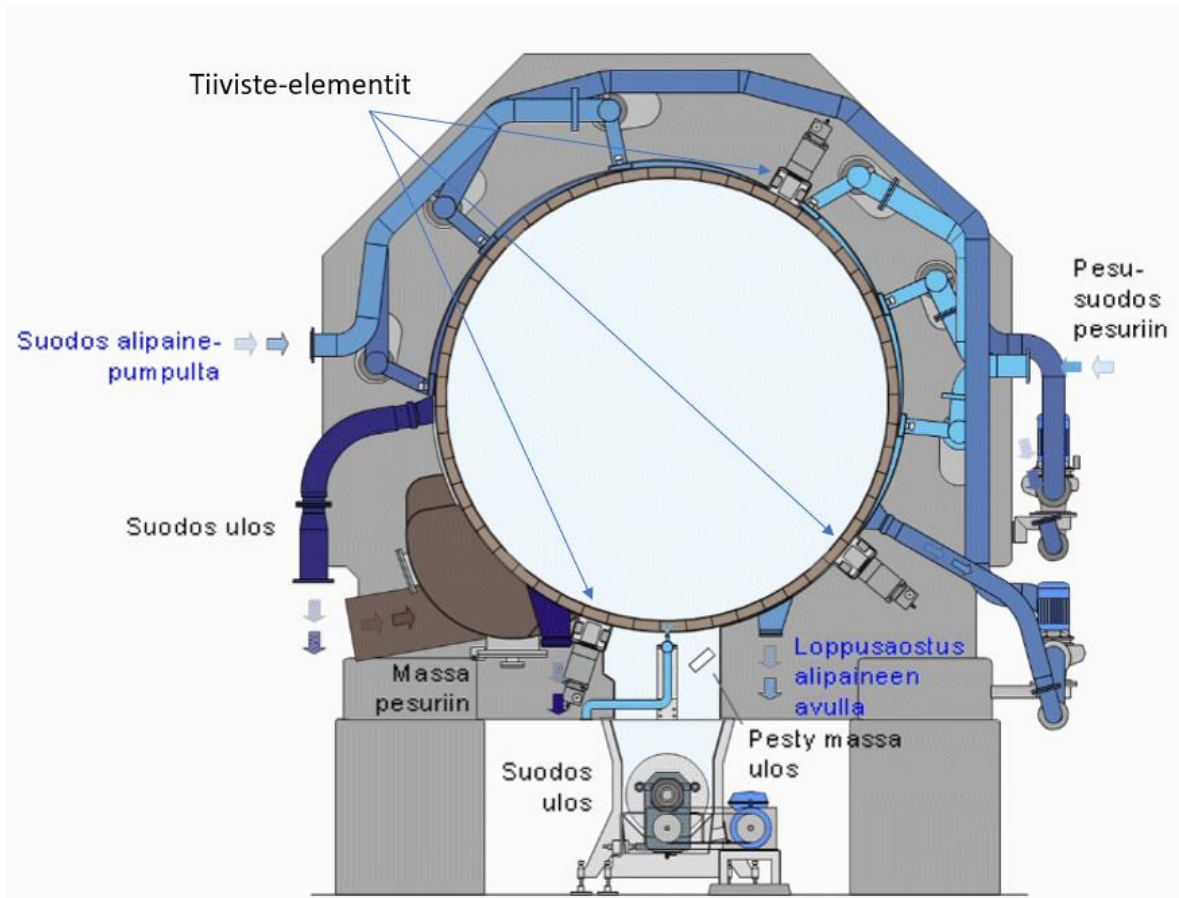
2.1.1 DD-pesuri

Viralliselta nimeltään DD-washer pesuri, puhekielessä tutummin DD-pesuri, on nimensä mukaisesti ”drum displacement” eli syrjäytyspesuun perustuva sellumassan pesulaite. Laitteen koot vaihtelevat 3 metrin halkaisijan ja 1,5 metrin pituuden DD-pesurista aina 5,5 metrin halkaisijan ja 12 metrin pituuden DD-pesuriin. DD-pesureita käytetään ruskean massan, happivaiheen jälkeisessä ja valkaisuvaiheiden välisissä pesuissa. Se sijaitsee sellun valmistusprosessissa kuitulinjalla. Kuvassa 2 nähdään DD-pesurin rakenne ja komponentit räjäytyskuvana.



Kuva 2. DD-pesurin rakenne ja pääkomponentit räjäytyskuvana (Hytönen 2005, s. 10.).

Kuvasta 3 nähdään kaksivaiheisen DD-pesurin poikkileikkaus, mistä ilmenee toimintaperiaate. Myötäpäivään kiertäessä ensimmäinen tiiviste-elementti on noin klo yhdessä. Tämä erottaa pesuvaiheet. Kaksi jälkimmäistä erottaa pesuvaiheen purkuvaiheesta ja purkuvaiheen massan syötöstä.



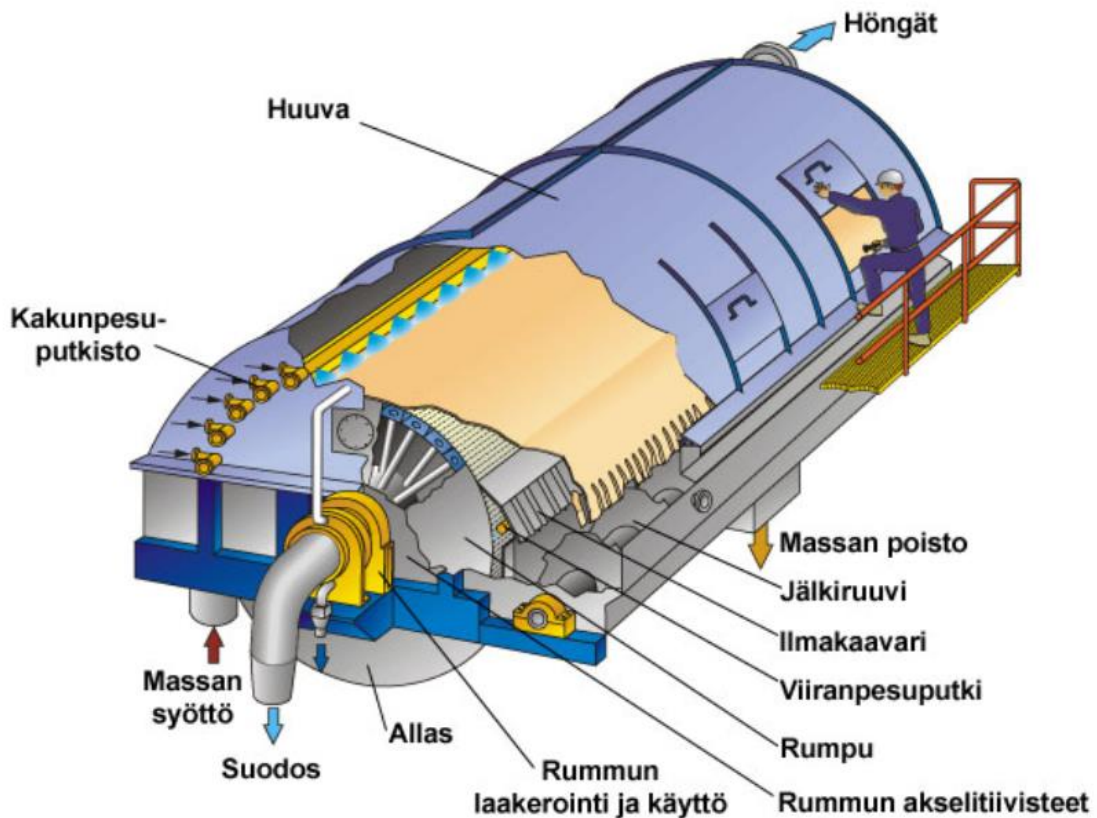
Kuva 3. Kaksivaiheisen DD-pesurin poikkileikkaus ja sen toimintaperiaate. (KnowPulp 2022.)

DD-pesurissa niin sanottuja pesuvyöhykkeitä on yhdestä neljään ja massa pestään pesuvyöhykkeiden lukumäärän vaiheisena syrjäytyspesuna vastavirtaan. Massa pumpataan syöttövyöhykkeeseen, jolloin sen sakeus on noin 4–10 % prosessista riippuen. Syöttövyöhykkeeltä massa tiivistyy paineen avulla rummun reikälevyn pinnalle samanaikaisesti täyttäen jakolistoilla rajatut lokerot, mitkä ympäröivät rumppua. Reikälevyn pinnalle tiivistynyttä massaa kutsutaan massakakuksi. Kun massakakku etenee rummun pyöriessä, suodos läpäisee rummun reikälevyn ja kun massakakku ohittaa ensimmäisen tiivistyslistan tulee massakakusta vakiopaksuinen. Ensimmäisen tiivistyslistan jälkeen massakakku saapuu pesuvyöhykkeeseen, milloin massakakun sakeus on 10–13 %. Syrjäytyspesun ansiosta puhtaalla suodoksella syrjäytetään massakakun sisältämä likaisempi neste, tämä tarkoittaa, että pesuvyöhykkeessä käytetään pesunesteenä mahdollisimman puhdasta prosessivettä. Pesuvaiheesta toiseen siirtyvän suodoksen pumppaaminen toteutetaan kiertosuodospumppuilla. Pesuvyöhykkeen jälkeen massa kulkeutuu purkuvyöhykkeeseen. Viimeisen tiiviste-elementin kohdalla suodoskanavasta avautuu yhteys imupumppuun, jolloin massakakusta imetään pois

reikälevyn alle jäänyt suodos. Kun imukohta on ohitettu, ohjataan massakakun alle paineilmasysäys, millä massakakku irrotetaan. Tästä massa siirtyy purkuruuville ollen valmis seuraavaan prosessivaiheeseen. Tämän jälkeen reikälevyt pestään pesuvesiputkien suihkuilla. (KnowPulp 2022 & Andritz 2021.)

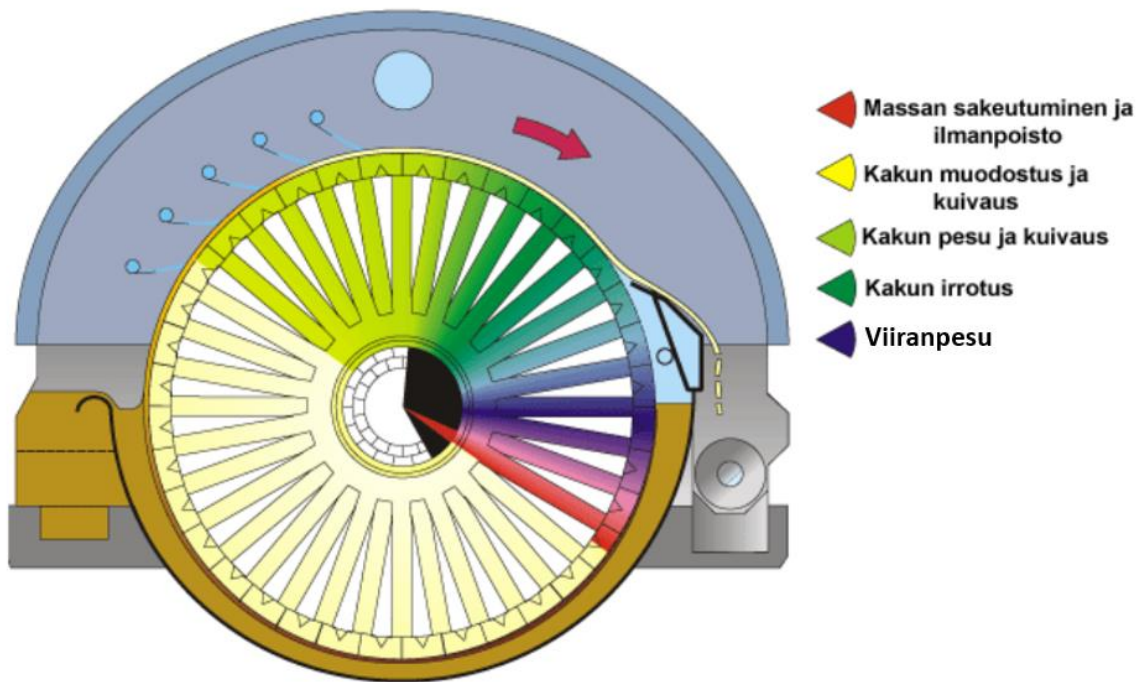
2.1.2 GF-suodin

GF eli GasFree -suodin on perinteisestä imurumpusuotimesta paranneltu versio. GF-suodinta käytetään yleisesti ruskean massan, happivaiheen sekä valkaisun ja lajittelun jälkeisessä pesussa. Laitteen koot vaihtelevat 2,5 metrin halkaisijan ja 3 metrin pituisesta aina 4,5 metrin halkaisijan ja 12 metrin pituiseen GF-suotimeen. Niin sanotun kaasuttoman venttiilin avulla pystytään vähentämään ilman kulkeutumista imujalkaan ja sekoittumista suodokseen. Tällä pystytään parantamaan laitteen kapasiteettiä, sillä ilma aiheuttaa vaahtoamista. Kunnossapitoa ja korroosio-ongelmia helpottaa se, että rummun sisällä ei ole putkistoa. Kuvasta 4 nähdään GF-suotimen rakenne ja oleelliset komponentit. (KnowPulp 2022.)



Kuva 4. GF-suotimen rakenne. (KnowPulp 2022.)

GF-suotimen syöttöaltaaseen massa tulee noin 0,7–2,0 % sakeudella. Viirapäälysteisen pyörivän rummun läpi menevä suodos johdetaan kartioimupään kautta imujalkaan, joka on alas-päin lähtevä putki. Tämän ansiosta massa imeytyy lähemmäs rumpua, minkä seurauksena suodos ajautuu rummun sisäpuolella suodostilaan ja massa saostuu viiralle. Prosessin edetessä eli rummun pyöriessä rumpu kuljettaa saostetun massaradan pesunestesuihkujen alitse kuivausvyöhykkeeseen ja edelleen kaavarille, mistä se siirtyy jälkiruuville ja siitä massan poistoon. Lopuksi viira pestään korkeapaineisella viiranpesuputkella. Pesutulos kuin myös lopullinen sakeus on riippuvainen pesusuihkujen määrästä. Tehtaan tuotanto pitkälti määrää pesuveden ja toiminnassa olevien pesuputkien määrän. Kuvassa 5 esitetään laitteen toimintaperiaate. (KnowPulp 2022 & Andritz 2022a.)

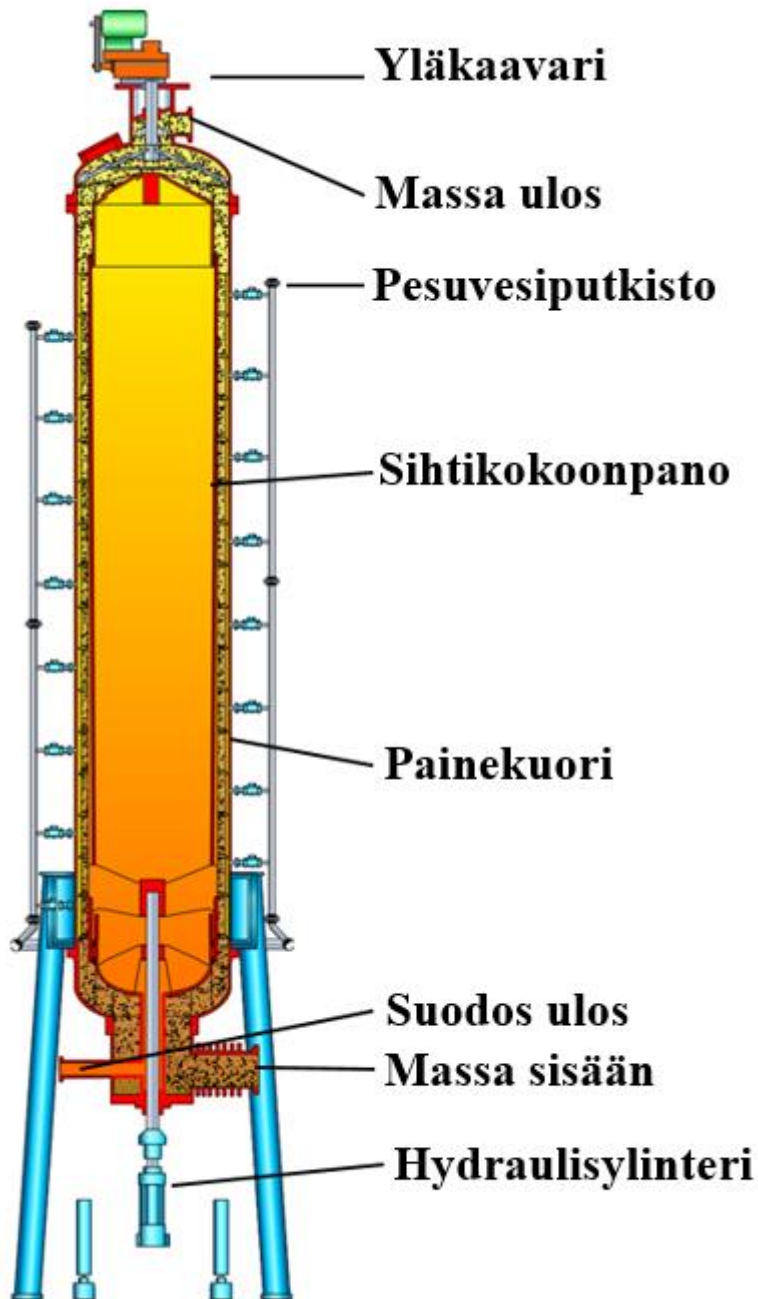


Kuva 5. GF-suotimen toimintaperiaate (Muok. KnowPulp 2022.)

2.1.3 Painediffusööri

Yleisesti diffusöörit toimivat syrjäytysperiaatteella ja ne on jaettu atmosfäärisiin sekä paineellisiin diffusööreihin. Laitteen koot vaihtelevat 1,2 metrin halkaisijan ja 16,8 metrin pituisesta aina 2,8 metrin halkaisijan ja 28 metrin pituuden painediffusööreihin. Käyttökohde kuitulinjalla on tyypillisesti painediffusöörillä ruskean massan pesussa jatkuvan keiton jälkeen ja happivaiheen jälkeisessä pesussa. Massa syötetään painediffusööriin 10–12 %

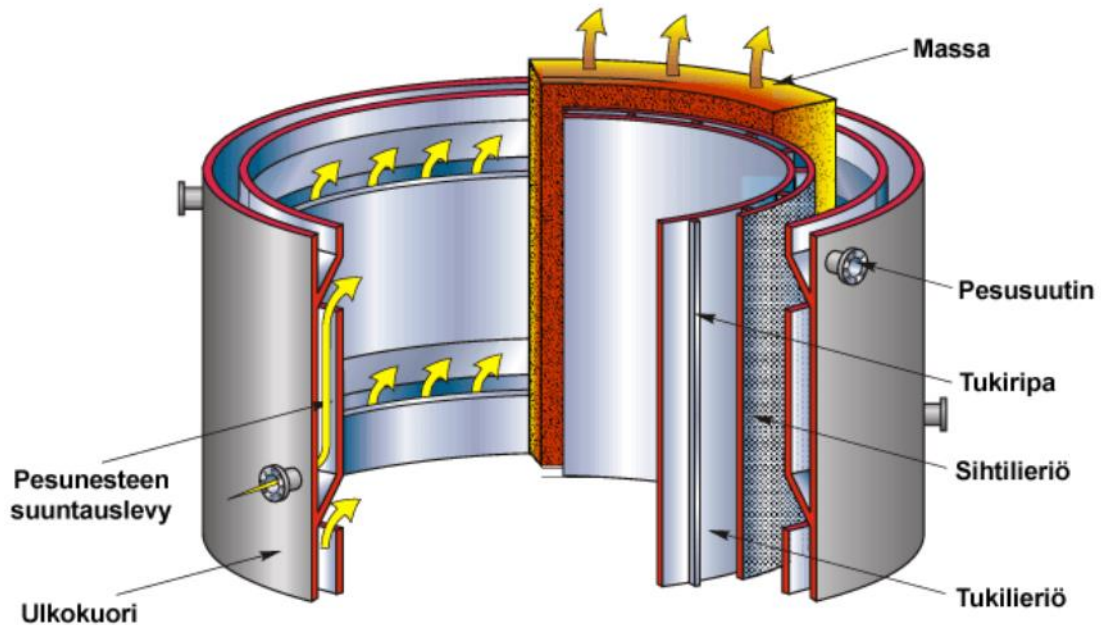
sakeudessa, ja erona rumpusuotimiin on se, että laite toimii korkeiden lämpötilojen ja paineen alaisuudessa. Kuvassa 6 esitetään painediffusöörin rakenne. (KnowPulp 2022 & Andritz 2022b.)



Kuva 6. Painediffusöörin rakenne. (Muok. Andritz 2022b.)

Painediffusöörin alapäästä syötetty massa kulkeutuu ulkovaipan ja sihtilieriön väliin. Suodoksen syrjäyttäminen tapahtuu siten, että pesuneste jaetaan tasaisesti ulkovaipan läpi

massaan. Tämä syrjäyttää suodoksen sihtilevyjen läpi suodostilaan, ja suodos poistuu laitteesta sihtilieriön alapäästä. Massa poistuu laitteen yläpäästä pyörivän kaavarin avulla. Hydraulisylinlerin avulla sihtilieriö liikkuu hitaasti ylös ja nopeasti alaspäin. Sihtilieriön puhdistava huuhtelu tapahtuu sihtilieriön tullessa alaspäin. Kuvassa 7 esitetään painediffusöörin toimintaperiaate. (KnowPulp 2022 & Andritz 2022b.)



Kuva 7. Painediffusöörin toimintaperiaate. (KnowPulp 2022.)

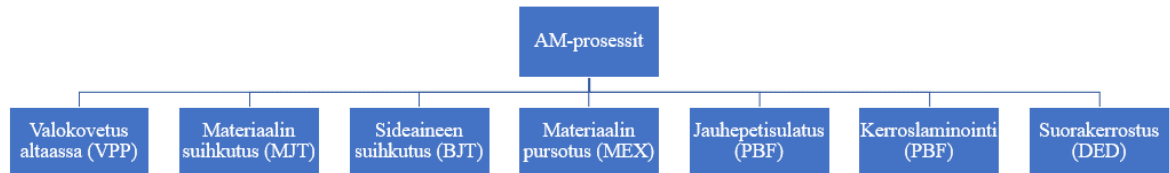
2.2 WAAM – lankapohjainen suorakerrostusmenetelmä

Tässä osiossa käsitellään yleisesti WAAM-menetelmä lisäävässä valmistuksessa, WAAM-menetelmän valmistusprosessi, kohdeyrityksen WAAM-laitteisto, topologinen optimointi ja rajoittavat tekijät WAAM-valmistuksessa sekä hybridivalmistus WAAM-valmistuksessa.

2.2.1 WAAM lisäävässä valmistuksessa

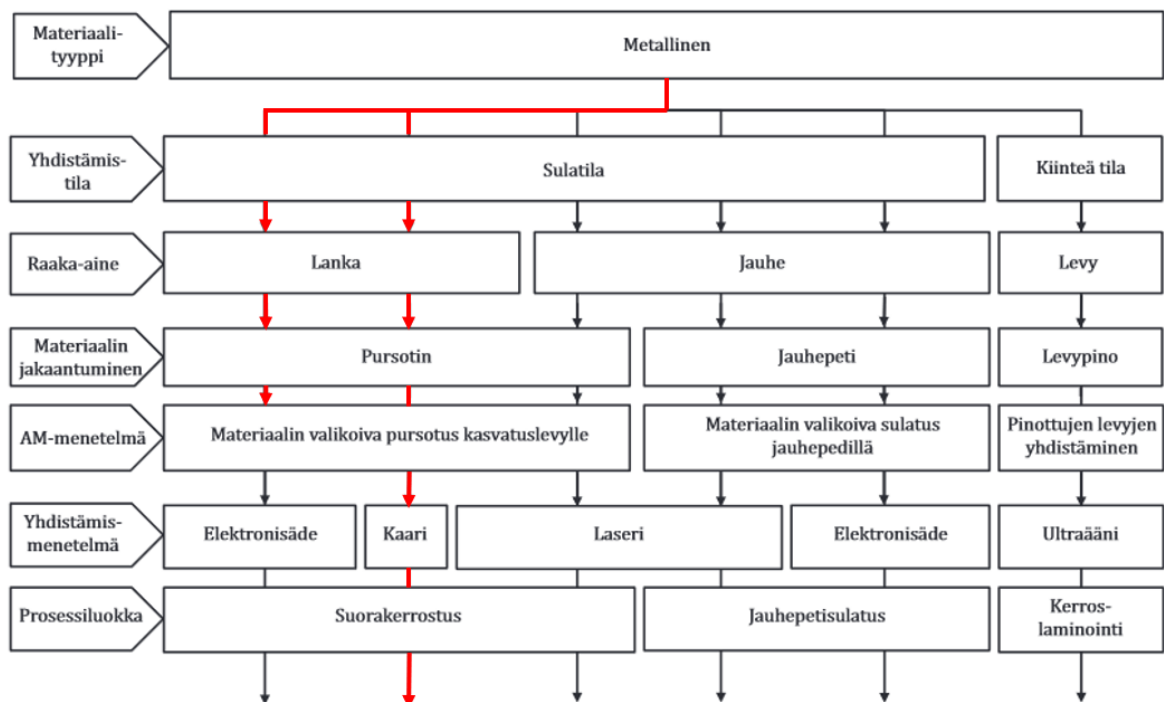
Lisäävä valmistus on yksi kuumimmista aiheista valmistuksen ja suunnittelun maailmassa, eikä suotta. Mahdollisuus valmistaa kolmiulotteisia ja monimutkaisia komponentteja kerros kerrokselta valmistusprosessin avulla on avainasemassa valmistusmenetelmän läpimurrolle. AM-prosessit eli lisäävän valmistuksen (Additive Manufacturing) menetelmät voidaan jakaa

kuvan 8 mukaisesti seitsemään eri luokkaan. Näistä yksi luokka on suorakerrostus (DED), mikä tulee sanoista ”Direct Energy Deposition”. WAAM on yksi suorakerrostus menetelmiin kuuluvista prosesseista. (Rodrigues et al. 2019. s.1–2.)



Kuva 8. AM-prosessit (Muok. Srivastava et al. 2023. s. 2)

SFS-EN ISO/ASTM 52900 mukaan suorakerrostus on yksivaiheinen materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa kohdennettua lämpöenergiaa käytetään sulattamaan ja liittämään materiaali kohdennetusti. Kuvassa 9 esitetään metallimateriaalien yksivaiheisen lisäävän valmistuksen prosessin periaatteen yleiskatsaus, missä on punaisella korostettu WAAM-prosessin periaate.

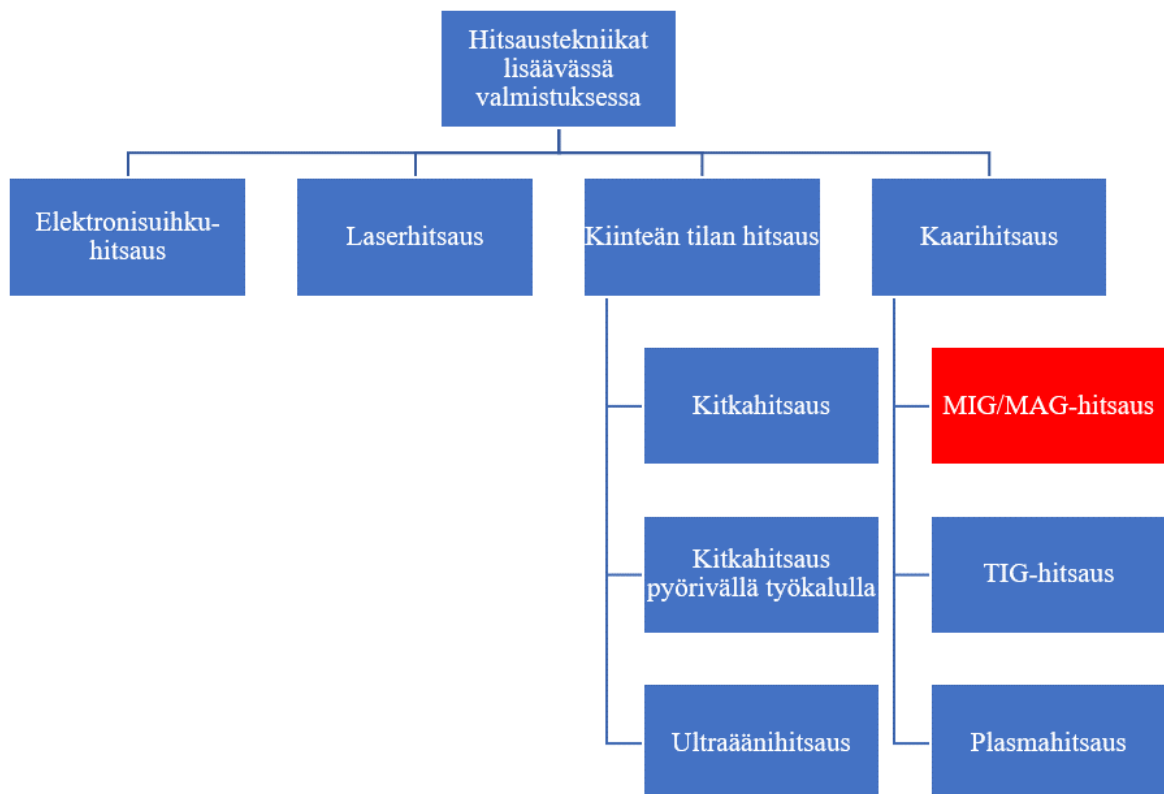


Kuva 9. Metallien yksivaiheisten AM-prosessien periaatteet. WAAM-prosessi korostettuna punaisella. (Muok. SFS-EN ISO/ASTM 52900. 2021. s. 25)

Sulatukseen perustuvat lisäävän valmistuksen prosessit keskittyvät lähinnä jauhepetitulosukseen, missä lämmönlähteinä on käytetty joko laser- tai elektronisäiteitä. Vaikka jauhepetitulosus menetelmällä saavutetaan erinomainen mittatarkkuus tulostettavaan

komponenttiin, on sen kerrostumisnopeus vielä alhainen. Tämä on suoraan yhteydessä tulostusprosessin keston, mikä taas lisää tulostettavan komponentin läpimenoaikaa. Valokaareen perustuva lankapohjainen suorakerrostusmenetelmä eli WAAM käyttää lämmönlähteenä sähköllä tuotettua valokaarta ja kiinteää lankaa syöttömateriaalina. Vaikka valmistettävien komponenttien tarkkuudessa ei päästä esimerkiksi jauhepetimenetelmällä valmistettävien komponenttien tasolle, eroaa WAAM muihin menetelmiin siinä, että kerrostumisnopeus on huomattavasti korkeampi kuin myös rajoitteet tulostettavan komponentin suhteen ovat käytännössä rajattomat verrattuna muihin menetelmiin. (Rodrigues et al. 2019. s.1–2.)

Hitsaus on usean lisäävän valmistuksen prosessin pohjana oleva menetelmä. Hitsaustekniikalla on huomattava vaikutus lisäävään valmistukseen, koska sillä on useita etuja kilpaileviin tekniikoihin verrattuna. Näitä etuja on muun muassa materiaalin säästö prosessin aikana, korkea syöttönopeus, monimutkaisten osien valmistuksen helppous sekä rajoituksettomuus valmistettavan komponentin tilavuudelle. Tunnusomaista valmistetuille osille on niiden lujuus, läpäisemättömyys sekä väsymiskestävyys. Kuvassa 10 esitetään käytetyt hitsaustekniikat lisäävän valmistuksen menetelmissä, punaisella on merkattu kohdeyrityksen WAAM-menetelmässä käytetty hitsaustekniikka. (Srivastava et al. 2023. s. 2.)

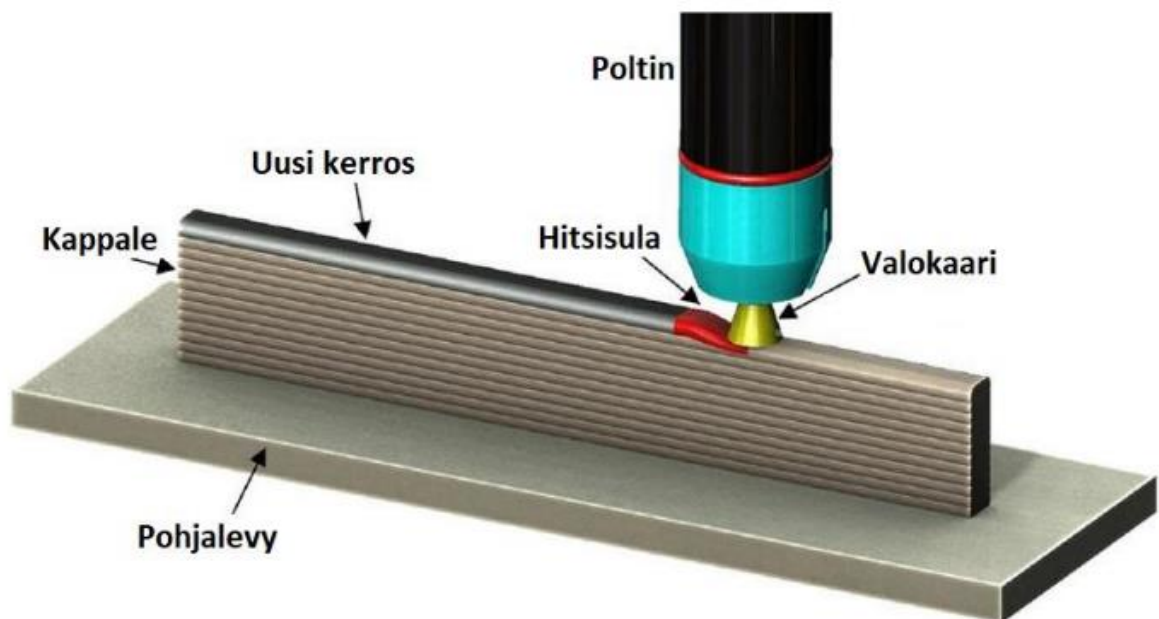


Kuva 10. Hitsaustekniikat lisäävässä valmistuksessa (Muok. Srivastava et al. 2023. s. 3)

2.2.2 WAAMin valmistusprosessi

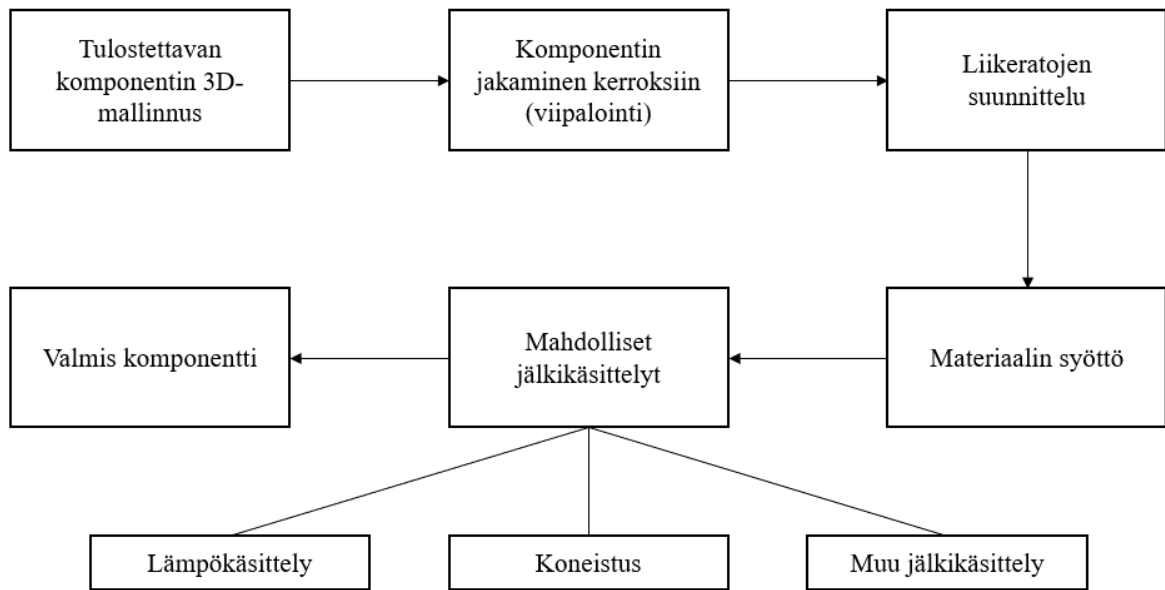
WAAM-tekniikkaa voidaan suorittaa MIG/MAG-hitsauksella (Metal Inert Gas / Metal Active Gas), TIG-hitsauksella (Tungsten Inert Gas) tai plasmahitsauksella. MIG/MAG-hitsaukseen perustuva WAAM-tekniikka on käytössä kohdeyrityksen konepajalla, joten tässä työssä keskitytään MIG/MAG-hitsaukseen samalla rajaten pois TIG- ja plasmahitsauksen.

MIG/MAG-hitsaus on yksi käytetyimmistä kaareen pohjautuvista tekniikoista. MIG- ja MAG-hitsaus eroavat toisistaan käytettyjen suojakaasujen perusteella, siinä missä MIG-hitsauksessa käytetään inerttiä suojakaasua niin MAG-hitsauksessa käytetään hitsausprosessiin osallistuvaa aktiivista suojakaasua. Kuvassa 11 nähdään pelkistetty WAAM-prosessi. Ideana on sulattaa pohjalevyn päälle materiaalia kerros kerrokselta samalla muodostaen suunniteltua komponenttia.



Kuva 11. WAAM-prosessi. (Varis. 2020. s. 9)

Yleisesti WAAM-tuotantoprosessi sisältää kolme vaihetta. Vaiheet ovat valmistettavan komponentin suunnittelu ohjelmistojärjestelmillä, komponentin valmistus ja viimeisenä mahdollinen jälkikäsittely. Kuvassa 12 esitetään WAAM-valmistuksen prosessiketju.



Kuva 12. WAAMin prosessiketju. (Muok. Lin et al. 2021. s. 28)

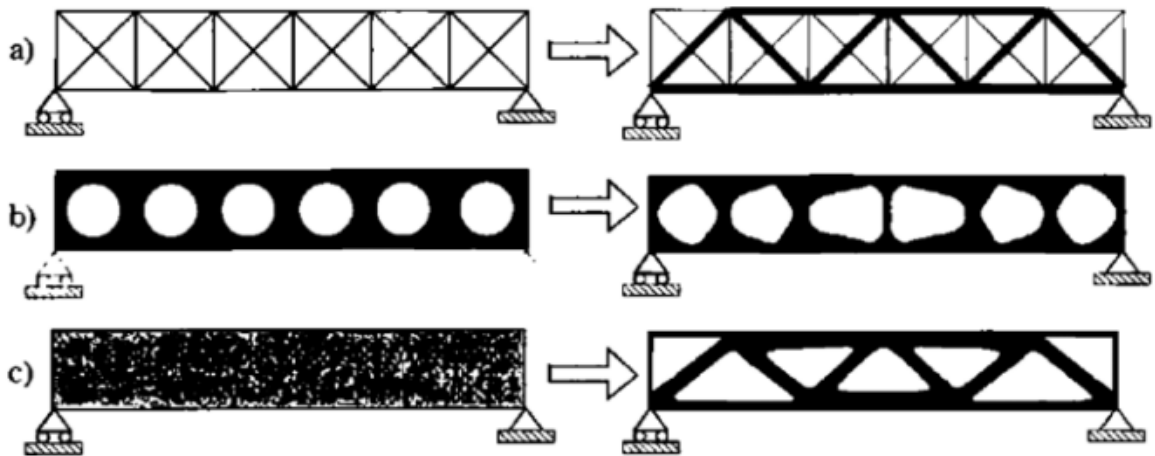
Ensimmäiseen vaiheeseen eli komponentin suunnitteluun ohjelmistojärjestelmillä kuuluu tulostettavan komponentin 3D-mallinnus, komponentin jakaminen kerroksiin ja liikeratojen suunnittelu. Yksinkertaisuudessaan prosessi menee siten, että ensimmäisenä suunnitellaan komponentin 3D-malli CAD-ohjelmistolla (Computer Aided Design). Tämän jälkeen komponentti viipaloidaan kaksiulotteisiksi kerroksiksi eli tulostuskerroksiksi. Viimeisenä on liikeratojen suunnittelu, millä tarkoitetaan reittiä, mitä pitkin komponentti tullaan tulostamaan. Yleisesti tässä pyritään siihen, että tulostamisen alku- ja loppupisteitä olisi mahdollisimman vähän, jolloin komponentti on mahdollista tulostaa nopeammin. Liikeratojen suunnittelussa on huomioitava, että tulostusreitti vaikuttaa esimerkiksi komponentin mekaanisiin ominaisuuksiin, jolloin jo myös tulostettavan komponentin ulkomuodoilla on suuri vaikutus liikeradan suunnitteluun. Kun edelliset vaiheet on suoritettu, voidaan materiaalin syöttö eli komponentin valmistus WAAM-menetelmällä aloittaa. Kun valmistusprosessi on suoritettu, on komponentti käytännössä valmis. Se, onko komponentti valmis, määräytyy jälkikäsittely tarpeen mukaan, mikä taas määräytyy komponentin vaatimuksien perusteella. Esimerkiksi lämpökäsittelyllä voidaan vaikuttaa komponentin mikrorakenteeseen tai jäännösjäännityksiin, kun taas koneistuksella voidaan parantaa pinnanlaatua tai lisätä funktionaalisia ominaisuuksia komponenttiin. (Lin et al. 2021. s. 28–29.)

2.2.3 Kohdeyrityksen WAAM-laitteisto

Arvostelumenetelmän luomisen kannalta on tärkeää tietää, mikä on WAAMin nykytilanne kohdeyrityksen konepajalla ja aiheuttaako se mitään rajoitteita mahdollisesti tulostettavalle komponentille. WAAMin kehitystyö kohdeyrityksessä on alkanut jo vuonna 2019 ja alkuvuodesta 2020 on päästy tulostamaan ensimmäisiä koekappaleita. Tämän jälkeen on edetty erilaisten prototyyppien kautta lopputuotteisiin asti ja ensimmäiset sellutehtaalle tehdyt komponentit on toimitettu lokakuussa 2021. Kirjoitushetkellä WAAM-tuotanto toimii yhdellä robottisolulla, mutta toinen solu on jo käyttöönottokynnyksellä. Ohjelma- ja hitsausvirtalähteen muutoksella on mahdollista valjastaa kolme lisäsolua tulostuskäyttöön, mikä tarkoittaa, ettei tulostuskapasiteetti vielä ainakaan rajoita toimintaa. Kun toinen robottisolu otetaan käyttöön, on kohdeyrityksen konepajalla mahdollisuus WAAM-prosessiin HIKO 2 ja HIKO 3 robottisoluilla. HIKO 2:lla pystytään tulostamaan 3 metrin halkaisijan ja 2,5 metrin korkuisia komponentteja ja siinä on 2-akselinen pyörityspöytä. HIKO 3:lla pystytään tulostamaan 1,5 metrin halkaisijan ja 13 metrin pituuden komponentteja ja siinä on 1-akselinen pyörityspöytä. Tähän mennessä on tulostuksia pystytty tekemään seuraaville materiaaleille: 316 L, Inconel 625 ja 410NiMo. Tämän lisäksi on suunniteltu, että tulostustestit aloitetaan duplex-teräkselle ja S325/S355 sekä potentiaalisesti myös suurlujuusteräksille ja pronssimateriaaleille. Tässä työssä ei kuitenkaan edellä mainittujen materiaalien perusteella rajata eri teräsmateriaaleista valmistettuja komponentteja pois. (Varis. 2022.)

2.2.4 Topologinen optimointi ja rajoittavat tekijät WAAM-valmistuksessa

Mekaanisen rakenteen optimointi voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan. Nämä ovat mitoituksen, muodon ja topologian optimointi. Mitoitusoptimointi perustuu numeerisen arvon muuttamiseen, kuten esimerkiksi palkin poikkileikkauksen suuruuteen. Tämä on myös jokaisen rakenteellisen suunnittelun perusta. Muodon optimoinniksi kutsutaan prosessia, missä poikkileikkausta muutetaan koon lisäksi myös muodoltaan koko sen pituudelta. Topologiaoptimoinnissa rakenteeseen lisätään tyhjiöitä niihin kohtiin, missä on turhaa materiaalia. Kuvassa 13 on esitetty eri optimointiluokat, missä kohta a) vastaa mitoitusoptimointia, b) muodon optimointia ja c) topologiaoptimointia. (Lange et al. 2021. s. 144–145.)



Kuva 13. Optimoinnin eri luokat: a) mitoitusoptimointi, b) muodon optimointi ja c) topologiaoptimointi. (Lange et al. 2021. s. 146.)

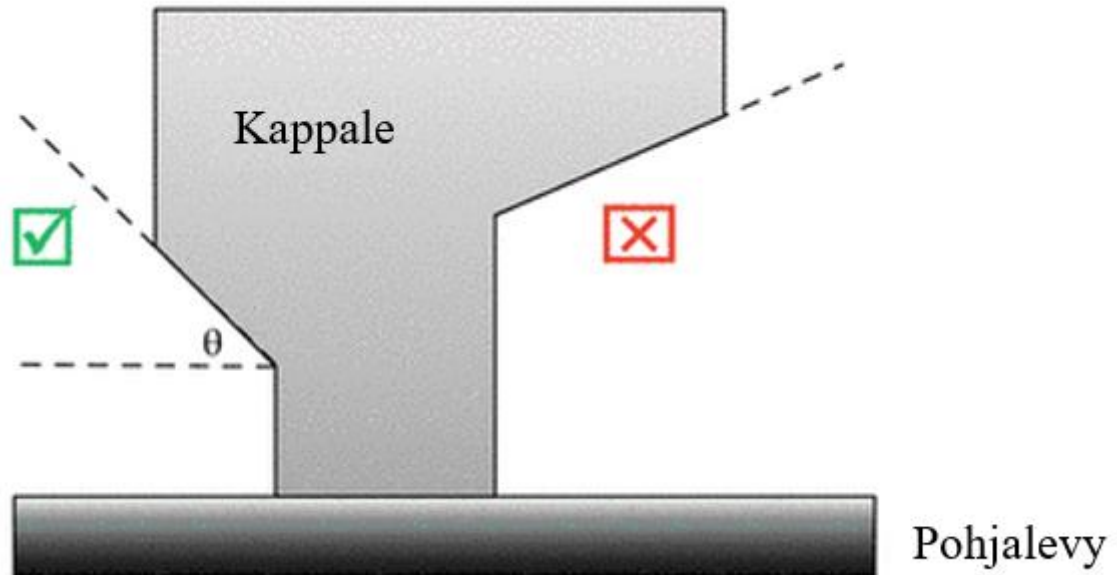
Vaikka ajan saatossa topologinen optimointi on kehittynyt eri suuntiin, on sen perusidea pysynyt samana. Sigmund & Maute (2013) mukaan topologisen optimoinnin tarkoitus on antaa vastaus yhteen suunnittelun peruskysymykseen: kuinka sijoittaa materiaali määrättyyn suunnittelualueeseen siten, että rakenteellinen suorituskyky säilyy? Eli toisin sanoen, komponentin suunnittelua niin, että kaikki turha materiaali on poistettu tinkimättä rakenteellisista ominaisuuksista, kuten lujuudesta ja kestävyydestä. Kuvassa 14 nähdään päätylevyn liitos, sen optimoiminen topologian avulla sekä WAAMilla valmistettu liitoskomponentti. Siitä myös huomataan, kuinka topologisen optimoinnin perusidea on toteutunut käytännössä.



Kuva 14. Topologinen optimointi. (Lange et al. 2021. s. 145.)

Kun valmistetaan komponentteja WAAMilla, on myös otettava huomioon menetelmän asettamat rajoitukset. Topologisessa optimoinnissa on tärkeää ymmärtää, minkälaisia rakenteita ja muotoja voidaan WAAM-menetelmällä valmistaa. Yleisesti lisäävässä valmistuksessa on rakenteellisia muotoja, jotka aiheuttavat ongelmia valmistuksessa. Ulkonema, josta englannin kielellä käytetään nimeä ”overhang”, on yksi valmistusta rajoittava muoto. Se, miten

ulkonema vaikuttaa tulostusprosessiin, on riippuvainen sen kulmasta pohjalevyyn osoittavan pinnan ja pohjalevyn välillä. Tyypillinen esimerkki tästä on esitetty kuvassa 15, mistä nähdään hyväksyttävän rajan alittava ja ylittävä kulma. (Van De Ven et al. 2021. s. 95.)



Kuva 15. Ulkoneman eli "overhang" kulman määritelmän, sekä periaatteellisella tasolla on esitetty valmistuksellisesti sallittu ulkonema ja ei-sallittu ulkonema. (Muok. Van De Ven et al. 2021. s. 95.)

Joissain lisäävän valmistuksen prosesseissa käytetään tukimateriaalia ulkonemien valmistamisen mahdollistamiseksi, kuitenkin niin, että tukimateriaali poistetaan jälkikäsittelyn yhteydessä. WAAM-menetelmässä tämä pystytään välttämään siten, että pohjalevy jolle komponentti tulostetaan, on kiinnitetty yksi- tai useampiakseliseen kappaleenkäsittelyjärjestelmään. Tämän avulla voidaan tulostus- eli syöttösuuntaa vaihtaa, jolloin kuvan 15 kaltaiset ulkonemat eivät ole ongelma. (Rodrigues et al. 2019. s.21–22.)

Komponentin seinämänpaksuus on yksi huomioon otettava tekijä suunnittelussa. Posch et al. (2017. s. 875.) mukaan seinämänpaksuuteen vaikuttaa hitsauksen lämmöntuonti ja lisäainelangan paksuus. Mitä pienempi lämmöntuonti ja ohuempi lisäainelanka sitä ohuempaan seinämänpaksuuteen päästään. Nämä taas vaikuttavat yleisesti siihen kuinka suuri käytettävä syöttönopeus on. Tästä voidaan päätellä, että ohutseinämä on kalliimpaa valmistaa kuin paksuseinämä, koska syöttönopeus hidastuu mitä ohuempaa seinämänpaksuutta valmistetaan, jolloin myös valmistukseen käytettävä aika ja valmistuskustannukset nousevat.

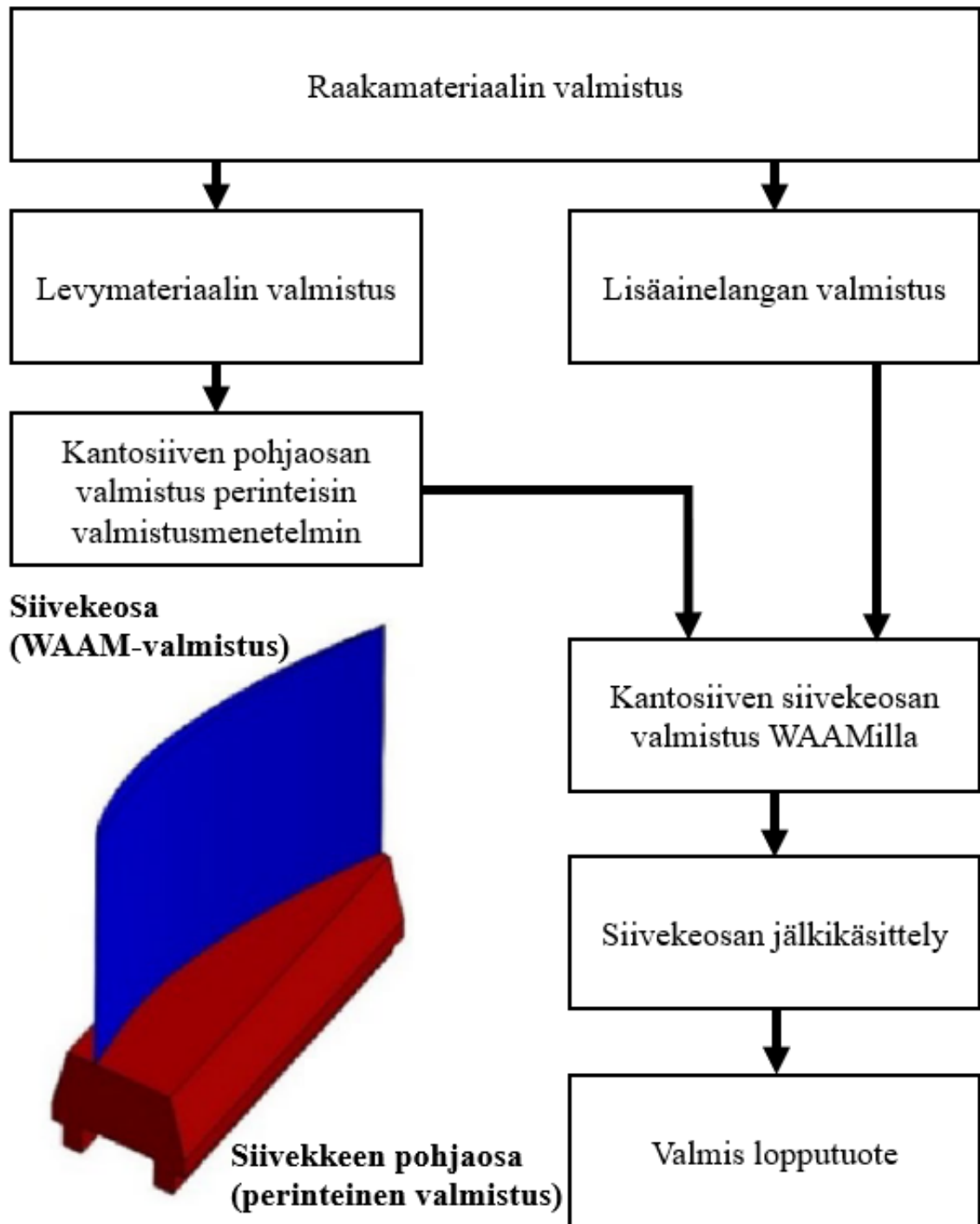
Kohdeyrityksen laitteistolla päästään minimissään 4 mm:n seinämänpaksuuteen. (Varis 2023 & Posch et al. 2017. s. 875.)

Ulkonemasta rajoittavana tekijänä voidaan myös päätellä, että erilaisten reikien valmistaminen WAAMilla on valmistusta rajoittava tekijä. Ongelmaa voidaan ratkaista samalla tavalla kuten ulkoneman tapauksessa, eli kiinnittämällä WAAMilla valmistettava komponentti yksi- tai useampiakseliseen kappaleenkäsittelyjärjestelmään. Kuten jo edellä on mainittu, komponentin seinämän paksuus on otettava huomioon suunnittelussa. Diegel et al. (2020. s. 43.) mukaan minimi reiänkoko on suoraan verrannollinen komponentin seinämänpaksuuteen, tulostuskerroksen paksuuteen, tulostussuuntaan kuin myös käytettävään tulostusmenetelmään.

2.2.5 Hybridivalmistus ja WAAM

Hybridivalmistus tunnetaan myös termillä integroitu valmistus. Tämä osio käsittelee hybridivalmistusta hyödyntäen WAAM-menetelmää. WAAM-valmistuksessa tarvitaan tulostusalusta, minkä päälle komponentti WAAM-menetelmällä tulostetaan. Kun tulostusprosessi on loppu, on komponentti irrotettava pohjalevystä eli tulostusalustasta. Hybridivalmistuksen ideana on valmistaa komponentti siten, että lopullisen komponentin jotain osaa käytetään tulostusalustana. Tätä valmistusstrategiaa hyödyntämällä vältetään tilanne, missä WAAMilla valmistettu komponentti pitäisi irrottaa tulostusalustasta. Tällä tavoin on mahdollista yhdistää eri valmistusmenetelmien parhaita puolia komponentin valmistuksessa. WAAMia voidaan tässä tapauksessa käyttää kompleksisten piirteiden valmistukseen ja perinteistä valmistusta yksinkertaisempien osien valmistukseen. (Priarone et al. 2019. s. 37.)

Kuvassa 16 esitetään kantosiivekkeen hybridivalmistusprosessi, missä on noudatettu edellä mainittuja hybridivalmistuksen periaatteita. Yksinkertaisempi siivekkeen pohjaosa on valmistettu perinteisin valmistusmenetelmin ja kompleksisempi siivekeosa on valmistettu WAAMilla. Kun pohjaosaa ollaan komponentissa käytetty tulostusalustana, ei WAAMilla valmistettua siivekeosaa tarvitse irrottaa pois tulostusalustana käytetystä pohjaosasta. Campatelli et al. (2019. s. 1–11.) tutkimuksen tulokset osoittavat myös kyseisen komponentin kohdalla sen, että käytettäessä hybridivalmistusta perinteisen valmistuksen sijasta, säästetään materiaalia sekä energian kulutusta. (Campatelli et al. 2019. s. 1–11.)

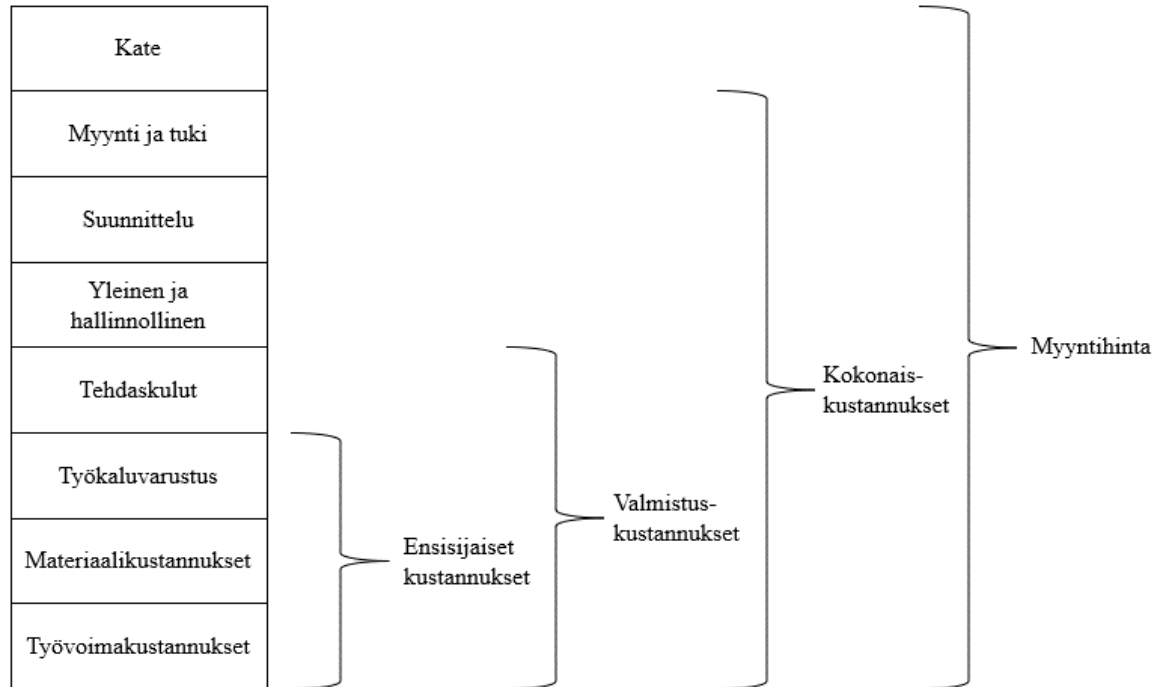


Kuva 16. Kantosiiven hybridivalmistusprosessi. (Muok. Campatelli et al. 2019. s. 3.)

2.3 Valmistuskustannukset

Valmistavassa teollisuudessa, kuten tässä tapauksessa selluteollisuuden pesulaitteiden konepajavalmistuksessa, komponentin tai kokoonpanon kustannukset koostuvat monesta eri

asiasta. Kuvassa 17 esitetään, mistä eri osuuksista esimerkiksi komponentin kustannukset koostuvat. (Chang. 2013. s. 243.)

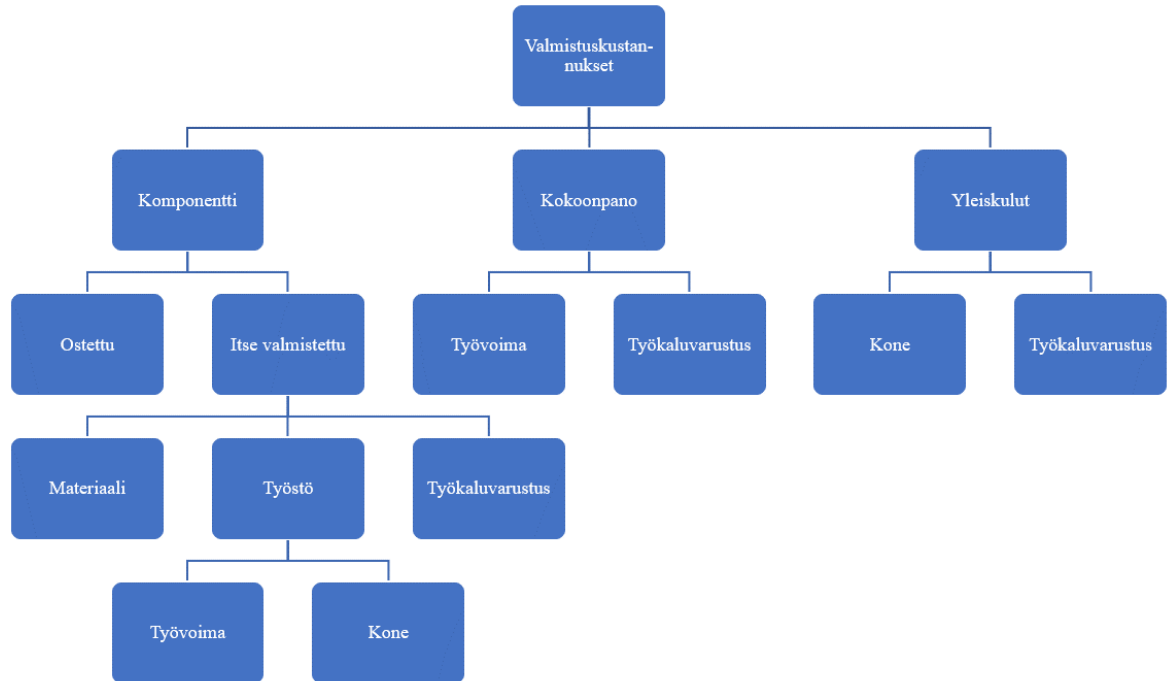


Kuva 17. Lopputuotteen kustannuksien koostumus. (Muok. Chang. 2013. s. 243.)

Chang, K. (2013. s. 243.) mukaan valmistuskustannukset koostuvat pääasiassa työvoima- ja materiaalikustannuksista sekä työkaluvarustuksesta. Kustannuksiin lasketaan mukaan myös tehdaskulut. Tässä tapauksessa, se tarkoittaa esimerkiksi myös konepajan ylläpitokustannuksia ja laitekustannuksia. Kun valmistuskustannuksiin lisätään yleiset ja hallinnolliset kulut, suunnittelukustannukset sekä myynnin ja tuen toiminnan kulut, on tuloksena lopputuotteen kokonaiskustannukset. Yleiset ja hallintokulut koostuvat muun muassa poistoista, veroista, toimistohenkilöiden palkkakuluista ja hankinnasta. Suunnittelukustannuksia ovat taas esimerkiksi tuotekehitys-, suunnittelu-, prototyyppi- ja testikulut. Kun kaikkiin edellä mainittuihin kuluihin lisätään kate, on lopputuloksena tuotteen myyntikustannukset. Yleiset ja hallinnolliset-, suunnittelu- sekä myynti- ja tukikulut voidaan luokitella tässä tapauksessa yleiskustannuksiksi. Työn rajauksen mukaisesti keskitytään tutkimaan lopputuotteen valmistuskustannuksia. (Chang. 2013. s. 243.)

Kuvassa 18 on esitetty, mistä lopputuotteen valmistuskustannukset koostuvat. Yleisesti valmistuskustannukset koostuvat komponentti-, kokoonpano- ja yleiskustannuksista. Tässä

osiossa keskitytään itse valmistettujen komponenttien kustannuksiin, jolloin alihankitut komponentit jäävät tarkastelun ulkopuolelle.



Kuva 18. Valmistuskustannuksien erottelu. (Muok. Chang, 2013. s. 252.)

Itse valmistetun komponentin kustannukset on eritelty materiaali-, työstö- ja työkaluvarustuskustannuksiin. Työstöllä tässä tapauksessa tarkoitetaan komponentin valmistusvaihetta, esimerkiksi koneistusta. Itsevalmistetun komponentin kustannukset C_u voidaan laskea seuraavasti:

$$C_u = C_p + C_t + C_{mat}, \quad (1)$$

missä C_p on työstökustannukset, C_t on työkaluvarustuskustannukset ja C_{mat} on materiaalikustannukset. Kaikkien edellä mainittujen kustannuksien yksikkö on euro (€). (Chang, 2013. s. 253.)

Materiaalikustannuksien laskeminen riippuu yleisesti käytettävästä valmistusmenetelmästä. Yleisesti materiaalikustannukset C_{mat} voidaan laskea kahdella seuraavalla tavalla:

$$C_{mat} = W_o R_{mat} - (W_o - W_f) R_s, \quad (2)$$

$$C_{mat} = V_w \rho R_{mat}, \quad (3)$$

missä W_o on työstettävän komponentin materiaalin alkuperäinen massa kilogrammoina (kg), R_{mat} on työstettävän komponentin materiaalin hinta euroissa kilogrammaa kohden (€/kg), W_f on valmiin komponentin eli lopputuotteen massa kilogrammoina (kg), R_s on hukkaan menevän materiaalin hinta euroissa kilogrammaa kohden (€/kg), V_w on valmiin komponentin eli lopputuotteen tilavuus kuutiometreinä (m^3) ja ρ on käytetyn materiaalin tiheys kilogrammoina kuutiometriä kohden (kg/m^3). Erona kaavoissa 2 ja 3 on se, että ensimmäistä käytetään yleisellä tasolla materiaalikustannusten laskemiseen ja jälkimmäistä käytetään, kun käytettävänä valmistusmenetelmänä on koneistaminen. (Chang. 2013. s. 246)

Työkaluvarustuksella tarkoitetaan komponentin valmistukseen käytettäviä työkaluja, kuten teriä, muotteja ja kiinnittimiä. Työkaluvarustuksen kustannukset voivat vaihdella valmistustavan mukaan. Esimerkiksi muottia vaativissa valmistusmenetelmissä työkaluvarustuskustannuksien osuus kasvaa. Työkaluvarustuksen kustannukset C_t koneistuksessa voidaan laskea seuraavasti:

$$C_t = C_{tool} \frac{t_c}{T_t}, \quad (4)$$

missä C_{tool} on työkalun hinta euroissa (€), t_c on prosessiin kuluva aika minuuteissa (min) ja T_t on työkalun kestoikä minuuteissa (min). Vaikka kaava 4 esittää miten koneistuksen työkaluvarustuskustannukset C_t lasketaan, voi sitä sen yksinkertaisuuden puolesta soveltaa myös muihin prosesseihin. Kaavassa kuitenkin lasketaan työkalun hinnan sekä prosessiin kuluvan ajan ja työkalun kestoiän suhteen tuloa. Tästä voidaan päätellä, että työkaluvarustuskustannuksiin vaikuttavat aika sekä työkalun hinta. Käytettävä valmistusprosessi määrittää taas sen, miten edellä mainitut elementit määritellään. (Chang. 2013. s. 259.)

Valmistuskustannuksia varten on selvitettävä mistä työstön kustannukset koostuvat. Työstön kustannuksiin sisältyy työvoima- ja konekustannukset. Työstön kustannukset C_p voidaan laskea seuraavalla tavalla:

$$C_p = R_p t_{unit}, \quad (5)$$

missä R_p on työstöhinta euroissa tuntia kohden (€/h), ja se muodostuu koneen tuntihinnan ja välittömän työvoimakustannuksen summasta mukaan lukien yleiskustannukset. t_{unit} on prosessiin kulunut kokonaisaika tunneissa (h). Koneen tuntihintaan vaikuttaa koneen ostohinta, takaisinmaksuaika, työvuorojen lukumäärä ja koneen käyttöaika yhden työvuoron aikana.

Prosessiin kuluneeseen kokonaisaikaan eli yksikköaikaan vaikuttaa valmistelu-aika, käynti-aika ja toimimattomuusaika. (Chang. 2013. s. 253.)

Chang, K. (2013. s. 269.) mukaan kokoonpanon kustannukset C_a voidaan laskea seuraavasti:

$$C_a = C_p + C_t, \quad (6)$$

missä C_p on työstökustannukset euroissa (€), ja se on riippuvainen käytetystä ajasta, koneen tuntihinnasta, työvoiman tuntihinnasta ja yleiskustannuksista. C_t kuvaa työkaluvarustuskustannuksia euroissa (€). (Chang. 2013. s. 269.)

Yhteenvetona jo mainituista kaavoista voidaan huomata, että yksi vaikuttavimmista tekijöistä komponentin valmistuskustannuksiin on kulunut aika ja sen muutoksella voidaan helpoin vaikuttaa kokonaiskustannuksiin. Kun esimerkiksi koneen tuntihinta ja työvoimakustannukset yhdessä muodostavat työstön tuntihinnan, voidaan kokonaiskustannuksiin vaikuttaa paljon sillä, kuinka kauan valmistus ajallisesti kestää. Käytännössä valmistusprosessista riippumatta on koneelle, työntekijälle ja työkaluvarustukselle aina jokin tuntihinta, kun sitä käytetään ja jota on vaikea muuttaa. Yhteenvetona voidaankin todeta, että valmistuskustannuksiin vaikuttavat eniten käytetty materiaali, käytettyjen prosessien tuntihinta ja valmistukseen käytetty kokonaisaika.

2.4 Hitsauskustannukset

Tämä kappale käsittelee hitsauskustannuksia sekä sitä, mistä ne muodostuvat. WAAM-prosessi toteutetaan MIG/MAG-hitsauksella, jolloin hitsauskustannusten tarkastelu on tämän työn kannalta tärkeää. Tavoitteena on selvittää, miten kustannukset lasketaan tuotetta tai kiloa kohden. Tällä tavoin pystytään työn myöhemmässä vaiheessa arvioimaan, mitkä ovat tulostettavan komponentin valmistuskustannukset.

Kokonaishitsauskustannukset muodostuvat osakustannusten summasta. Osakustannukset voidaan erotella seuraavasti (Stenbacka. 2011. s. 84.):

- Työkustannukset (suorat palkat, sosiaalikulut jne.): K_{Ty}
- Hitsausainekustannukset (lisäaineet, suojakaasut, hitsausjauheet jne.): K_{Hi}
- Konekustannukset (pääoma jne.): K_{Ko}

- Energiakustannukset (yleensä sähkö): K_{En}
- Kunnossapitokustannukset (huolto, varaosat jne.): K_{Ku}

Kaikissa seuraavaksi esitetyissä kaavoissa lasketaan hitsauskustannuksia hitsiaineen kokonaismäärää kohti euroissa (€). Työkustannukset eli K_{Ty} voidaan laskea seuraavasti:

$$K_{Ty} = (M / T) \times (100 \div e) \times H_{Ty}, \quad (7)$$

missä M on hitsiainemäärä kilogrammoina (kg), T on hitsiaineentuotto kilogrammoina tuntia kohden (kg/h), e on paloaikasuhte prosentteina (%) ja H_{Ty} on operaattorin työtunnin hinta euroissa tuntia kohden (€/h). (Stenbacka. 2011. s. 87.)

Hitsausainekustannukset koostuvat lisäainekustannuksista K_{Li} , suojakaasukustannuksista K_{Su} , hitsausjauhekustannuksista K_{Ja} ja mahdollisista juuritukikustannuksista K_{Ju} . Nämä voidaan laskea seuraavalla tavalla:

$$K_{Li} = M \times (100 / N) \times H_{Li}, \quad (8)$$

$$K_{Su} = (M \times 0,06 \times V \times H_{Su}) / T, \quad (9)$$

$$K_{Ja} = J \times M \times H_{Ja}, \quad (10)$$

$$K_{Ju} = L \times H_{Ju}, \quad (11)$$

missä N on hyötyluku prosentteina (%), H_{Li} on lisäaineen hinta euroissa kilogrammaa kohden (€/kg), V on kaasun virtaus litroissa minuuttia kohden (l/min), H_{Su} on suojakaasun hinta euroissa kuutiometriä kohden (€/m³), J on jauheen ominaiskulutus kilogrammoina lankakiloa kohden (kg/lankakilo), H_{Ja} on hitsausjauheen hinta euroissa kilogrammaa kohden (€/kg), L on hitsauspituus metreinä (m) ja H_{Ju} on juurituen hinta euroissa metriä kohden (€/m). (Stenbacka. 2011. s. 87–88.)

Jotta kokonaishitsauskustannukset voidaan laskea, on selvitettävä mistä kone-, energia- ja kunnossapitokustannukset koostuvat. Kunnossapitokustannukset on usein ilmoitettu kokeusperäisenä arvona, joka on hitsauskohde- ja yritysکوhtainen. Yksinkertaistamisen vuoksi energia- ja kunnossapitokustannukset voidaan ottaa mukaan kustannuslaskelmiin esimerkiksi 4 %:in lisänä muiden kustannusten päälle. Konekustannusten K_{Ko} muodostumista on kuitenkin tässä tapauksessa syytä tarkastella tarkemmin, ja se voidaan laskea seuraavasti:

$$K_{Ko} = (M/T) \times (100/e) \times H_{Ko}, \quad (12)$$

missä H_{Ko} on koneen tuntihinta euroissa tuntia kohden (€/h). Muut kaavan parametrit on esitelty jo aiemmin. (Stenbacka. 2011. s. 89.)

Kaavoissa 7–12 käytetyistä termeistä on kokonaiskuvan muodostamiseksi tärkeä ymmärtää, mitä tietyillä termeillä tarkoitetaan. Näitä ovat muun muassa hitsiaineentuotto (T), hyötyluku (N), paloaikasuhte (e) ja hitsiainemäärä (M). Hitsiaineentuotto on määritelty aikayksikössä hitsiin tuotetun hitsiaineen määränä. Yksikkönä käytetään kilogrammaa tunnissa (kg/h) ja aikana on kaariaika. Yleisesti tällä tarkoitetaan käytetystä lisäaineesta saadun hitsiaineen määrää. Hitsiaineentuotto on riippuvainen hitsausvirrasta, mutta myös hitsausasento, palkotyypistä ja suutinetäisyys vaikuttavat hitsiaineentuottoon. Hyötyluku on hitsiaineentuoton ja sulatusnopeuden suhde. Se siis kertoo kuinka suuri osa kulutetusta lisäainemäärästä muodostaa hyödyllistä hitsiainetta. Paloaikasuhte on kaariajan ja hitsaustyöhön käytetyn kokonaisajan välinen suhde. Hitsiainemäärä kertoo nimensä mukaisesti hitsatun aineen määrän valitussa yksikössä, tässä tapauksessa kilogrammoina. Se voidaan laskea hitsin poikkipinta-alan, hitsin piteuden ja hitsiaineen ominaispainon tulona. Tässä tapauksessa, kun komponentti valmistetaan WAAMilla, on hitsiainemäärä yhtä kuin komponentin paino ja se voidaan myös tässä tapauksessa laskea komponentin tilavuuden ja hitsiaineen ominaispainon tulona. (Stenbacka. 2011. s. 68–73.)

Jos hitsausaine-, energia- ja kunnossapitokustannukset jätetään huomiotta, voidaan yksinkertaistaen esittää, että kokonaishitsauskustannuksia määrittää tekijä k . Tämä voidaan laskea seuraavalla tavalla:

$$k = (M/T) \times (100/e). \quad (13)$$

Kaavan 13 parametreistä ja niiden yksiköistä voidaan huomata, että kustannuksia esittävän tekijän k yksikkönä on aika tunteina (h). Tästä voidaan päätellä, että kokonaishitsauskustannukset ovat suoraan riippuvaisia tehtävääjasta eli prosessiin kuluneesta ajasta. On myös tärkeää huomata, että lyhyempi tehtävääaika tarkoittaa myös pienempiä kone- ja energiakustannuksia. Koska kokonaishitsauskustannukset ovat riippuvaisempia edellä mainituista tekijöistä, voidaan niitä pienentää vähentämällä hitsiainemäärää, nostamalla hitsiaineentuottoa ja nostamalla paloaikasuhdetta. (Stenbacka. 2011. s. 90.)

Tässä työssä kustannuksia tarkastellaan WAAM-prosessin näkökulmasta. Hitsiainemäärä on riippuvainen komponentin tilavuudesta, eli kuinka paljon komponentin valmistamiseen

tarvitaan materiaalia. Tähän voidaan vaikuttaa suunnitteluvaiheessa. Oleellista on kuitenkin suunnitella komponentti niin, että siihen käytettäisiin mahdollisimman vähän materiaalia säilyttäen komponentille asetetut ominaisuudet.

Kaariaika eli tehtäväaika on hitsiainemäärän ja hitsiainetuoton suhde. Kaariaika vaikuttaa hitsiaineentuottoon kuin myös paloikasuhteeseen ja näin olleen kustannuksia määrittävään tekijään k . (Stenbacka. 2011. s. 68–71.) Tämän takia onkin tärkeää selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat kaariaikaan ja tässä tapauksessa WAAM-prosessin kaariaikaan. WAAM-prosessissa kaariaikaan vaikuttavat käytetty jännite ja virta, langan syöttönopeus ja sen kulma, hitsausnopeus ja suunniteltu liikerata. Näitä optimoimalla voidaan kaariaikaa lyhentää, mutta vastaavasti niiden optimoiminen kaariajan lyhentämiseksi voi näkyä komponentin laadun heikkenemisenä. Niillä on esimerkiksi vaikutusta hitsin laatuun, mikä taas vaikuttaa komponentin mekaanisiin ominaisuuksiin kuin myös pinnan laatuun. (Srivastava et al. 2023. s. 9–12.)

2.5 Aiempi tutkimus

Tässä osiossa on tarkoitus tarkastella työhön liittyvää aiempaa tutkimusta. Ensimmäisenä käydään läpi ohjelmat, joilla arvioidaan komponenttien soveltuvuutta 3D-tulostukseen. Toisena vaiheena on lyhyesti käydä läpi kirjallista aineistoa, kuten tieteellisiä julkaisuja ja lehtiartikkeleita.

2.5.1 Ohjelmat

Etteplan AMOTool on pilvipohjainen sovellus, minkä avulla pyritään arvioimaan 3D-tulostuksen valmistuskustannuksia. Sovellus on käytettävissä ilmaiseksi ja on tarkoitettu arvioimaan metallien jauhepetitulostuksen kustannuksia. Sen tarkoituksena on vastata seuraaviin kysymyksiin. (Etteplan. 2023.)

- Milloin valmistusmenetelmäksi pitäisi valita metallien 3D-tulostus?
- Kuinka paljon komponentti maksaisi, jos se 3D-tulostettaisiin?
- Onko komponentin uudelleensuunnittelu järkevä valinta?

- Millaista sijoitetun pääoman tuottoa (ROI) voidaan odottaa?
- Kuinka komponenttia pitäisi uudelleen suunnitella jauhepölytöstystä varten?
- Miten materiaalivalinta vaikuttaa komponentin hintaan?

AMOTools-sovellus toimii siten, että ensimmäisenä tehtävänä on syöttää tarvittavat parametrit sovellukseen. Syötettyjen parametrien avulla sovellus pyrkii vastaamaan edellä mainittuihin kysymyksiin. Tämän työn kannalta on tärkeää käydä parametrit läpi, vaikkakin käytettävä 3D-tulostus menetelmä ei ole sama kuin WAAM. Tuloksien perusteella saadaan suuntaviivoja tässä työssä käytettäville parametreille. Jotta sovelluksen tuloksia voitaisiin tarkastella, on tarvittavat parametrit syötetty sovellukseen ja nämä on esitelty taulukossa 1. (Etteplan. 2023.)

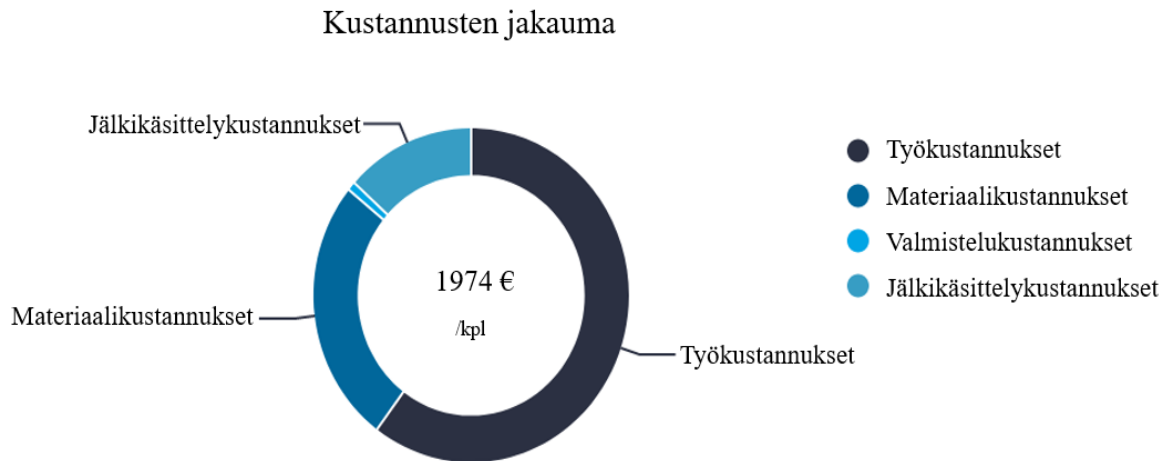
Taulukko 1. Etteplan AMOTools-sovelluksen parametrit. (Etteplan. 2023.)

Etteplan AMOTools	
Parametri	Arvo
Arvioitu komponentin korkeus	100 mm
Arvioitu komponentin tilavuus	500 cm ³
Komponentin kompleksisuus	1,2 (keskiarvo)
Konetyyppi	1-laserinen kone
Materiaali	Ruostumaton teräs, tuottava
Alustalle mahtuvien komponenttien lukumäärä	4 kpl
Kerrosten lukumäärä	3 kpl
Arvioitu tukirakenteen määrä	10 %
Arvioitu jälkikäsittelyn kustannukset	200 €/kpl
Arvioitu vuotuinen tuotantomäärä	100 kpl
Tavoitehinta	1200 €

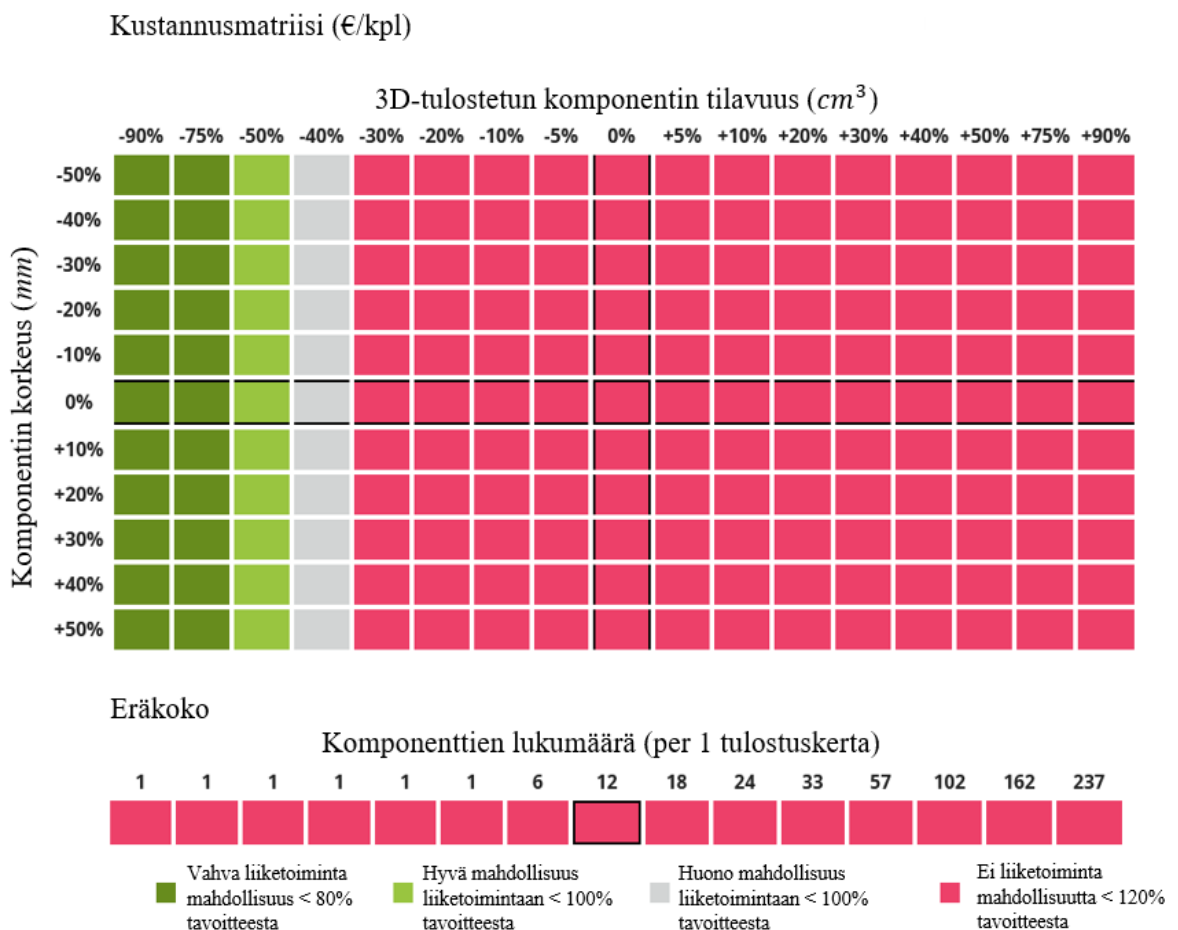
Komponentin kompleksisuudella tarkoitetaan, kuinka monimutkainen suunniteltu komponentti on. Arvo voidaan valita 1–2 väliltä. Sovelluksen mukaan arvoa 1 vastaa

yksinkertainen kuutio, arvoa 1,2 standardi komponentti ja arvoa 2 erittäin kompleksinen komponentti. Konetyypiksi valitaan kahdesta vaihtoehdosta ensimmäinen. Konetyypit eroavat alustalevyn koon ja tulostusnopeuden suhteen. Materiaalivaihtoehtoja on yhteensä 7. Ruostumattomasta teräksestä voidaan valita joko tuottava tai laadukas. Erona näillä on se, että jos ruostumattomasta teräksestä valitaan vaihtoehto laadukas, on tulostuksen pinnanlaatu parempi kuin vaihtoehdolla tuottava, kun taas jälkimmäisellä vaihtoehdolla tulostus on korkeamman tuottavuuden eli tulostusnopeuden takia nopeampaa. Sijoittelun avulla määritetään se, kuinka monta komponenttia voidaan tulostaa yhdellä tulostuskerralla. Taulukon 1 kohtien ”Alustalle mahtuvien komponenttien lukumäärä” ja ”Kerrostien lukumäärä” avulla määritetään, kuinka monta komponenttia voidaan tulostaa yhdellä kertaa. Ensimmäisessä määritetään, kuinka monta komponenttia voidaan sijoittaa tulostusalustalle ja toisessa se, kuinka moneen kerrokseen vertikaalisesti nämä voidaan sijoittaa. Tavoitehinnalla tarkoitetaan sitä hintaa, mitä komponentin valmistaminen on aikaisemmin maksanut. (Etteplan. 2023.)

Kuvassa 19 esitetään, miten kustannukset ovat jakautuneet yhdelle komponentille. Kuvassa 20 esitetään, mikä on komponentin liiketoimintapotentiaali. Kustannusmatriisin tarkoituksena on näyttää sovelluksen käyttäjälle, milloin komponentti on järkevä valmistaa 3D-tulostuksella. Valituilla parametreilla kustannusmatriisi näyttää, että komponentin tilavuutta tai korkeutta muuttamalla voidaan päästä tilanteeseen, milloin liiketoiminnallisesta näkökulmasta komponentti on järkevä valmistaa 3D-tulostamalla. Eräkoon suhteen ei komponentin liiketoiminnallista potentiaalia voida parantaa, kuten kuvasta 20 nähdään. Eräkoko voidaan muuttaa siten, että yhteen tulostukseen sijoitetaan enemmän komponentteja lukumäärällisesti. Tämä taas tarkoittaa komponentin uudelleensuunnittelua ja sen ulkomittojen pienentämistä tai komponentin sijoittelun suunnittelua paremmin tulostusalustalle. (Etteplan. 2023.)



Kuva 19. Kustannusten jakauma Etteplan AMOTools-sovelluksessa. (Muok. Etteplan 2023.)



Kuva 20. Kustannusmatriisi ja eräkoon arviointi Etteplan AMOTools-sovelluksessa. (Muok. Etteplan 2023.)

SelectAM on verkkopohjainen sovellus, joka tarjoaa käyttäjälle SelectAM (2023) mukaan ”Täydellisen osien tunnistus- ja uudelleensuunnittelu ratkaisun valmistajille, jotta lisäävän valmistuksen käyttö voidaan valjastaa täyteen potentiaaliinsa”. Sovellus tarjoaa käyttäjälle seulontaratkaisun, joka voidaan integroida erilaisiin tuotehallintaohjelmistoihin. Sovellus pystyy analysoimaan komponentteja ottaen huomioon esimerkiksi niiden toimitusketjun, teknisen, taloudellisen ja uudelleensuunnittelun potentiaalin. Siinä on ajantasainen tietokanta olemassa olevista 3D-tulostuslaitteista ja tulostettavista materiaaleista sekä sovellus pystyy myös tekemään kustannus- ja hinnoittelusimulaation koneoppimisjärjestelmän avulla. Sovelluksen käytön voi aloittaa jo pelkästään syöttämällä komponentin materiaalin ja painon. Tämä siis vaaditaan minimissään tuloksien saamiseksi. Yhteensä erilaisia parametrivaihtoehtoja, mitä sovellukseen voidaan syöttää, on 22 kappaletta. Sovellukseen voidaan myös ladata suoraan komponenttien 3D-malleja.

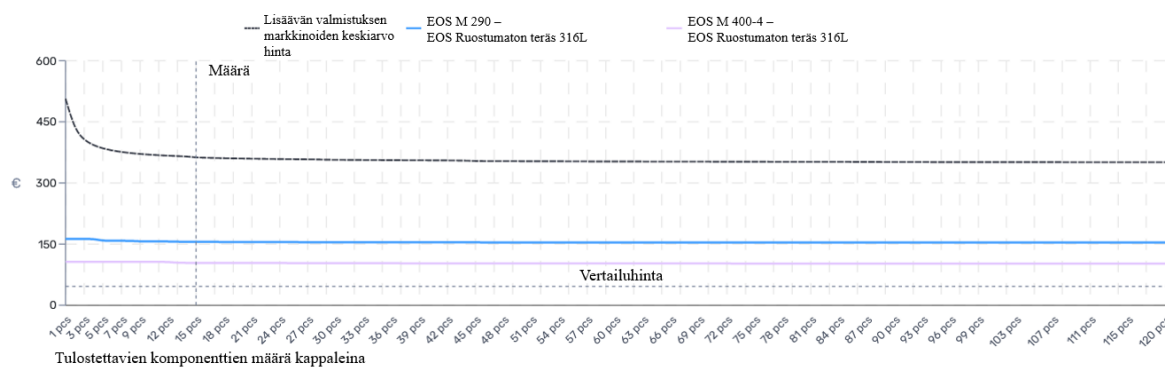
Sovelluksen käyttäminen on riippuvainen siitä, missä muodossa data on syötetty sovellukseen. Tällä tarkoitetaan sitä, onko sovellukseen syötetty pelkästään parametrejä vai 3D-malli. Myös se, kuinka kattava syötetty data on parametrien määrän puolesta, vaikuttaa lopputulokseen. Kummassakin tapauksessa sovelluksen käyttöprosessi noudattaa samanlaista kaavaa, prosessinkulku on esitetty kuvassa 21. Kunnioittaen SelectAM-sovelluksen ehtoja, osa sovelluksen tiedoista, etenkin prosessin kulusta ja käytetyistä parametreistä, on jätetty mainitsematta. (SelectAM. 2023.)



Kuva 21. Prosessin kulku SelectAM-sovelluksessa.

Sovelluksen käytön ensimmäisenä vaiheena on ladata tuotteet sovellukseen eli komponenttien data tai 3D-mallit. Tämän jälkeen sovelluksessa määritetään käytettävät parametrit ja materiaalit, jonka jälkeen sovellus tarkistaa syötetyt tiedot. Toisena vaiheena on tunnistusvaihe, missä sovellus suorittaa karkean arvioinnin, jonka avulla tunnistetaan soveltuvimmat komponentit tarkempaa analyysia varten. Samalla voidaan antaa parametreille painoarvoja, mitkä vaikuttavat sovelluksen tekemään analyysiin. Tämän jälkeen sovelluksesta saadaan ensimmäiset tulokset, missä esitetään muun muassa seuraavat asiat: komponentin valmistuskustannukset vaihtoehtoisin valmistusmenetelmin, keskiarvohinta valmistettuna lisäävällä valmistuksella, keskiarvovalmistuskustannukset lisäävällä valmistuksella sekä

kriteeripisteet asteikolla 0–100. Tämän jälkeen siirrytään kolmanteen vaiheeseen eli analyysivaiheeseen, missä sovellus analysoi syötetyn datan. Neljännessä eli arviointivaiheessa suoritetaan komponenttien arviointi sekä esitetään arvioinnin tulokset. Tässä vaiheessa voidaan sovellukseen syöttää tietoja komponentin tuotantomäärästä, lisäkustannuksista ja jälkikäsittely määrästä, jonka jälkeen sovellus antaa ehdotuksen, millä laitteella komponentti olisi järkevä valmistaa. Tämän lisäksi sovellus kertoo seuraavia valmistukseen liittyviä tietoja: valmistuskustannukset, tarjoushinta, komponentin sijoittelutiheyden laitteeseen, maksimieräkoon, valmistusajan sekä tukirakenteiden määrän. Myös hinnoista, kuten valmistuskustannuksista laitteen mukaan, sovellus antaa kuvaajan, mikä esitetään kuvassa 22. (SelectAM. 2023.)



Kuva 22. Hinta- ja kustannuskuvaaja SelectAM-sovelluksessa. (Muok. SelectAM. 2023.)

Jos sovellukseen on ladattu 3D-malli, niin sovellus voi tehdä myös uudelleensuunnittelu-arvioinnin. Uudelleensuunnittelu-arviointi antaa käyttäjälle arvion, missä esitetään hinnan muutos, kun komponentin tilavuutta pienennetään uudelleensuunnittelun avulla. Viimeinen vaihe on tuloksien esittely. Jos dataa tai 3D-malleja on syötetty sovellukseen enemmän kuin yhden komponentin verran, on viralliset lopputulokset kattavammat. Tuloksissa esitetään seuraavat asiat: (SelectAM. 2023.)

- Kuinka moni komponentti voidaan valmistaa 3D-tulostamalla?
- Kuinka monen komponentin kohdalla voidaan tehdä säästöjä kustannuksissa tai on valitun kriteerin mukaan järkevä valmistaa 3D-tulostamalla?
- Mitkä ovat mahdolliset vuosittaiset säästöt?
- Komponenttien määrä, joilla voidaan lyhentää läpimenoaikaa.

- Komponenttien määrä, jotka voidaan valmistaa omalla laitteistolla.
- Komponenttien määrä, joista puuttuu dataa analyysin tekemiseksi.

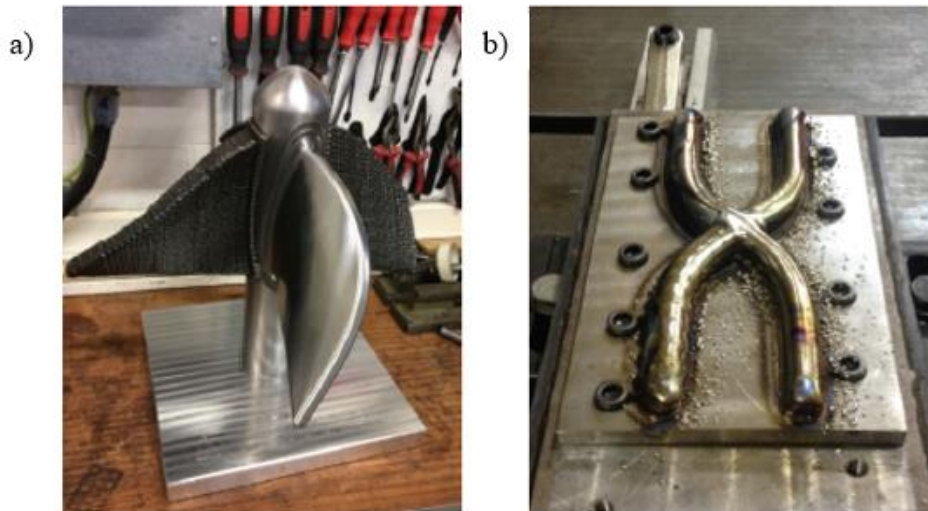
2.5.2 Tieteelliset julkaisut

Huff et al. (2019. s. 137–142.) ovat metallien lisäävän valmistuksen lehteen kirjoittaneet artikkelin siitä, miten valitaan sopivia komponentteja lisäävän valmistuksen menetelmiin. Artikkelissa on painotettu komponentin valinnassa seuraavia asioita:

- Komponentin kompleksisuus. Jos komponentti voidaan koneistaa yhdellä kertaa kolmiakselisella CNC-koneella, ei komponentissa todennäköisesti ole potentiaalia 3D-tulostukselle.
- Komponentin uudelleensuunnittelu. 3D-tulostaminen vaatii yleensä komponentin uudelleensuunnittelua, joten on tärkeää suunnitella se siten, että maksimoidaan hyödyt käytettävästä 3D-tulostusmenetelmästä. On selvitettävä, voidaanko uudelleensuunnittelulla esimerkiksi vähentää kokoonpanon osia samalla vähentäen käytettävää materiaalia.
- Valmistusaikojen lyhentäminen. 3D-tulostusmenetelmänä ei vaadi työkaluvarustusta, joten aikaa voidaan merkittävästi säästää, kun esimerkiksi asetusaikaa ja työkaluvarustuksen vaihtoja ei tule mukaan valmistukseen.
- 3D-tulostuksella saavutetaan suurimmat hyödyt, kun komponentin eräkkö on pieni tai komponentista on useampi erilainen variaatio.

Cunningham et al. (2017. s. 650–657.) ovat artikkelissa tutkineet kustannusmallia sekä herkkyyksianalyysia WAAM-menetelmälle. Artikkelissa on tutkittu ja vertailtu kustannuksia seuraavien tekniikoiden välillä: WAAM-menetelmä, perinteinen valmistus, EBAM-menetelmä (Electron Beam Additive Manufacturing) ja DMLS-menetelmä (Direct Metal Laser Sintering). Vertailu on tehty kahdelle Ti6Al4V -materiaalista WAAMilla valmistetulle komponentille, mitkä on esitetty kuvassa 23. Artikkelissa todetaankin, että WAAM-menetelmää käyttäen kustannuksissa säästetään verrattuna EBAM-menetelmään 20–45 % ja verrattuna DMLS-menetelmään 69–79 %. Kun WAAM-menetelmää verrataan perinteiseen valmistukseen, on kriittinen piste kustannusten osalta löydetty, kun BTF-luku on 5. Kustannukset

puolittuvat, kun BTF-luku lähestyy kymmentä. BTF tulee sanoista ”Buy-to-Fly”. BTF-luku tarkoittaa komponenttiin käytetyn raaka-aineen ja lopputuotteen painon suhdetta. Jos BTF-luku on esimerkiksi 5, on aihion massa 500 kg ja lopputuotteen massa 100 kg. (Cunningham et al. 2017. s. 652.)



Kuva 23. Ti6Al4V-materiaalista WAAMilla valmistetut komponentit. (Cunningham et al. 2017. s. 653.)

3 Pesulaitteiden komponenttien soveltuvuus WAAM-valmistukseen

Tässä osiossa on tarkoitus seurata kuvassa 1 esitettyä rakennetta ja sen myötä päästä työssä asetettuihin tavoitteisiin. Ensimmäisenä vaiheena on pesulaitteiden komponenttien karsiminen, toisena vaiheena valittujen komponenttien valmistuksen suunnittelu WAAM-menetelmälle ja viimeisenä vaiheena esitetään, miten valitut ja WAAM-valmistukseen suunnitellut komponentit arvioidaan.

3.1 Pesulaitteiden komponenttien karsiminen

Komponenttien karsiminen voidaan jakaa eri vaiheisiin, tässä tapauksessa erillisiin karsintakierroksiin. Koska karsittavia komponentteja on tuhansia, on jokaisella karsintakierroksella oma tavoitteensa. Selkeyttämiseksi tässä vaiheessa komponentilla tarkoitetaan yleisesti osaa tai kokoonpanoa. Jos edellä mainittuja on tarpeen eritellä, käytetään niistä niiden omaa nimeä. Päättävänä on karsia jokaisesta valitusta selluteollisuuden pesulaitteesta 5 komponenttia, joista työn myöhemmässä vaiheessa valitaan jokaisesta valitusta selluteollisuuden pesulaitteesta potentiaalisin ja soveltuvin komponentti uudelleensuunniteltavaksi WAAM-valmistukseen.

Pesulaitteiden komponenttien karsiminen aloitetaan sillä, että ladataan laitteiden osaluettelot AutoDesk Vault Professional -ohjelmasta Excel -ohjelmaan. Kyseiset laitteet ja niiden tiedot on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Karsittavat pesulaitteet ja niiden tiedot.

Karsittavat pesulaitteet		
Pesulaite	Komponenttien lukumäärä	Huomioitavat asiat
DD4070-1X (DD403)	2090	Kotelomallinen tiiviste-elementti
GFF45100-2R (GF124)	727	
PD-90	456	

Taulukon 2 ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty pesulaitteen nimi. Nimen alkukirjaimilla viitataan laitetyyppiin, sen jälkeisillä numeroilla laitteen kokoon. Tämän jälkeen on esitetty DD-pesurissa pesuvaiheiden määrä ja GF-suotimessa imupäiden lukumäärä. DD4070-1X on yksivaiheinen halkaisijaltaan 4 metrin ja pituudeltaan 7 metrin DD-pesuri. GFF45100-2R on kaksivaiheinen halkaisijaltaan 4,5 metrin ja pituudeltaan 10 metrin GF-suodin, missä on kaksi imupäätä ja purkupuoli on käyttöpäästä katsottuna oikealla. PD-90 on painediffusööri, jonka pesualueen pinta-ala on 90 neliometriä. Toinen sarake komponenttien lukumäärä, esittää karsittavien nimikkeiden eli komponenttien lukumäärän. Tämä sisältää kokoonpanot, alikokoonpanot ja yksittäiset osat.

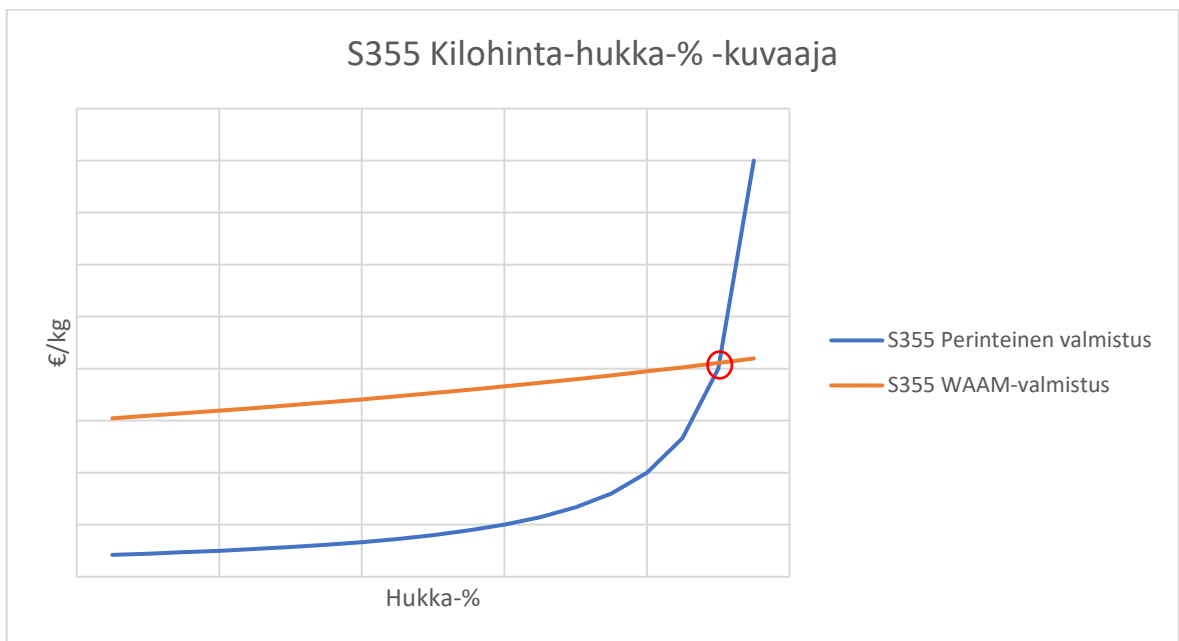
3.1.1 Ensimmäinen karsintakierros

Kun osaluetteloita tuodaan Excel -ohjelmaan, on tärkeää valita oikeat ja ennen kaikkea riittävästi parametrejä ohjelmaan. Excel -ohjelman sarakkeisiin syötetään parametrit, joiden perusteella karsintaa suoritetaan. Karsinnan suorittamisen kannalta tärkeimmät sarakkeet ovat: kappalemäärä, nimi, materiaali, nimiketyyppi, pituus, korkeus, leveys, paksuus ja massa.

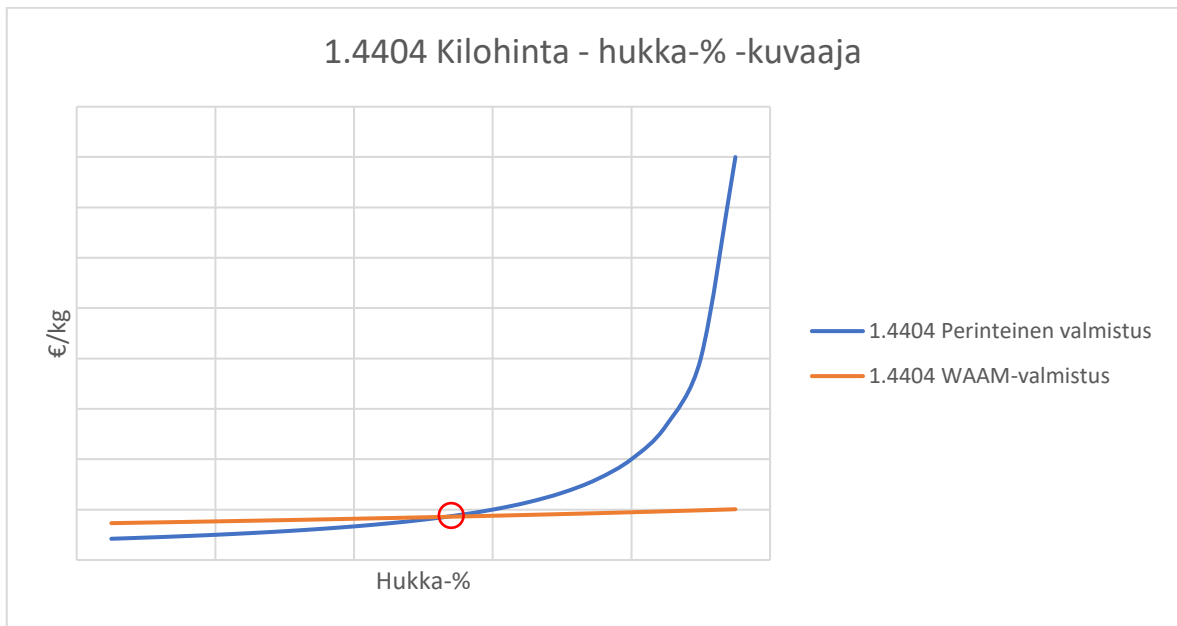
Karsinta aloitetaan nimiketyypin perusteella. Nimiketyypit voidaan jakaa ZSTD-, ZPAR- ja ZENG-osiin tai -kokoonpanoihin. Poikkeuksena pääkokoonpanon ZC-nimiketyyppi. Kaikki ZENG-nimiketyypin omaavat ovat niin sanottuja suunniteltuja komponentteja. ZSTD- ja ZPAR-komponentit ovat taas niin sanottuja kirjastokomponentteja. ZSTD-komponentteja ovat muun muassa pulkit, mutterit ja putket. ZPAR-komponentteja ovat muun muassa erilaiset venttiilit, nipat ja liittimet. Myös esimerkiksi pesulaitteiden vaihteet ovat ZPAR-

komponentteja. Yhteistä ZPAR- ja ZSTD-komponenteille on se, että ne ovat tilaustavaraa, eikä niitä erikseen myöskään kohdeyrityksen sisäisesti suunnitella. Tämä on yksi peruste, miksi ne karsitaan pois WAAMilla valmistettavien komponenttien listalta. On myös hyvä ymmärtää, että niin sanottua tilaustavaraa ei ole lähtökohtaisesti järkevää taloudellisesta näkökulmasta valmistaa WAAMilla.

Tämän jälkeen tarkastellaan materiaalisaraketta. Kaikki komponentit, jotka eivät ole teräsmateriaalia karsitaan pois, koska muita kuin teräsmateriaaleja, kuten muovia tai kumia, ei voida valmistaa WAAMilla. On myös syytä tarkastella eri teräsmateriaaleja ja niiden kustannuksia suhteessa WAAMiin. Kuvissa 24 ja 25 on esitetty S355- ja 1.4404-terästen kilohinta – hukka-% -kuvaajat.



Kuva 24. S355-teräksen kilohinta - hukka-% -kuvaaja.



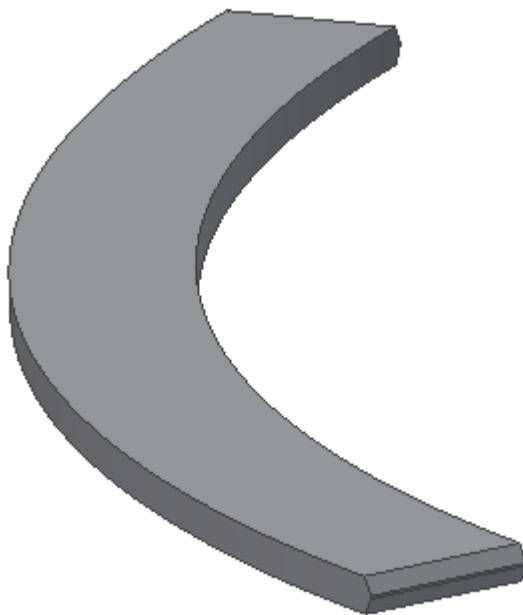
Kuva 25. 1.4404-teräksen kilohinta - hukka-% -kuvaaja.

Kuvien 24 ja 25 kuvaajissa vaaka-akselilla on esitetty hukka-%. Hukka-%:lla kuvataan BTF-suhdetta. Kuvaajaan BTF-luku on muunnettu hukkaprosentiksi, jolloin BTF-lukua 5 vastaava hukkaprosenttiluku on 80 %. Perinteisen valmistuksen osalta hukka-% vastaa kuvaajassa nähtävää lukuarvoa. WAAM-valmistuksen osalta todellinen hukka-% on kuvaajassa esitetyn hukka-% neliöjuuri. WAAM-valmistuksessa hukka-% on noin 0–20 prosentin välillä, riippuen komponentista. Tähän vaikuttaa eniten koneistustarve, mikä on riippuvainen komponentin käyttötarkoituksesta, eli onko koneistukselle tarvetta. Pysty-akselilla esitetty €/kg on lopputuotteen kilohinta. Kilohinta on aihion kokonaispainoa vastaavan hinnan ja lopputuotteen painon suhde. Valmistustavasta ja materiaalista riippuen on hinnoille annettu kertoimet, jotta niiden välinen suhde olisi mahdollisimman lähellä oikeiden hintojen suhdetta.

Kuvissa 24 ja 25 kuvaajasta nähdään punaisella ympyrällä merkitty kohta, missä perinteisen ja WAAM-valmistuksen käyrät risteävät. Risteämiskohdassa ja siitä eteenpäin, WAAM-valmistus olisi kilohinnan perusteella parempi valmistustapa kuin perinteinen valmistustapa. Jotta tähän tilanteeseen päästään, on kuvan 24 perusteella hukkaprosentin oltava 90 %, millöin BTF-luku olisi 10. Tämä toteutuu, jos esimerkiksi aihion paino on 1000 kg ja lopputuotteen paino 100 kg. Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että WAAM-valmistus S355-materiaalille tai muille niin sanotuille mustille teräksille ei ole kustannusten näkökulmasta järkevää, minkä takia kyseiset materiaalit karsitaan pois tässä työssä.

Kuvan 25 kuvaajasta, missä esitetään vertailu 1.4404-materiaalille, nähdään kuinka perinteisen ja WAAM-valmistuksen käyrät risteävät aiemmin kuvaajassa. Myös kilohinnan ero näiden välillä on myös paljon pienempi, vaikka hukka-% olisi alhainen. Tästä voidaan päätellä, että 1.4404-materiaalin ja muiden jaloterästen, kuten 1.4301-teräksen, valmistamisessa WAAMilla on potentiaalia.

Kun kaksi edellistä karsintavaihetta on tehty, voidaan suorittaa ensimmäisen karsintakierroksen seuraava karsintavaihe. Komponenteille on annettu aina komponenttia kuvaava nimi, jonka perusteella suoritetaan karsinta komponenteille. Seuraavaksi on lueteltu esimerkkejä komponenttien nimistä, joiden perusteella komponentteja on karsittu pois: Hollow bar, plate, sheet, tube, pipe, tube/pipe, round bar, hollow section, flange, threaded bar. Listassa olevat nimet vastaavat muun muassa levynpaloja, putkia, laippoja ja kierretankoja. Esimerkkinä tällaisesta komponentista on levynpala, mikä on nimetty nimellä ”plate”. Kuvassa 26 on esitetty osa, mikä on nimetty ”plate” nimellä.



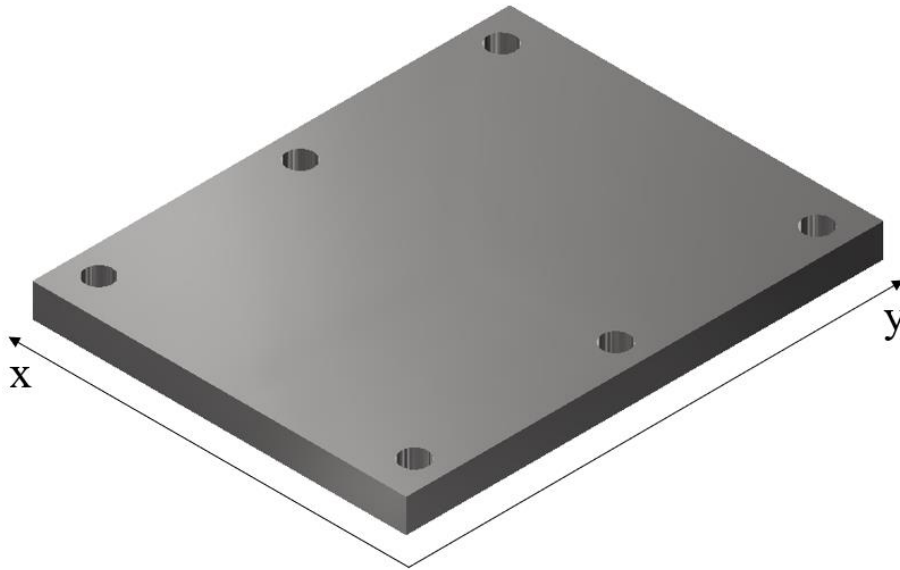
Kuva 26. Esimerkki "plate" -nimisestä komponentista.

Työn kannalta on tärkeää perustella, miksi kuvan 26 kaltainen ja muut sen kaltaiset komponentit karsitaan pois. Tämän takia on tärkeää tutkia, miten esimerkiksi kuvan 26 komponentti valmistetaan perinteisin valmistusmenetelmin ja WAAM-menetelmällä. Voidaan olettaa, että komponentti on leikattu levyaihiosta, joka on komponentin valmistuksen

ensimmäinen vaihe. Seuraavana vaiheena on koneistus, mihin kuuluu esimerkiksi päätyviisteiden tekeminen. Jos sama komponentti valmistettaisiin WAAMilla, on ensimmäisenä työvaiheena komponentin tulostaminen, jonka jälkeen komponentti joudutaan irrottamaan tulostusalustasta. Tämän jälkeen komponentille suoritettaisiin koneistus. Jo aiemmin kirjallisuuskatsauksessa on todettu, että samoin kuin perinteissä valmistusmenetelmissä, myös WAAM-valmistuksessa, kustannuksiin eniten vaikuttava tekijä on aika. Tällä perusteella voidaan todeta, että esimerkiksi kuvan 26 komponentin valmistus on ajallisesti pitempi WAAMilla kuin perinteisin valmistusmenetelmin, mikä osoittaa, että sitä ei ole taloudellisesti järkevä valmistaa WAAMilla. Näillä perustein levynpalat sekä muut edellä mainitun listan mukaan nimetyt komponentit voidaan karsia pois.

Ensimmäisen karsintakierroksen neljäs vaihe on komponenttien karsiminen komponentin massan perusteella. Lähtökohtaisesti kaikki alle yhden kilogramman painoiset komponentit on suodatettu pois. Poikkeuksia on tehty siinä tapauksessa, jos komponentin paino on lähellä yhtä kilogrammaa ja sitä valmistetaan useampi, esimerkiksi 10 kappaletta. Perusteena tälle karsintakriteerille on se, että WAAM-valmistuksessa yksi hyödyistä on WAAMin hitsiaineentuotto eli tuotantonopeus verrattuna muihin 3D-tulostustekniikoihin. Kun komponentin paino ei ole riittävän suuri, WAAM-valmistuksen potentiaalia ja hyötyä tuotantonopeuden suhteen ei päästä ulosmittaamaan, jolloin valmistus ei ole järkevää WAAMilla verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin.

Kuten jo aikaisemmin mainittiin, sarakkeisiin valittiin tiedoiksi komponentin pituus, leveys ja massa. Pituus ja leveys esittävät komponentin päämittoja eli niin sanottuja kanttimittoja. Esimerkki komponentin päämitat x ja y on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Komponentin päämitat x ja y .

Komponentin päämittojen ja massan avulla on tarkoitus laskea suhdeluku, minkä avulla komponentteja karsitaan pois. Tämä voidaan laskea seuraavasti:

$$S = \frac{x \cdot y}{m}, \quad (14)$$

missä S on suhdeluku millimetreinä kilogrammaa kohden (mm/kg), x ja y on päämitat millimetreinä (mm) ja m on komponentin massa kilogrammoina (kg). Suhdelukua voidaan analysoida seuraavalla tavalla:

- Kun päämittojen tulo on matala ja komponentin massa on suuri, suhdeluvusta tulee pieni. Tämä taas tarkoittaa, että komponentissa on todennäköisemmin enemmän materiaalia eli komponentin tilavuus on suurempi, mikä taas tarkoittaa suurempaa potentiaalia WAAM-valmistukselle, koska esimerkiksi topologista optimointia voitaisiin hyödyntää paremmin.
- Kun päämittojen tulo on suuri ja komponentin massa on pieni, suhdeluvusta tulee suuri. Suhdeluvun kasvu tarkoittaa, että komponentti on todennäköisesti seinämänpaksuudeltaan verrattain ohutta materiaalia ja tilavuutta on vähän. Tästä voidaan päätellä, että potentiaali WAAM-valmistukselle laskee, koska esimerkiksi topologisen optimoinnin käytön potentiaali on pienempi, kun suhdeluku on suuri.

Suhdeluvun raja-arvoksi asetettiin 6000. Tämä tarkoittaa, että komponentit, joiden suhdeluku on yli raja-arvon, karsiutuvat pois. Raja on asetettu kokeilemalla ja tarkastelemalla komponentteja raja-arvon molemmin puolin. Päämitat on annettu vain yksittäisille osille, jolloin karsintavaihe ei karsi kokoonpanoja pois. Tällä tavoin varmistetaan, että komponentit, jotka eivät ole saaneet suhdelukua eivät karsiudu pois, jolloin ei myöskään mahdollisesti potentiaaliset ja soveltuvat komponentit WAAM-valmistukseen karsiudu pois. Komponenteista ja tarkemmin ottaen kokoonpanoista karsitaan pois sellaiset, missä samasta kokonaisuudesta on useampi kokoonpano. Esimerkiksi sellaiset kokoonpanot, joista on erikseen hitsaus- ja koneistuskokoonpanot. Näissä tapauksissa potentiaalisempi kokoonpano WAAM-valmistukselle on jätetty karsimatta pois. Myös paineenalaset osat, joita löytyy esimerkiksi painediffusööristä, on karsittu pois.

Edellä mainitut karsintatavat voidaan suorittaa automaattisesti Excel -ohjelmassa. Komponenttien määrä saatiin karsittua 3273 komponentista noin 300 komponenttiin. 300 komponenttia on kuitenkin vielä liian suuri määrä tarkempaa tarkastelua varten. Ensimmäisen karsintakierroksen viimeinen karsintavaihe suoritetaan tarkastelemalla komponenttien potentiaalisuutta. On hyvä muistaa, että työn yhtenä tavoitteena on löytää jokaisesta valitusta sel-luteollisuuden pesulaitteesta yksi komponentti uudelleensuunniteltavaksi ja valmistettavaksi WAAM-menetelmällä. Komponenttien karsimisen tavoitteena on etsiä kaikista potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen. Komponentin potentiaalisuuden arvioiminen on suoritettu arvioimalla komponentin 3D-mallin potentiaalisuutta. Komponentit, joissa ei ole potentiaalisuutta WAAM-valmistukseen, karsiutuvat pois. Kuvassa 28 on esitetty komponentti, joka pystytään valmistamaan WAAMilla, mutta todellinen potentiaali esimerkiksi taloudellisin mittarein on pieni.



Kuva 28. Putkenkannatin.

Kuvan 28 komponentti on putkenkannatin. Putkenkannattimen kokoonpano koostuu aluslevystä, rakenneputkesta ja putkikiinnittimestä. Yksittäin edellä mainittuja osia ei ole järkevää WAAMilla valmistaa, mutta potentiaalisuutta tarkastellaan tässä tapauksessa kyseiselle kokoonpanolle. Kyseisen komponentin kokoonpano koostuu pelkästään hitsaustyöstä. Vaadittu hitsaustyö on ajassa mitattuna pieni, jonka perusteella kyseisellä kokoonpanolla ei ole potentiaalia WAAM-valmistukseen. Seuraavaksi on lueteltu tekijöitä, joilla potentiaalisuutta on mitattu. Potentiaalisuuden mittareita on myös yhdistelty keskenään potentiaalisuuden arvioimiseksi, millä komponentteja on karsittu pois. Potentiaalisuutta on mitattu seuraavilla tekijöillä:

- Komponentin uudelleensuunnittelupotentiaali? Esimerkiksi voidaanko uudelleensuunnittelun avulla vähentää komponentissa tarvittavaa materiaalia. Näin materiaalin määrä vähenisi WAAM-valmistuksessa verrattuna perinteisin valmistusmenetelmin valmistettuun komponenttiin, jossa osa materiaalia on koneistamalla poistettu aihioista.
- Kuinka paljon komponentti vaatii työvaiheita ja kuinka paljon siihen kuluu arviolta aikaa? Esimerkiksi monimutkaisen muotoiset levynpalat, joita ei ole vielä karsittu

pois, eivät perinteisin valmistusmenetelmin ole monimutkaisia valmistaa, joten ne eivät ole potentiaalisia WAAM-valmistukselle.

- Kuinka suuri on jälkikäsittelyn tarve? Jos jälkikäsittely tarve on perinteisillä valmistusmenetelmillä suuri, on tärkeää ottaa huomioon, että myös WAAMilla valmistettu komponentti tarvitsee jälkikäsittelyä. Esimerkiksi kuinka suuri osa komponentin pinta-alasta joudutaan koneistamaan?
- Mikä on arviolta poistetun materiaalin määrä komponentissa? Jos WAAM-valmistuksen avulla voidaan materiaalia säästää verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, on komponentissa potentiaalia WAAM-valmistukselle
- Muodot, mitkä rajoittavat WAAM-valmistusta. Esimerkiksi erilaiset reiät tai seinämänpaksuus. Seinämänpaksuuden raja-arvona käytetään kohdeyrityksen määrittelemää 4 mm:ä.

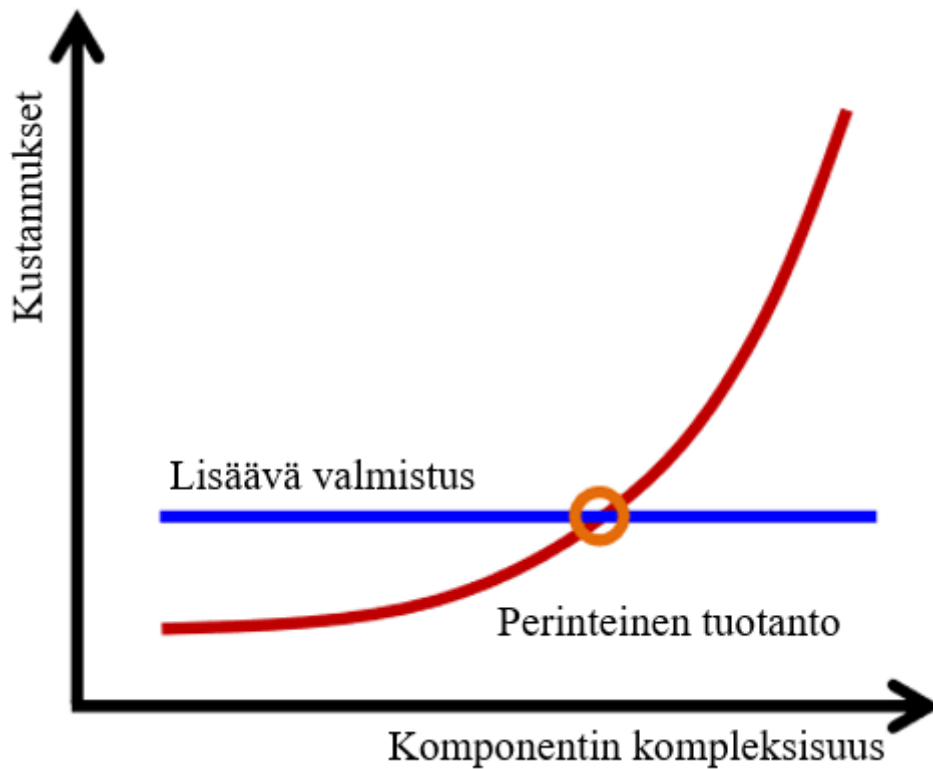
3.1.2 Toinen karsintakierros

Toiselle karsintakierrokselle komponentteja jäi jäljelle tarkasteltavaksi 65 kappaletta, eli hieman yli 20 kappaletta per laite. Toisen karsintakierroksen ensimmäisenä tehtävänä on määrittää parametrit, joiden avulla loput komponentit arvioidaan ja karsitaan. Arviointiparametrien avulla luodaan arviointimatriisi, jota käytetään komponenttien arviointiin. On myös tärkeää muistaa, että arviointiparametrien tarkoitus ei ole itsessään sulkea pois komponentteja, vaan pisteyttää niitä, minkä avulla valitaan potentiaalisimmat komponentit jatkoon tarkempaa tarkastelua varten.

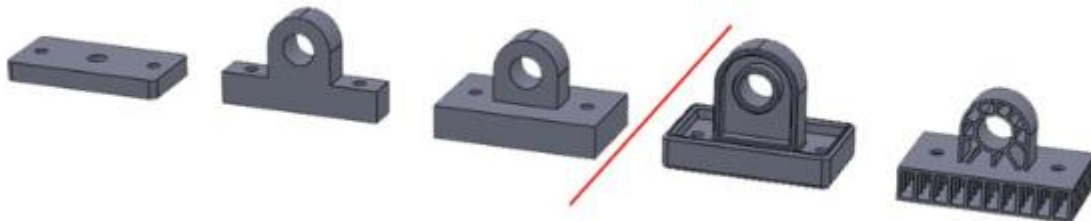
Toisen karsintakierroksen ensimmäisenä vaiheena on jakaa komponentit yksittäisiin osiin ja kokoonpanoihin, sillä niihin tullaan käyttämään eri arviointiparametrejä. Kun arviointiparametrit on päätetty ja määritelty, luodaan niiden avulla arviointimatriisi. Arviointimatriisi toimii siten, että kukin arviointiparametri antaa komponentille pisteet asteikolla 1–5. Arviointimatriisit on esitetty liitteessä 1 ja 2. Kun komponentti on arvioitu, lasketaan annetuista pisteistä keskiarvo, mikä vastaa komponentin arviointitulosta. Tavoitteena on tällä tavoin karsia jokaisen pesulaitteen komponenteista potentiaalisimmat 3–4 komponenttia tarkempaa tarkastelua varten. Seuraavassa listassa esitetään käytetyt arviointiparametrit sekä ilmoitetaan, onko niitä käytetty osien, kokoonpanojen vai molempien arviointiin.

1. Kompleksisuus – osat/kokoonpanot.
2. Osien vähentäminen – kokoonpanot.
3. Työvaiheitten määrä – osat/kokoonpanot.
4. Painon vaikutus – osat/kokoonpanot.
5. Hybridivalmistus – osat/kokoonpanot.

Arviointiparametri numero 1 on komponentin kompleksisuus. Piili et al. (2014. s. 15.) mukaan komponentin geometrian monimutkaistuessa myös valmistuskustannukset perinteisessä tuotannossa kasvavat, kun taas yleisesti lisäävä valmistus mahdollistaa monimutkaisten kuin myös yksinkertaisten komponenttien valmistuksen samoilla kustannuksilla. Kuvassa 29 on esitetty kompleksisuuden vaikutus kustannuksiin. Diegel et al. (2020. s. 44.) mukaan lisäävää valmistusta tulee käyttää silloin, kun komponenttia ei voida tehdä helposti muilla valmistusmenetelmillä. Tämä on perusteltu sillä, että valmistusaika on suoraan verrannollinen kustannuksiin. Koska lisäävä valmistus on hidasta perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna, on yksinkertaiset komponentit halvempaa valmistaa perinteisin valmistusmenetelmin. Kun komponentin kompleksisuus kasvaa, niin myös lisäävän valmistuksen potentiaali kasvaa. Tämä on esitetty kuvassa 30, missä on punaisella viivalla erotettu kompleksiset ja lisäävälle valmistukselle ideaalit komponentit yksinkertaisista perinteiseen valmistukseen sopivista komponenteista (Diegel et al. 2020. s. 44.) Vaikka WAAM-valmistus on lisäävää valmistusta, niin Variksen (2023b.) mukaan WAAMin valmistushintaan vaikuttaa komponentin kompleksisuus ja koko siten, että pieni ja kompleksinen komponentti on kalliimpi valmistaa kuin suuri ja vähemmän kompleksinen komponentti.



Kuva 29. Komponentin kompleksisuuden vaikutus kustannuksiin. (Muok. Piili et al. 2014. s. 15.)



Kuva 30. Komponentin kompleksisuus, missä punaisen viivan oikealla puolella ideaalit komponentit lisäävään valmistukseen. (Diegel et al. 2020. s. 45.)

Komponenttien kompleksisuutta on tässä vaiheessa arvioitu asteikolla 1–5 siten, että 1 vastaa yksinkertaista ja 5 kompleksista komponenttia. Kompleksisuutta on arvioitu komponentin ulkomuodon perusteella. Ulkomuodosta voidaan päätellä, kuinka kompleksinen se on valmistaa perinteisin valmistusmenetelmin ja kuinka kompleksinen se on valmistaa WAAMilla.

Arviointiparametri numero 2 on osien vähentäminen kokoonpanossa. Tällä pyritään tarkastelemaan, voidaanko WAAM-valmistuksen avulla vähentää osien lukumäärää yhdessä kokoonpanossa. Esimerkiksi voidaanko 5 osaa sisältävä kokoonpano valmistaa kokonaan WAAMilla niin, että kokoonpano koostuu vain yhdestä osasta. Tällä tavoin pystytään vähentämään esimerkiksi työvaiheiden määrää kokoonpanossa, jolloin myös kustannukset laskevat. Taulukossa 3 esitetään, millä tavoin osien määrän vähennys kokoonpanosta pisteytetään. Pisteytys tehdään suhdeluvun avulla, jolla alkuperäisten osien määrä jaetaan lopullisella osien määrällä. Jos esimerkiksi 4-osaisen kokoonpanon osien määrä vähennetään yhteen, suhdeluku on 4.

Taulukko 3. Kokoonpanosta vähennettävien osien määrän pisteytys.

Suhdeluku	Pisteet
1	1
2–3	2
4	3
5–6	4
7 tai enemmän	5

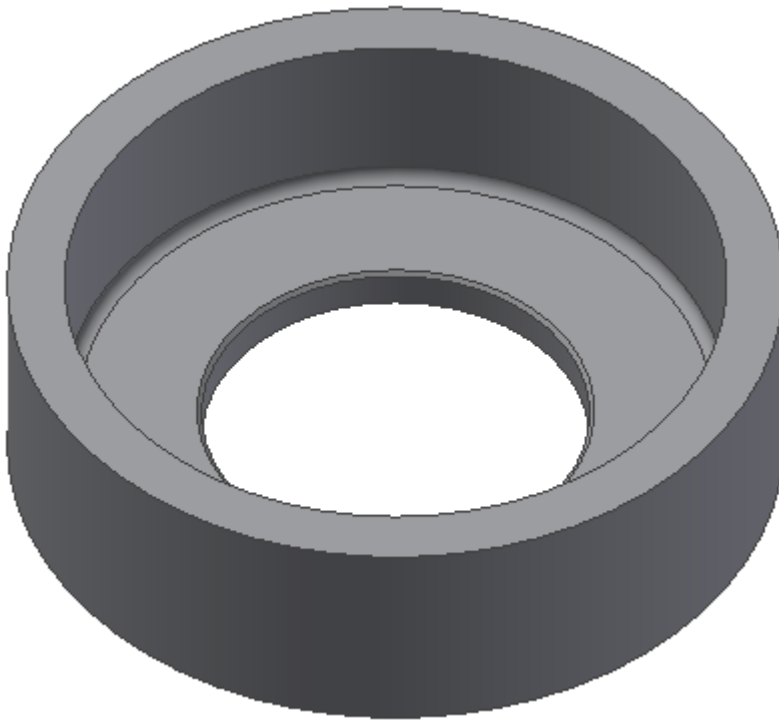
Arviointiparametri numero 3 on työvaiheitten määrä valmistuksessa. Kuten on jo aiemmin osoitettu, komponentin kustannuksissa valmistusaika on yksi päätekijöistä. Näin ollen voidaan päätellä, että kustannukset nousevat työvaiheitten määrän noustessa. Työvaiheitten määrän arviointi suoritetaan asteikolla 1–5, ja sen tarkoituksena on arvioida, miten työvaiheet lisääntyvät tai vähenevät WAAM-valmistuksessa suhteessa perinteisiin valmistusmenetelmiin. Parametri saa arvon 1, jos työvaiheitten määrä nousee WAAM-valmistuksen myötä. Jos työvaiheita pystytään WAAM-valmistuksen myötä vähentämään yhdellä tai kahdella, saa parametri arvon 3. Jos työvaiheitten määrä saadaan puolitettyä alkuperäisestä, saa parametri arvon 5. Arvot 2 ja 4 vastaavat määritelmiä edellä mainittujen määritelmien välimaastosta.

Arviointiparametri numero 4 on komponentin painon vaikutus. Tällä parametrilla pyritään arvioimaan, kuinka paljon WAAM-valmistuksella pystytään säästämään materiaalia. Arviointiparametri saa arvon 1, jos arvioidaan, että WAAM-valmistuksella komponentin paino pysyy samana tai se suurenee. Parametri saa arvon 3, jos arvioidaan, että WAAMin avulla

pystytään säästämään materiaalia noin 20–30 % prosenttia. Arvosana 5 vastaa tilannetta, jossa komponenttiin käytetty materiaali pystyttäisiin puolittamaan WAAM-valmistuksella. Arvot 2 ja 4 vastaavat määritelmiä edellä mainittujen määritelmien välimaastosta. Painon vaikutus arviointiparametrinä perustuu kahteen asiaan:

- Käytetyn materiaalin vähentämiseen.
- Materiaalin vähentämisen myötä työvaiheisiin kuluvan ajan väheneminen.

Kuvassa 31 on esitetty mittaholkki, jonka avulla perustellaan painon vaikutusta arviointiparametrinä.



Kuva 31. Mittaholkki.

Kuvasta 31 selviää, että komponentti on tehty umpinaisesta aihioista. Kun komponentti tehdään perinteisin valmistusmenetelmin, poistetaan työstövaiheessa aihioista yli puolet materiaalista, kuten kuvasta 31 voidaan päätellä. Jos komponentti valmistettaisiin WAAMilla, tämä poistetun materiaalin määrä säästettäisiin. Kuten on jo aiemmin todettu, aika on yksi tärkeimmistä tekijöistä valmistuskustannuksissa. Jos mittaholkki tehdään perinteisin valmistusmenetelmin, aikaa kuluu materiaalin poistamiseen, mistä syntyy myös materiaalihukkaa. Jos komponentti tehtäisiin WAAMilla, niin materiaalin poistamiseen kulunut aika säästettäisiin kuin myös hukkaan mennyt materiaali. On kuitenkin huomioitava, että WAAM-

valmistuksessa jälkikäsitteilytarve määrittää kuinka paljon ylimääräistä materiaalia joudutaan tulostamaan. Esimerkiksi vaatimus pinnanlaadun suhteen aiheuttaa sen, että seinämänpaksuutta lisätään tarvittava määrä, esimerkiksi 3 mm, joka tullaan koneistamaan määriteltyyn pinnanlaatuun WAAM-valmistusprosessin jälkeen.

Hybridivalmistus on arviointiparametri numero 5. Tällä parametrillä pyritään arvioimaan, miten hybridivalmistuksella pystytään ensisijaisesti helpottamaan valmistusta. Arviointiparametri saa arvosanan 1, jos hybridivalmistus ei ole mahdollista ja arvosanan 2, jos hybridivalmistuksesta ei ole hyötyä eikä haittaa. Arvosanat 3–5 toimii niin sanotusti ehtojen mukaan. Jos vain yksi ehto täyttyy, arvosana on 3. Kahden ehdon täytyessä arvosana on 4 ja kaikkien kolmen ehdon täytyessä arvosanaksi saadaan 5. Arviointiehdot ovat erilaiset yksittäisille osille ja kokoonpanoille. Ensisijaisesti hybridivalmistuksen tavoite on helpottaa valmistusta, mikä taas lyhentää valmistusaikaa ja näin ollen pienentää valmistuskustannuksia. Käytetään esimerkkinä kuvan 31 mittaholkkia. Jos komponentti valmistetaan WAAMilla kokonaan, on se irrotettava tulostusalustasta, mikä tuo yhden työvaiheen lisää valmistusketjuun. Jos komponentti valmistetaan siten, että mittaholkin pohjalevy tehdään perinteisin valmistusmenetelmin ja sen päälle tulostetaan mittaholkin holkkiosa, ei komponenttia tarvitse irrottaa tulostusalustasta, koska komponentin osa toimii tulostusalustana. Tällä tavoin hybridivalmistuksen valmistusprosessia voidaan yksinkertaistaa sekä työvaiheitten määrää vähentää. On kuitenkin muistettava huomioida työvaiheitten määrä valmistusmenetelmien välillä, esimerkiksi jälkikäsitteilytarpeen vaikutus WAAM-menetelmällä valmistettavaan komponenttiin.

3.1.3 Komponentin valinta

Kun toinen karsintakerros on suoritettu ja 3–4 komponenttia jokaisesta laitteesta on valittu arviointimatriisista saatujen pisteiden perusteella, voidaan suorittaa komponentin valinta WAAM-valmistukseen. Tässä osiossa kerrotaan, miten valinta tullaan suorittamaan. Ensisijaisena kriteerinä komponentin valinnalle on kustannukset. Tavoitteena on valita komponentti, jonka valmistuskustannuksissa säästöä saavutetaan eniten. Tätä varten on tutkittava komponenttien kustannuksien muodostumista, ja määrittää, mitä kustannuksia tarkastellaan.

Ensimmäisenä tehtävänä on selvittää valittujen komponenttien kustannukset, eli käytännössä se, mitä komponentti maksaa. Kustannuksiin vaikuttaa onko komponentti tilausosa vai

onko se valmistettu kohdeyrityksen konepajalla. Tätä varten on myös määritettävä, mitä osia komponentista valmistettaisiin WAAMilla. Esimerkiksi, jos komponentti on kokoonpano, josta WAAMille sopisi valmistettavaksi jotain yksittäisiä piirteitä tai osia, on selvítettävä, mitä nämä piirteiden tai osien tekeminen maksaa perinteisin valmistusmenetelmin. Jos taas komponenttina on yksittäinen tilattu osa, niin tarkasteluun riittää osan hinta. Lisäksi selvitetään ja arvioidaan, mitä eri työvaiheet, kuten koneistus ja hitsaaminen, kustantaa. Komponenttien kustannustiedot on saatu palaverissa Vesaston (2023) kanssa.

Tämän jälkeen arvioidaan, mitä valittujen komponenttien valmistaminen WAAMilla tulisi maksamaan. Ensimmäisenä tehtävänä on määrittellä, miten komponentti valmistetaan WAAMilla, eli valmistetaanko komponentti kokonaan WAAMilla vai valmistetaanko komponentista osa hybridivalmistuksena WAAMilla. Tässä vaiheessa on tärkeää hahmottaa paras ja kustannustehokkain valmistusstrategia komponentille, kun valmistusmenetelmänä käytetään WAAMia. Kun valmistusstrategia on määritelty, lasketaan komponentin tulostettava kilomäärä. Tulostettavan kilomäärän laskemiseksi lisätään komponentin 3D-malliin seinämänpaksuutta 3 mm jokaiseen pintaan, joka tullaan koneistamaan. Tämä tehdään Autodesk Inventor Professional 3D CAD-suunnitteluohjelmistolla. Tämän jälkeen suunnitteluohjelmistosta saadaan tulostettavan osan massa.

WAAM-menetelmän kustannuksien arvioimiseksi, on määritettävä WAAM-valmistukselle kilohinta. Ensimmäisenä tehtävänä on määrittellä, millä syöttönopeudella eli hitsiaineentuotolla komponentit valmistetaan. Mitä kompleksisempi ja pienempi komponentti sitä pienempi hitsiaineentuotto, ja mitä isompi ja yksinkertaisempi komponentti niin sitä suurempi hitsiaineentuotto. Tässä työssä hitsiaineentuotolle käytetään kahta arvoa, hidas hitsiaineentuotto on 2 kg/h ja nopea hitsiaineentuotto on 3,5 kg/h. WAAM-valmistuksen kilohinta $H_{kilohinta}$ euroissa kilogrammaa kohden (€/kg) voidaan laskea seuraavasti:

$$H_{kilohinta} = \frac{H_{Waam} + T * H_{Li}}{T}, \quad (15)$$

missä H_{Waam} on hitsauskoneen eli WAAM-robotin tuntihinta euroissa tuntia kohden (€/h), T on hitsiaineentuotto kilogrammoina tuntia kohden (kg/h) ja H_{Li} on lisäaineen hinta euroissa kilogrammaa kohden (€/kg). Kappaleessa 2.4 on esitetty, miten kokonaishitsauskustannukset lasketaan hitsauksen osakustannusten summasta. Hitsauskoneen tuntihinta sisältää kaikki WAAM-menetelmän käyttöön kuluvat kulut pois lukien lisäainekustannukset. Kun WAAM-menetelmälle on määritetty kilohinta, voidaan tulostettavan komponentin

tulostuskustannukset laskea. Tämä lasketaan tulostettavan komponentin massan ja WAAM-valmistuksen kilohinnan tulosta.

Kun WAAMin käytöstä aiheutuvat kulut on laskettu, on arvioitava muut kulut, mitä komponentin valmistaminen aiheuttaa. Näitä kuluja ovat jälkikäsitteystä aiheutuvat kulut, kuten koneistus ja ahiokulut. Koneistuskulut on arvioitu palaverissa Snellmannin (2023) kanssa. Ahiokuluilla tarkoitetaan komponentin tulostusalustan kustannuksia. Tämä on komponenttikohtaista, johon vaikuttaa esimerkiksi se, voidaanko komponentti valmistaa hybridivalmistuksena, jolloin aihiota käytetään tulostusalustana. Tulostusaihion kustannukset on arvioitu palaverissa Nuoposen (2023) kanssa. Myös valmistukseen kuluva aikaa on arvioitu ja verrattu arvioituun aikaan, mikä komponentin valmistukseen kuluisi WAAM-menetelmällä.

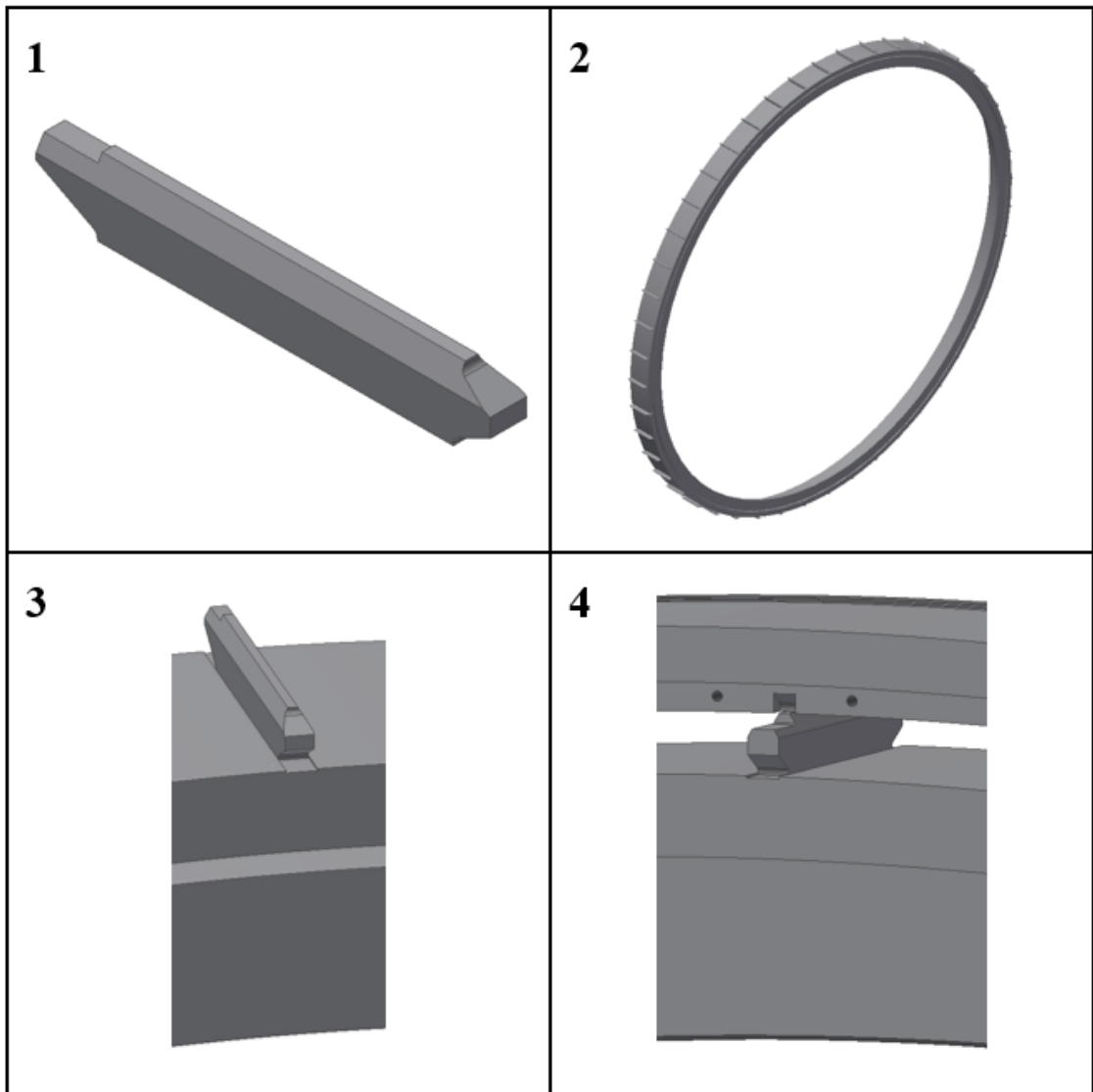
Kun vertaillaan WAAM-menetelmän kuluja perinteisen valmistuksen kuluihin, on tärkeintä yhden komponentin kohdalla verrata vastaavia kuluja. Esimerkiksi jos kyseessä on kokoonpano, mihin WAAMilla valmistettaisiin vain joku piirre, on WAAMin kustannuksia verrattava siihen, mitä piirteiden valmistaminen maksaa alkuperäisessä komponentissa.

Kustannuksia laskettaessa saadaan myös tärkeää tietoa komponenteista. Tässä vaiheessa voidaan esimerkiksi vertailla kahden valmistustavan kustannuksia. Jos WAAM-valmistus ei ole kannattavaa, voidaan arvioida kuinka paljon materiaalia pitäisi komponentista vähentää, jotta komponentin valmistus olisi kannattavaa WAAMilla. Pyritään siis arvioimaan, voidaanko topologisella optimoinnilla tehdä komponentista kustannuksiltaan kannattava WAAM-valmistukselle.

Vaikka kustannusten lisäksi on tarkasteltu muitakin vaikuttavia asioita, on tärkein komponentin valintaan vaikuttava asia tässä vaiheessa kustannusten vertailu kahden valmistusmenetelmän välillä. Komponentin valinnassa tullaankin painottamaan eniten valmistusmenetelmien kustannuksia.

3.2 Valittujen komponenttien valmistaminen WAAMilla

Edellä mainitun komponentin valinta -vaiheen jälkeen kaksi komponenttia on valittu jatkoon tähän työhön. Ensimmäisenä komponenttina on DD-pesurin jakopää, jonka jakorivat on tarkoitus valmistaa WAAMilla. Toisena komponenttina on painediffusöörin liitosrengas. Jakopää ja -rivat on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Ensimmäinen valittu komponentti. Kohdassa 1 jakoripa, kohdassa 2 ja 3 jakopää ja jakorivan kiinnitys jakopäähän sekä kohdassa 4 jakopään kokoonpano ja ulomman tiivistekehän kiinnitys jakoripaan.

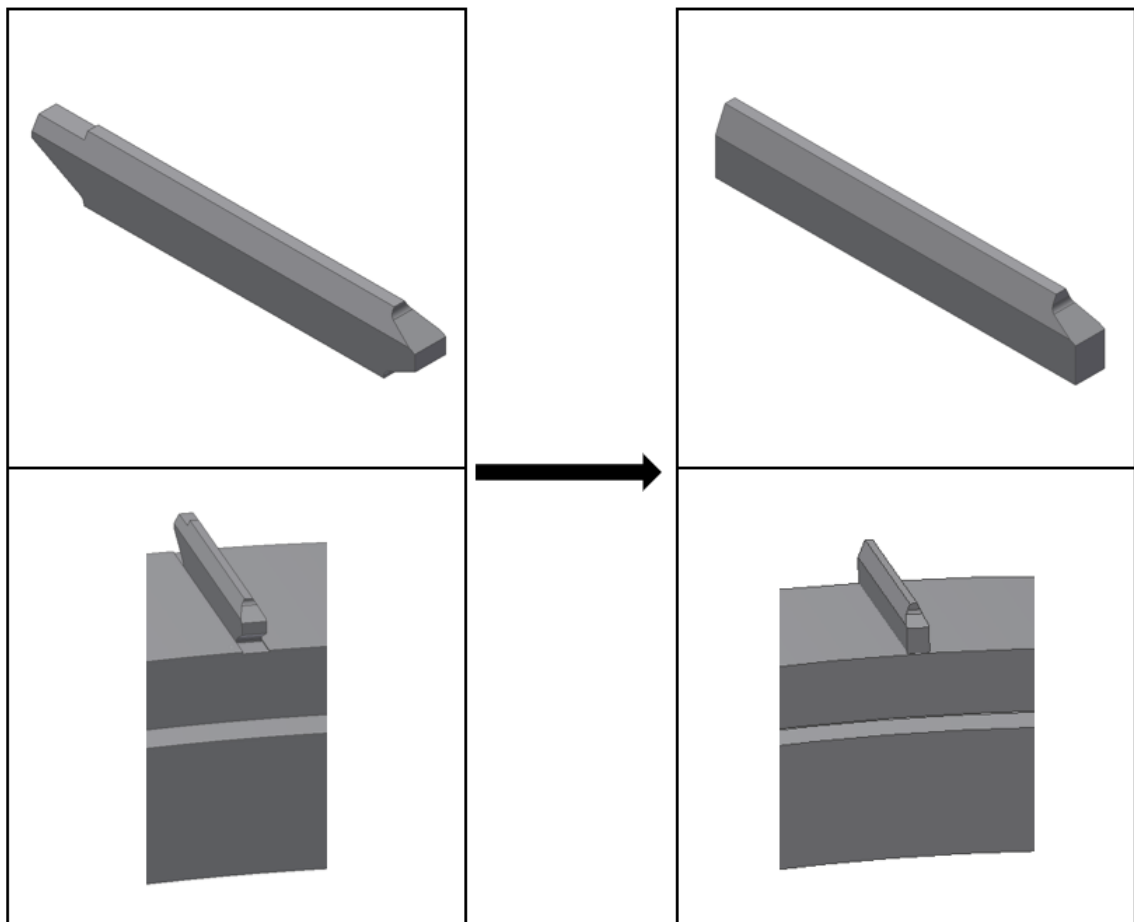
Kun tarkastellaan kuvan 32 jakopäätä ja jakoripoja, niin kyseisen kokoonpanon valmistaminen perinteisin valmistusmenetelmin tapahtuu yksinkertaistettuna seuraavalla tavalla:

1. Jakorivat hankitaan valmiina komponentteina.
2. Sisempi tiivistekehä koneistetaan pyöreäksi tiettyyn mittatarkkuuteen sekä jakorivoille tehdään urat.
3. Jakorivat kiinnitetään hitsaamalla sisempään tiivistekehään.
4. Ulompi tiivistekehä kiinnitetään jakoripoihin hitsaamalla.

Jakopään ja jakoripojen valmistaminen WAAMilla tapahtuu seuraavalla tavalla:

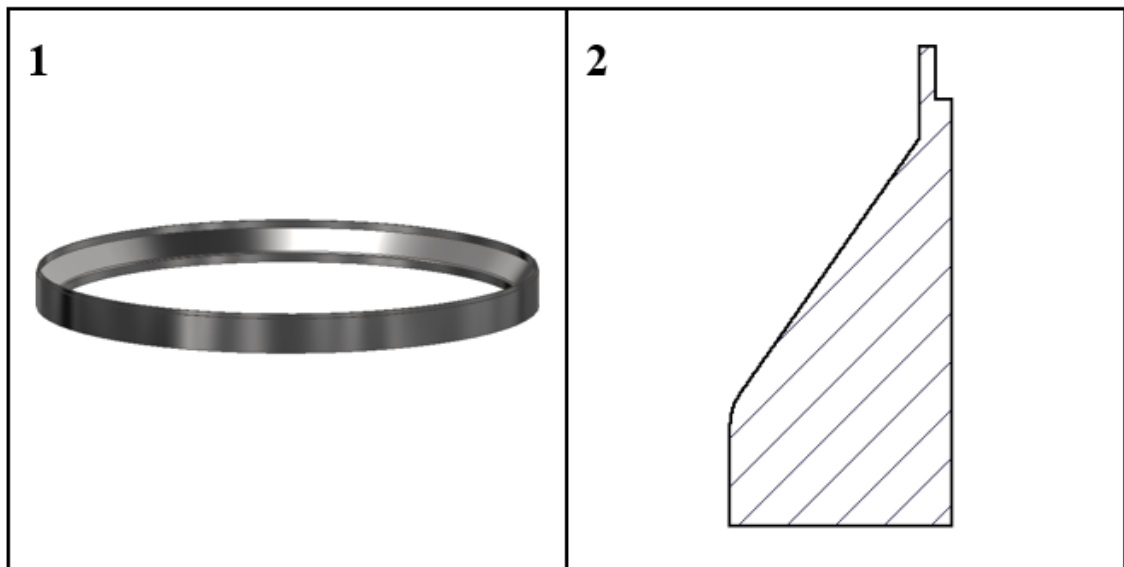
1. Sisempi tiivistekehä koneistetaan pyöreäksi tiettyyn mittatarkkuuteen.
2. Jakorivat valmistetaan WAAMilla suoraan kiinni sisempään tiivistekekhään.
3. WAAMilla valmistetut jakorivat koneistetaan siten, että ulkokehä on halkaisijaltaan suunnitellussa mittatarkkuudessa.
4. Ulompi tiivistekehä kiinnitetään jakoripoihin hitsaamalla.

Kuten kuvan 32 kohdasta 1. nähdään, jakoripaam on tehty viisteet sen kiinnihitsausta varten. Nyt kun jakorivat valmistetaan WAAMilla, niin alempia viisteitä ei tarvitse tehdä, koska WAAMilla se valmistettaisiin suoraan kiinni sisempään tiivistekekhään. Ylempi viiste sen sijaan valmistetaan, jotta ulomman tiivistekehän kiinnitys hitsaamalla onnistuu. Kuvassa 33 esitetään alkuperäiset jakorivat sekä WAAM-valmistukseen suunnitellut jakorivat.

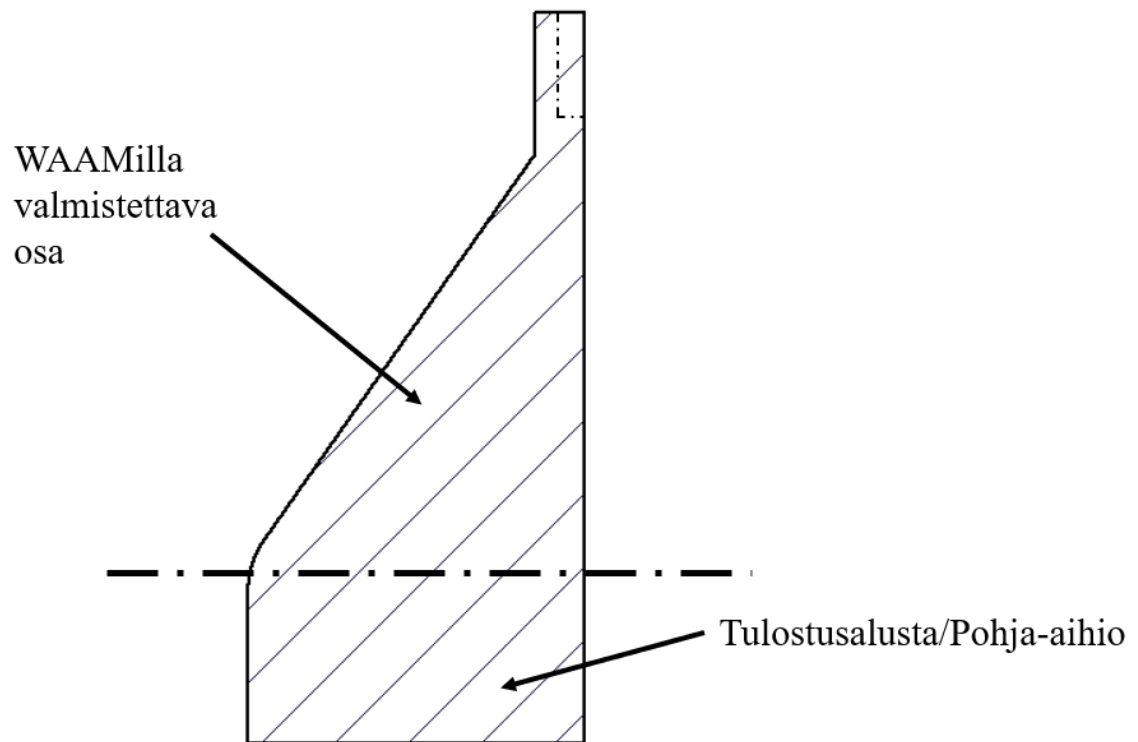


Kuva 33. Perinteisin valmistusmenetelmin valmistettu jakoripa ja kiinnitys sisempään tiivistekekhään sekä WAAM-menetelmälle suunniteltu versio.

Toinen jatkoon valittu komponentti on painediffusöörin liitosrenkas, joka esitetään kuvassa 34. Perinteisin valmistusmenetelmin valmistettuna se sisältää käytännössä kaksi vaihetta. Renkaan muotoisen aihion valmistuksen ja sen koneistuksen poikkileikkausta vastaavaan muotoon. Liitosrenkaan valmistaminen WAAMilla tehtäisiin hybridi valmistuksena, jolloin tulostusalustana toimisi poikkileikkaukseltaan suorakulmion muotoinen rengas, jonka päälle tulostettaisiin WAAMilla komponentin yläosa. Tämä esitetään kuvassa 35.



Kuva 34. Toinen valittu komponentti. Kohdassa 1 liitosrenkas ja kohdassa 2 liitosrenkaan poikkileikkaus.



Kuva 35. Liitosrenkaan valmistusstrategia WAAM-valmistukselle.

Liitosrenkaan valmistaminen tapahtuisi seuraavalla tavalla:

1. Liitosrenkaan ylempi osa tulostetaan WAAMilla tulostusalustan eli pohja-aihion päälle. Tulostetaan seinämänpaksuutta 3 mm suuntaansa. Tulostuksen helpottamiseksi komponentin yläosassa olevaa olaketta (kuvassa 35 merkitty katkoviivalla) ei tulosteta, vaan se tehdään koneistamalla tulostuksen jälkeen.
2. Koneistetaan komponentti määriteltyihin mittoihin.

Kun liitosrenkas on valmistettu, liitetään se kokoonpanemalla painediffusöörin sihdin alapäähän, missä siihen koneistetaan vielä reikiä ja alaosaan olake. Tätä koneistusvaihetta ei kuitenkaan tässä tapauksessa oteta huomioon, koska liitosrengasta vertaillaan osana, ennen sen liittämistä painediffusööriin.

3.3 WAAM-valmistukseen valittujen komponenttien arviointi

Kun valitut komponentit on suunniteltu WAAM-valmistusta varten, on ne vielä arvioitava. Tätä arviointia kutsutaan vertailuarvioinniksi, jonka tarkoituksena on verrata keskenään WAAM-valmistusta ja perinteistä valmistusta valittujen komponenttien kohdalla. Arvioinnin tarkoituksena on selvittää, mitä hyötyjä pääasiassa kustannusten näkökulmasta saavutetaan, jos komponentit valmistetaan WAAMilla. Tarkoituksena on myös selvittää, saavutetaanko WAAM-valmistuksella muita hyötyjä. Esimerkiksi saavutetaanko WAAM-valmistuksella aika- tai materiaalisäästöä. Kyseiset arviointikriteerit on valittu sen perusteella, että WAAM-valmistus on todennäköisesti sitä kannattavampaa mitä enemmän aikaa ja materiaalia säästetään. Materiaalin säästöllä saavutetaan rahallista hyötyä, mutta sillä on myös muita tärkeitä vaikutuksia. Vaikka kyse on yksittäisestä komponentista, voidaan hukkamateriaalia vähentämällä edistää kestävä kehityksen periaatteita.

Käytettävät arviointikriteerit WAAM-valmistukseen suunnitellun komponentin ja perinteisin valmistusmenetelmin valmistetun komponentin vertailuun ovat:

1. Kustannusten vertailu
2. Materiaalin käyttö
3. Valmistusaika

Ensimmäinen arviointikriteeri on kustannusten vertailu. Tässä on tarkoituksena verrata komponenttien kustannuksia suhteessa toisiinsa. Toinen arviointikriteeri on materiaalin käyttö. Tarkoitus on arvioida säästettyä tai hukattua materiaalia kilogrammoina, kun tarkastellaan loppukomponenttia. Kolmas arviointikriteeri on valmistusaikojen arviointi valmistusmenetelmien välillä. Tässä kriteerissä on otettava eri asioita huomioon ja ne voivat vaihdella komponentin mukaan. Aikaa voidaan säästää, jos koneistettavaa materiaalia on vähemmän, ja sitä voidaan myös säästää, jos hitsaustyötä on kokoonpanossa vähemmän. Aikaa voidaan myös hukata WAAM-valmistuksessa, jos WAAMilla komponentin valmistaminen aiheuttaa esimerkiksi lisäkoneistustarvetta komponentille. Komponenttien arvioinnin tulokset esitetään seuraavassa tulokset-osiossa.

4 Tulokset ja niiden analysointi

Tässä osiossa esitetään työn tulokset ja analysoidaan ne. Ensimmäisenä käydään läpi komponenttien karsintavaiheen tulokset, jonka jälkeen tarkastellaan valittuja komponentteja. Tulosten esittämisen jälkeen, molempien osioiden tulokset analysoidaan.

4.1 Tulokset

Kolmivaiheisen karsintamenetelmän tulokset esitetään kahdessa vaiheessa. Ensimmäisenä esitetään ensimmäisen ja toisen karsintakierroksen tulokset. Tämän jälkeen esitetään valitut komponentit ja niiden vertailuarviointi.

4.1.1 Ensimmäinen ja toinen karsintakierros

Ensimmäisen karsintakierroksen tehtävänä oli karsia komponenttien lukumäärä per laite riittävän pieneksi toista karsintakierrosta varten. Taulukossa 4 nähdään lukuarvoina ensimmäisen karsintakierroksen tulokset.

Taulukko 4. Ensimmäisen karsintakierroksen tulokset numeroina.

Ensimmäinen karsintakierros			
Laite	Komponenttien määrä	Karsitut komponentit	Jäljelle jääneiden komponenttien määrä
DD-pesuri	2090	2069	21
GF-suodin	727	704	23
Painediffusööri	456	435	21
Yhteensä	3273	3208	65

Toisella karsintakierroksella komponentteja arvioitiin arviointimatriisin avulla ja tavoitteena oli karsia komponenttien lukumäärä 3–5 komponenttiin laitetta kohden. Taulukossa 5 nähdään toisen karsintakierroksen tulokset.

Taulukko 5. Toisen karsintakierroksen tulokset numeroina.

Toinen karsintakierros			
Laite	Komponenttien määrä	Karsitut komponentit	Jäljelle jääneiden komponenttien määrä
DD-pesuri	21	17	4
GF-suodin	23	19	4
Painediffusööri	21	16	5
Yhteensä	65	52	13

4.1.2 Komponentin valinta

Toisen karsintakierroksen jälkeen on suoritettu komponentin valinta. Menetelmät-osiossa on esitetty menetelmä komponenttien valinnalle sekä kuvissa 32 ja 33 valinnan tuloksena potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen. On myös huomiotava, että GF-suotimesta ei ole löydetty potentiaalista ja soveltuvaa komponenttia WAAM-valmistukseen, vaikka työn tavoitteena oli löytää komponentti jokaisesta valitusta selluteollisuuden pesulaitteesta.

Valituille komponenteille on suunniteltu valmistusstrategia WAAM-valmistukseen. Tämän jälkeen on suoritettu vertailuarviointi perinteisen valmistuksen ja WAAM-valmistuksen välillä valituille komponenteille. Vertailuarvioinnin tulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Valittujen komponenttien vertailuarviointi.

Valitut komponentit		
Komponentti	Jakopään jakorivat	Liitosrengas
Tulostettava massa (kg)	42 kg	335 kg
Tulostuskustannukset (€)	42a	335a
Koneistettava massa (kg) WAAM-valmistus	30 kg	100 kg
Koneistettava massa (kg) Perinteinen valmistus	23,8 kg	429 kg
Materiaalin käyttö (kg) hukattu / säästetty	Hukattu materiaali 6,2 kg	Säästetty materiaali 329 kg
Ajan käyttö (h) WAAM-valmistus	Tulostus: 8,6 h Koneistus: 22 h	Tulostus: 96 h Koneistus: 12 h
Ajan käyttö (h) Perinteinen valmistus	Koneistus: 12 h Levytyötä: 43,5 h	Koneistus: 20 h Levytyötä: 11 h
Ajan käyttö (h) hukattu / säästetty	Säästetty aika 24,9 h	Hukattu aika 77 h
Valmistuskustannusten suhde (%) WAAM / Perinteinen valmistus	WAAM-valmistus 28 % edullisempi	Perinteinen valmistus 45 % edullisempi

Taulukossa 6 arvioitu ensin valmistus- eli tulostuskustannukset. Tulostuskustannukset on ilmoitettu kertoimen ”a” kanssa, missä ”a” kuvastaa WAAM-menetelmän kilohintaa. Näiden jälkeen on esitetty, kuinka paljon molemmissa valmistustavoissa on koneistettavaa materiaalia sekä säästetäänkö vai hukataan WAAM-valmistuksessa materiaalia. Materiaalin käytön jälkeen esitetään ajan käytön jakautuminen valmistusmenetelmien välillä, mistä voidaan laskea säästetty tai hukattu aika. Tämän jälkeen verrataan valmistuskustannusten suhdetta. Tulos esitetään prosenttilukuna, joka ilmoittaa kuinka paljon vähemmän tai enemmän WAAM-valmistus maksaa verrattuna perinteiseen valmistukseen.

4.2 Tuloksien analysointi

Tämän osion tarkoituksena on analysoida työtä ja sen tuloksia. Ensimmäiseksi analysoidaan komponenttien karsintavaiheet. Tämän jälkeen analysoinnin kohteena on WAAM-valmistukseen valitut komponentit.

4.2.1 Komponenttien karsintavaiheiden analysointi

Komponenttien karsinta jakautui kolmeen erilliseen kierrokseen. Lähtötilanteena oli 3273 komponenttia ja viimeisen karsintavaiheen tuloksena oli 2 komponentin valinta 13 komponentin joukosta.

Ensimmäisellä karsintakierroksella karsittiin 3273 komponenttia 65 komponenttiin. Erilaisia karsintakriteerejä oli 6 kappaletta ja ne esitetään taulukossa 7. Taulukossa on myös esitetty karsintakriteerin luotettavuus ja tehokkuus asteikolla 1–3. Arvo 3 vastaa todella luotettavaa tai tehokasta, ja arvo 1 vastaa luotettavaa tietyin varauksin tai toimivaa, mutta ei tehokasta. Arvo 2 on näiden kahden arvon väliltä.

Taulukko 7. Ensimmäisen karsintakierroksen karsintaparametrit ja niiden luotettavuus ja tehokkuus.

Ensimmäinen karsintakierros		
Karsintaparametri	Luotettavuus (1–3)	Tehokkuus (1–3)
1. Nimiketyyppi	3	3
2. Materiaali	3	2
3. Massa ja erä koko	3	1
4. Nimi	1	3
5. Suhdeluku	2	2
6. Potentiaalisuus	2	3

Ensimmäinen karsintaparametrinä oli komponenttien karsiminen nimiketyypin perusteella, joka on myös ollut kaikista luotettavin ja tehokkain tapa karsia komponentteja. Nimiketyyppi on ollut luotettava tapa karsia komponentteja, koska tiedetään minkälaisia komponentteja kukin nimiketyyppi vastaa. Tässä ei ole mahdollisuutta esimerkiksi siihen, että komponentille olisi annettu väärä nimi tai päädimensiot eivät pitäisi paikkaansa.

Toisena karsintaparametrinä oli valmistusmateriaalin perusteella karsiminen. Materiaalilla karsiminen on ollut luotettava, mutta ei niin tehokas karsintatapa. WAAM-menetelmän puolesta kaikki materiaalit, jotka eivät ole terästä, karsitaan pois. Tämän lisäksi osoitettiin, että 1.4404-materiaalin ja muiden jaloterästen valmistamisessa WAAMilla on potentiaalia, minkä perusteella S355-teräksestä tai vastaavasta materiaalista valmistetut komponentit voitiin suodattaa pois.

Kolmas karsintaparametri oli massan ja eräkoon perusteella karsiminen. Molemmat olivat luotettavia, mutta tehottomia tapoja karsia komponentteja. Tehottomuus perustuu siihen, että tutkittavissa laitteissa on kevyitä komponentteja kappalemäärältään vähän, jolloin myöskään karsintaa ei tapahtunut määrällisesti paljon. Yleisesti voidaan todeta, että edellä mainitut kolme tapaa karsia komponentteja olivat luotettavimmat tavat karsia komponentteja ensimmäisellä karsintakierroksella. Karsintavaiheissa käytetyt lähtötiedot ovat luotettavia, jolloin myös käytetyt karsintaparametrit voidaan todeta luotettaviksi.

Neljäs karsintaparametri oli komponentin nimen perusteella karsiminen. Tämä tapa oli erittäin tehokas, mutta samalla vähiten luotettava. Karsintaparametrin luotettavuutta voisi kuvata arvolla 1, eli luotettava tietyin varauksin. On mahdollista, että kyseinen karsintaparametri karsii pois mahdollisesti potentiaalisia komponentteja. Tämä riippuu siitä, miten hyvin komponentin nimi kuvaa sen todellista rakennetta. Onkin tärkeää, että esimerkiksi ”plate” nimen saanut komponentti vastaa oikeasti nimeään, eli on levystä tehty komponentti. Jos kyseinen komponentti olisi levymäisen rakenteen sijasta esimerkiksi todella paksu ja kompleksinen komponentti, jossa uudelleensuunnitellulla ja -valmistuksella on mahdollista säästää painoa, on potentiaalisen komponentin karsiminen pois silloin mahdollista.

Viides karsintaparametri oli suhdeluvun avulla karsiminen. Se ei ollut tehokkain tai luotettavin karsintatapa, mutta ei myöskään heikoin kaikista kuudesta karsintaparametristä. Suhdeluvun avulla karsiminen tuki hyvin nimen perusteella karsimista, jolloin karsintavaiheessa on saatu varmistusta ja luotettavuutta lisää sille, että nimen perusteella ei karsittu potentiaalisia komponentteja pois. Kaavan 14 mukaan laskettavaan suhdeluvun luotettavuuteen on suhtauduttava tietyin varauksin. Suhdeluvun laskemiseksi käytettiin lukuja suoraan osalistasta. On tärkeää, käytetyt luvut vastaavat komponentin todellisia päämittoja, jotta laskettu suhdeluku vastaa komponenttia. Jos luvut eivät vastaa komponentin todellisia mittoja, niin ei suhdelukukaan vastaa todellisuutta. Myös päämittojen puuttuminen useasta komponentista vaikutti siihen, että suhdeluvun avulla karsiminen ei ollut niin tehokasta kuin se olisi ollut, jos päämitat olisi ilmoitettu osalistassa jokaisen komponentin kohdalla.

Viimeinen ja kuudes karsintaparametri oli komponenttien potentiaalisuuden arvioiminen. Se oli tehokas ja samalla aikaa vievä tapa karsia komponentteja. Karsinta suoritettiin manuaalisesti arvioimalla komponenttien 3D-malleista niiden potentiaalisuutta WAAM-valmistukselle. Menetelmän tehokkuuteen vaikuttaa paljon menetelmän käyttäjän tietotaito yleisesti valmistustekniikasta ja WAAM-menetelmän hyödyntämisestä. Käytännössä mitä

vähemmän menetelmän käyttäjällä on tietotaitoa, niin sitä hitaampaa ja vähemmän luotettavaa komponenttien karsiminen potentiaalisuuden mukaan on.

Ensimmäisen karsintakierroksen analysoimisen kannalta on tärkeää miettiä, miten menetelmää voitaisiin kehittää. Jotta kehittäminen olisi mahdollista, pitää tietää mitkä olivat menetelmän ongelma- ja kehityskohteet. Lisäksi on määriteltävä tavoite, jotta tiedetään mihin suuntaan menetelmää halutaan kehittää. Ongelma- ja kehityskohteeksi tunnistettiin menetelmän karsintaparametrien luotettavuuden parantaminen sekä myös tehokkuuden lisääminen. Menetelmää halutaan kehittää niin, että ensimmäisellä karsintakierroksella pystytään pisteyttämään komponentit järjestykseen parhaimmasta huonoimpaan automatisoidusti. Tämä tavoite edellyttää seuraavien ongelma- ja kehityskohteiden korjaamista sekä huomioimista:

- Osalistan arvojen tulee olla täysin luotettavia ja ne pitää olla täytettynä jokaisen komponentin osalta. Esimerkiksi komponentti tulee nimetä mahdollisimman hyvin sen rakennetta kuvaavasti. Jokaisesta komponentista tulee löytyä tiedot komponentin päämitoista sekä mitat pitää olla esitettynä jokaiseen suuntaan xyz-koordinaatistossa.
- Jotta päästäisiin lähemmäksi tavoitetta, on osalistan oltava kattavampi tietojen osalta. Osalistan pitää sisältää ainakin seuraavia tiedot: käytetyn aihion päämitat ja paino sekä kokoonpanon osien kappalemäärä.
- Suhdeluvun, eräkoon ja massan raja-arvojen määrittäminen matemaattisesti sekä komponenttikohtaisesti. Esimerkiksi suhdeluvun raja-arvo voi olla erilainen sen mukaan, onko kyseessä levymainen osa vai erilaisista osista koostuva kokoonpano.

Toinen karsintavaihe suoritettiin arviointimatriisin avulla ja sen avulla 65 komponentin joukosta valittiin 13 komponenttia tarkempaa tarkastelua varten. Arviointimatriisi oli hyvä tapa pisteyttää komponentteja, mutta se on hyvin riippuvainen sen suorittajasta. Matriisin käyttäminen vaatii riittävän tietotaidon yleisesti valmistustekniikasta, WAAM-menetelmästä ja lisäävästä valmistuksesta. On kuitenkin myös hyvä muistaa, että arviointimatriisin ei ole tarkoitus sulkea pois yhtäkään komponenttia, vaan pisteyttää komponentit ja asettaa ne paremmuusjärjestykseen. Täten on myös tärkeää, ettei liian suuri tietotaito tule arviointimatriisin käytön esteeksi, esimerkiksi niin, että suoraan komponentin 3D-mallin perusteella arvioitaisiin, että komponentin WAAM-valmistus ei ole mahdollista.

Kolmas karsintavaihe oli komponentin valintavaihe. Komponentin valinta tehtiin pitkälti numeraalisten arvojen perusteella ja on näin ollen yksinkertainen sekä toimiva tapa valita paras komponentti WAAM-valmistukseen kustannusten perusteella. Valintavaiheessa verrattiin kustannuksia valmistusmenetelmien välillä. Saatavat tiedot kohdeyrityksen konepajalta ovat luotettavia, mutta tietojen hyödynnettävyyteen voi vaikuttaa se, onko komponentin valmistuksesta kuinka paljon aikaa. Jos komponenttia on viimeksi valmistettu esimerkiksi aikavälillä 2018–2019, on komponentin kustannukset voineet muuttua radikaalisti. Tällöin on tärkeää ottaa huomioon, miten esimerkiksi materiaalin hintojen nousu vaikuttaa komponentin kustannuksiin. Myös muut arviointikriteerit, kuten koneistukseen kuluva aika ja kustannukset, arvioitiin kohdeyrityksen konepajalta saaduilla tiedoilla. Tämä oli tämän työn laajuuden puitteissa luotettava tapa. Menetelmän kehittämiseksi, voitaisiin koneistukseen kuluva aika ja kustannukset laskea automaattisesti laskurilla syötettyjen tietojen perusteella.

Yhteenvedona voidaan todeta, että toteutettu koko karsintamenetelmä oli toimiva. Ensimmäisen karsintakierroksen viiden ensimmäisen karsintaparametrin toteutus voitiin suorittaa automaattisesti, mikä nopeutti karsintaprosessin tekemistä. Näin saatiin karsittua 3273 komponenttia noin 300 komponenttiin. Ensimmäisen karsintakierroksen viimeisessä vaiheessa 300 komponentin 3D-mallit avattiin yksitellen tarkastelua varten, mikä hidasti karsintaprosessia, ja on yksi suurimmista jatkokehityskohteista. Arviointimatriisi sekä komponentin valintavaiheet luotiin yksinkertaisiksi työkaluiksi ja ne todettiin toimiviksi. Lopputulosta eli WAAM-valmistukseen valittavien komponenttien valintaprosessia pystytään myös muuttamaan helposti antamalla tietyille kriteereille enemmän painoarvoa arviointimatriisissa ja komponenttien valintavaiheessa. Jos esimerkiksi halutaan korostaa enemmän materiaalin säästöä, voidaan arviointimatriisissa painottaa enemmän ”painon vaikutus” arviointikriteeriä sekä komponentin valintavaiheessa kustannusten sijasta WAAM-valmistuksessa säästettyä materiaalia.

4.2.2 WAAM-valmistukseen suunniteltujen komponenttien analysointi

Tässä osiossa keskitytään analysoimaan WAAM-valmistuksen hyötyjä ja haittoja valittujen komponenttien kohdalla verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Taulukossa 6 esitettiin vertailuarviointi komponenteille, josta nähdään avainlukuja WAAM-valmistuksen ja perinteisen valmistuksen välillä.

Tarkasteltaessa jakoripojen valmistusta WAAMilla, on kyse valmistuksesta, missä lisätään kokoonpanoon yksittäisiä piirteitä, kuten tässä tapauksessa jakoripoja. Kustannusten, materiaalin käytön ja valmistusajan vertailuun vaikuttaa valmistettavan pesurin koko, sillä se vaikuttaa jakoripojen määrään yhdessä jakopään renkaassa. Materiaalin käyttöä tarkasteltaessa, voidaan todeta, että materiaalin säästön sijaan WAAM-menetelmällä hukkamateriaalia muodostuu 6,2 kg. Kustannussäästö kyseisen komponentin WAAM-valmistuksessa perustuu ajan säästämiseen. Hyödyntämällä WAAM-valmistusta ei tarvita erikseen hitsaustyötä, jolloin säästetään 43,5 tuntia. Vaikka WAAM-valmistuksessa joudutaan koneistamaan 10 tuntia enemmän ja WAAM-valmistus vie 8,6 tuntia, niin yhteensä aikaa säästetään 24,9 tuntia. Tämä näkyy myös suoraan säästönä kustannuksissa. Laskelmien mukaan WAAM-valmistus on 28 % edullisempi kuin perinteinen valmistus.

Liitosrenkaan potentiaalisuus ja soveltuvuus WAAM-valmistukseen perustuu materiaalin säästöön. Kun tarkastellaan perinteisessä valmistuksessa käytettyä aihiota ja verrataan sitä kilomäärään, mitä materiaalia käytetään WAAM-valmistuksessa, säästetään materiaalia yhteensä 329 kg. Vertailun vuoksi, säästetty massa on lähes 70 % lopputuotteen painosta. Tarkastellessa valmistukseen käytettävää aikaa, WAAM-valmistukseen kuluu aikaa 77 tuntia enemmän kuin perinteisellä valmistustavalla. Tämä on seurausta siitä, että komponentin tuostamiseen käytetään aikaa 96 tuntia. Kun taas vertaillaan valmistusmenetelmien välillä koneistukseen käytettävää aikaa, käytetään WAAM-menetelmällä valmistettavassa komponentissa koneistukseen 8 tuntia vähemmän aikaa. Vaikka säästetty materiaali WAAM-valmistuksen avulla on huomattava, ei kustannusten puolesta tehdä säästöä vaan perinteinen valmistus on silti vielä 45 % edullisempi tapa valmistaa komponentti. Painediffusöörin liitosrenkas on silti vielä potentiaalisin ja soveltuvin komponentti painediffusöörin komponenttien joukosta.

Tässä työssä suunniteltu valmistusstrategia WAAM-valmistukseen valituille komponenteille on vielä suoraviivainen ja yksinkertaistettu, eikä täyttä potentiaalia valmistusstrategian hyödyistä ole tämän työn puitteissa vielä saavutettu. Jatkokehityskohteena onkin komponenttien valmistuksen suunnittelu WAAM-menetelmälle ja täyden potentiaalisen saavuttaminen. Kummassakaan komponentissa ei ole vielä tehty varsinaista uudelleensuunnittelua, eikä topologista optimointia ole hyödynnetty. Vaikka valituille komponenteille WAAM-valmistusta ei ole tarkasti suunniteltu, on työn tulosten kannalta tärkeää, että on pystytty

osoittamaan kahden valitun komponentin olevan potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen.

5 Pohdinta ja jatkokehityskohteet

Tässä osiossa pohditaan työtä kokonaisuutena, työn vaikutuksia ja miten eri asiat olisivat vaikuttaneet työhön ja sen lopputuloksiin. Lisäksi esitetään jatkokehityskohteet tälle työlle.

Työssä arvioitiin yhteensä 13 komponentille WAAM-valmistuksen kustannukset. Kustannukset arvioitiin viimeisimpien kustannuksien ja materiaalihintojen mukaan. Komponentin valintavaiheessa huomattiin, että WAAM-menetelmä on vain kahdelle komponentille potentiaalinen valmistusmenetelmä. Kappaleen 3.1.3 kaavassa 15 on esitetty, mistä WAAM-valmistuksen kustannukset koostuvat. Kaavasta nähdään, että WAAM-menetelmän kilohintaan vaikuttaa hitsiaineentuotto, koneen tuntihinta ja lisäainekustannukset. Tämän takia onkin tärkeää pohtia, miten tulokset muuttuisivat, jos WAAMin hitsiaineentuottoa pystyttäisiin nostamaan tai koneen tuntihintaa ja lisäainekustannuksia laskemaan. Hitsiaineentuottoa voitaisiin nostaa ja suhteessa tuottoon koneen tuntihintaa laskea lisäämällä hitsausrobottien määrää, jolloin yhden suorittavan robotin sijasta WAAM-prosessia suorittaisi useampi robotti. Tämä johtaakin kysymykseen mitä tapahtuisi, jos WAAM-menetelmän tuottavuus olisi korkeampi kustannuksiin nähden. Tämän työn karsintamenetelmän kannalta se johtaisi siihen, että useampi komponentti olisi kustannusten puolesta sopivia WAAM-valmistukseen. Tällöin komponentin valintavaiheessa voitaisiin mahdollisesti painottaa muitakin kriteerejä kuin kustannuksia.

Kun on puhuttu WAAM-valmistuksen tuottavuuden nostamisesta ja kustannusten laskemisesta, on myös syytä miettiä materiaalien hintoja ja niiden saatavuuksien vaikutusta komponenttien kustannuksiin ja valmistukseen. Voitaisiko WAAM-valmistusta hyödyntää kustannustehokkaana vaihtoehtona, jos tietyn paksuisen levy materiaalin saatavuudessa ilmenisi saatavuusongelmia tai merkittävää hinnan nousua? Kuten materiaalien kilohinta – hukka-%-kuvaajissa (Kuvat 24 ja 25) aikaisemmin todettiin, materiaalin kilohinta vaikuttaa WAAM-valmistuksen käyttämisen potentiaaliin. Tästä voidaan päätellä, että saatavuusongelmat tai korkeat kustannukset tietyn, esimerkiksi levy materiaalin, kohdalla nostavat WAAM-valmistuksen potentiaalia ja voivat tehdä siitä kustannustehokkaamman valmistusmenetelmän.

Kappaleessa 4.2.1 on analysoitu, miten komponenttien karsintaa voitaisiin parantaa ja automatisoida. Ensimmäisenä vaiheena tässä olisi osaluettelon tietojen täydentäminen ja tietojen

luotettavuuden parantaminen. Tällä hetkellä osaluettelo ladataan AutoDesk Vault Professional -ohjelmasta Excel -ohjelmaan. Jos automatisointia vietäisiin pitemmälle, eivät komponentin 3D-mallista saadut tiedot riitä välttämättä täysin aukottomaan karsintamenetelmään. Jos osaluetteloon voitaisiin integroida tietoja esimerkiksi komponentin kustannustietoja ja läpimenoaikoja sisältävästä järjestelmästä, voitaisiin karsintamenetelmästä kehittää vieläkin toimivampi versio.

Kohdeyrityksen pesulaitteet ovat selluteollisuuden laitteiden mittapuulla suuria laitteita. Miten tulokseen vaikuttaisi, jos pesulaitteiden sijasta karsintamenetelmän kohteena olisi pienempiä laitteita? Voisiko esimerkiksi pienemmän koon laitteissa olla mahdollisesti potentiaalisempia komponentteja WAAM-valmistukselle kuin suuremmissa laitteissa? Jos karsintamenetelmä kehitettäisiin automaattisemmaksi ja tarkemmaksi, mikä olisi mahdollinen lopputulos, jos sillä käytäisiin kohdeyrityksessä valmistettavien laitteiden komponentteja läpi? Automatisoitu karsintamenetelmä olisi tehokas ja toimiva tapa kartoittaa eri laitteiden komponenttien potentiaalia WAAM-valmistukselle ilman, että käsin tehtävää karsintatyötä jouduttaisiin tekemään, kuten tässä työssä on tehty.

Myös liiketoimintaympäristöllä on suuri vaikutus työhön, sen lopputuloksiin ja etenkin siihen, millä perusteella komponentteja arvioidaan. Kun puhutaan tämän työn laitteista ja niiden liiketoimintaympäristöstä, perustuu liiketoiminta uusien laitteiden toimitukseen. Jos liiketoiminta perustuisi laitteiden ja komponenttien huoltoon, vaikuttaisi se kriteereihin, joilla arvioidaan komponenttien soveltuvuutta WAAM-valmistukseen. Huoltoliiketoimintaympäristössä WAAM-menetelmää voitaisiin käyttää laitteiden korjaukseen ja korvaavien komponenttien valmistamiseen. Esimerkiksi yksittäisen osan rikkoutuminen laitekokonaisuudesta voisi aiheuttaa kokonaisen tuotannon pysähtymisen. Tässä tapauksessa yksi tärkeimmistä kriteeristä korvaavalle komponentille on sen toimitusaika. Jos perinteisin valmistusmenetelmin valmistetussa komponentissa on pitkä läpimeno- ja toimitusaika, on tärkeää miettiä vaihtoehtoisia valmistusmenetelmiä. Jos WAAM-valmistuksella saavutetaan merkittävästi lyhyempi läpimenoaika, voi se silloin olla soveltuvampi valmistusmenetelmä, vaikka komponentin valmistuskustannukset olisivatkin korkeammat WAAM-valmistuksessa kuin perinteisin valmistusmenetelmin.

Tärkeää on huomioida, kuinka usein laitteita toimitetaan, sillä tämä voi myös vaikuttaa komponenttien hintaan. Laitetta, jota valmistetaan vuosittain, on luultavammin keretty paremmin optimoimaan kustannusten ja laitteen rakenteen puolesta. Esimerkiksi, kun yksittäisiä

komponentteja tehdään tai tilataan useammin, saadaan niiden kustannuksia ja lopputuotteen hintaa alaspäin. Jos taas laitetta tehdään esimerkiksi kerran kolmessa vuodessa, ei laitteen optimointi kustannusten ja laiterakenteen puolesta ole vielä niin pitkällä. Tällöin voi esimerkiksi käydä siten, että yksittäisen komponentin hinta nousee korkeaksi, koska sitä ei ole keretty optimoimaan tai esimerkiksi komponentin mahdollisia toimittajia ei ole keretty kartoittamaan tarpeeksi laajasti. Tämä voi vaikuttaa tarkasteltaviin komponentteihin esimerkiksi siten, että komponentin kustannukset ovat olleet vuosia sitten todella paljon kalliimpia kuin mitä ne ovat, kun komponentti valmistetaan seuraavaan laitteeseen. Näin ollen, etenkin GF-suotimen ja painediffusöörin kohdalla, komponenttien kustannukset voivat olla harhaanjohtavia koska niitä on valmistettu huomattavasti harvemmin kuin DD-pesureita. Tämä voi aiheuttaa sen, että WAAM-valmistukseen voidaan valita komponentti, joka on ollut kallis valmistaa esimerkiksi viisi vuotta sitten, mutta on edullinen tulevaisuudessa.

Työn jatkokehityskohteet on suunniteltu analyysin ja pohdinnan perusteella sekä kohdeyrityksen näkökulmasta. Kohteet keskittyvät kahteen asiaan: karsintamenetelmän kehittämiseen sekä WAAM-menetelmän kustannustehokkuuden parantamiseen.

Vaikka kolmivaiheinen karsintamenetelmä on ollut tämän työn rajoissa toimiva tapa selvittää potentiaaliset ja soveltuvat komponentit, on se kuitenkin tärkein jatkokehitettävä kohde. Työssä luotu karsintamenetelmä toimii erinomaisena pohjana kohdeyritykselle kartoittaa eri laitekokonaisuuksien komponenttien soveltuvuutta WAAM-valmistukseen. Karsintamenetelmän jatkokehitys on esitetty seuraavasti, jaettuna neljään eri vaiheeseen:

1. 3D-mallien perusteella luodun osaluetteloon luotettavuuden ja tietojen kattavuuden parantaminen. Luotettavuuden parantamisella tarkoitetaan muun muassa oikeanlaista nimeämistä komponenteille sekä todellisten päämittojen esittämistä jokaiselle komponentille. Yksittäisen komponentin tietojen kattavuutta voidaan parantaa esimerkiksi ilmoittamalla osan kohdalla käytetyn aihion päämitat sekä paino ja kokoonpanon kohdalla kokoonpanoon kuuluvien osien lukumäärä.
2. Muiden tietojärjestelmien tietojen ja WAAM-valmistuksen kustannusarvion integroiminen osaluetteloon. Tällä tavoin pystytään luetteloon sisällyttämään muun muassa eri kustannus- ja valmistustietoja.
3. Arviointityökalu, jonka tarkoituksena on arvioida komponentin tulostettava massa. Tämä voisi perustua esimerkiksi komponentin tilavuus ja päämittatietoihin, jonka

perusteella laskettaisiin tulostettava massa. Tämän perusteella voitaisiin laskea myös WAAM-valmistuksen kustannukset.

4. Osaluettelokokonaisuuden automatisointi siten, että se arvioi komponentit parhaasta huonoimpaan valittujen kriteerien perusteella.

Toisena tärkeänä jatkokehityskohteenä on kohdeyrityksen WAAM-menetelmän kustannustehokkuuden parantaminen. Kustannustehokkuuden nostaminen lisää WAAM-menetelmän mahdollisuuksia komponenttien valmistuksessa. Ensimmäinen mahdollinen tapa WAAM-valmistuksen kustannustehokkuuden nostamiseksi, on lisätä yksittäisiä robotteja valmistusoluun. Tällä tavoin voidaan suhteessa kasvattaa hitsiaineentuottoa kustannuksiin verrattuna. Eli mitä nopeammin pystytään komponentti valmistamaan, sitä enemmän valmistuskustannuksissa voidaan säästää. Mitä enemmän robotteja on valmistussolussa, sitä nopeampaa myös valmistaminen on. Myös optimoimalla valmistusta ja valmistusstrategiaa WAAM-valmistukselle voidaan nopeuttaa komponentin valmistusta. Lähtökohtaisesti tällä hetkellä rajoittavana on WAAM-valmistuksen korkeammat kustannukset verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, kun on tarkasteltu valittuja selluteollisuuden pesulaitteita. Jos tavoitteena on löytää mahdollisimman monta komponenttia WAAM-valmistukseen ei valitut selluteollisuuden pesulaitteet ole välttämättä paras valinta, koska laitteet ovat optimoitu levyrakenteisina mahdollisimman kustannustehokkaiksi. Kuten on jo aiemmin mainittu, myös liiketoimintaympäristö voi olla vaikuttava tekijä. Etenkin jatkotutkimuksen kannalta on tärkeää selvittää, onko huoltoliiketoiminnassa tai eri laitteissa mahdollisesti enemmän potentiaalia WAAM-valmistukselle.

6 Johtopäätökset

Johdannossa on esitetty työn tutkimuskysymykset, joihin tässä työssä on pyritty vastaamaan. Esitetyt tutkimuskysymykset olivat:

1. Millä tavalla valittujen pesulaitteiden komponenttien potentiaalisuutta ja soveltuvuutta valmistettavaksi WAAMilla mitataan?
2. Mitkä ovat karsintamenetelmän mittarit? Eli millä mittareilla valitaan potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen?
3. Millä tavalla arvioidaan WAAM-valmistukseen suunniteltujen komponenttien hyöty ja toimivuus?

Pesulaitteiden komponenttien soveltuvuutta WAAM-valmistukseen mitattiin työssä luodun karsinta- ja arviointimenetelmän avulla. Tämä toteutettiin kolmivaiheisena karsintana käyttäen joka vaiheessa erilaisia arviointikriteerejä. Käytettävät kriteerit eli mittarit valittiin karsintavaiheen tavoitteen mukaisesti. Nämä voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan, karsintamenetelmään perustuen. Ensimmäisenä toteutettiin karsintamenetelmä, jonka kriteerit perustuvat osaluettelon tietoihin. Toisena toteutettiin karsintamenetelmä, jossa pisteytettiin komponentit niiden 3D-mallin perusteella arviointimatriisia käyttäen. Viimeisenä vaiheena toteutettiin komponentin valinta, jossa valittiin komponentit WAAM-valmistukseen niiden kustannustietojen perusteella. Tulosten perusteella luotu karsintamenetelmä todettiin toimivaksi, ja sillä saatiin karsittua potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit. WAAM-valmistukseen suunnitellun komponentin hyötyä mitattiin arvioimalla komponentin kustannuksia valmistusmenetelmien välillä. Toimivuutta mitattiin vertailemalla valmistusaikaa ja materiaalin käyttöä valmistusmenetelmien välillä. Tulokset osoittavat, että valittujen komponenttien kohdalla WAAMin soveltamisella saavutetaan hyötyä verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmin valmistettuihin komponentteihin.

Diplomityön päällimmäisenä tavoitteena oli löytää jokaisesta valitusta selluteollisuuden pesulaitteesta potentiaalinen ja soveltuva komponentti ja suunnitella se WAAM-valmistukseen. Tämä on myös tässä työssä kahden pesulaitteen kohdalla toteutunut. Komponentit valittiin DD-pesurista ja painediffusööristä, kun taas GF-suotimen komponentit eivät osoittautuneet soveltuviksi WAAM-valmistukseen. Tavoitteeseen päästiin johdonmukaisesti

kuvassa 1 esitettyjen välitavoitteiden kautta. Yksinkertaistettuna tarkoituksena oli luoda karsintamenetelmä pesulaitteiden komponenteille, jonka avulla valitaan potentiaalisimmat ja soveltuvimmat komponentit WAAM-valmistukseen. Valitut komponentit suunnitellaan WAAM-valmistusta varten ja arvioidaan verraten alkuperäisiin perinteisiin valmistusmenetelmin valmistettuihin komponentteihin. Menetelmän toimivuuden ja tulosten perusteella voidaankin todeta, että tavoitteisiin on päästy ja työ on onnistunut.

Johtopäätöksenä työssä on noussut esiin kaksi merkittävää asiaa:

1. Kolmivaiheisen karsintamenetelmän toimivuus ja sen parantaminen.
2. Kohdeyrityksen WAAM-valmistuksen kustannustehottomuus verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin valittujen selluteollisuuden pesulaitteiden kohdalla.

Ensimmäisenä asiana on kolmivaiheisen karsintamenetelmän toimivuus ja sen parantaminen. Työssä pystyttiin osoittamaan, että kolmivaiheinen karsintamenetelmä on toimiva ja sen avulla löydettiin potentiaalisimmat komponentit WAAM-valmistukseen valituista selluteollisuuden pesulaitteista. Kuitenkin kolmivaiheinen karsintamenetelmän tehokkuutta, luotettavuutta ja automatiikkaa voidaan parantaa kattavammalla osalistalla ja integroimalla eri järjestelmien tietoja yhteen osalistaan. Tämän avulla karsintamenetelmä pystyttäisiin automatisoimaan mahdollisesti kokonaan ja se voisi olla työkalu WAAM-valmistukseen soveltuvien ja potentiaalisten komponenttien kartoittamiseksi

Toisena asiana on kohdeyrityksen WAAM-valmistuksen kustannustehottomuus verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin valittujen selluteollisuuden pesulaitteiden kohdalla. Osittain kustannustehottomuuden takia WAAM-valmistukseen soveltuvien ja potentiaalisten komponenttien määrä jää alhaiseksi. Nostamalla kustannustehokkuutta löydettäisiin enemmän soveltuvia ja potentiaalisia komponentteja kyseiselle valmistusmenetelmälle. Lähtökohtaisesti valitut selluteollisuuden pesulaitteet ovat vuosien saatossa optimoituja levyrakenteita, jolloin oletusarvoisesti WAAM-valmistukselle soveltuvien ja potentiaalisten komponenttien määrä on vähäinen.

7 Yhteenveto

Työn johdannossa on määritetty työlle tutkimuskysymykset ja esitelty työn tavoite. Diplomityön tavoitteena oli löytää jokaisesta työhön valitusta selluteollisuuden pesulaitteesta potentiaalinen ja soveltuva komponentti ja suunnitella se WAAM-valmistukseen. Tämä toteutettiin luomalla kolmivaiheinen karsintamenetelmä komponenttien karsimiseksi sekä uudelleensuunnittelemalla ja arvioimalla WAAM-valmistukseen valitut komponentit. Samalla työssä on myös pystytty vastaamaan esitettyihin tutkimuskysymyksiin.

Asetettuihin tavoitteisiin pääsemiseksi kirjallisuuskatsauksessa luotiin teoriapohja työlle esittelemällä kohdeyrityksen pesulaitteet, yleisesti WAAM-menetelmä ja siihen liittyvät asiat, valmistus- ja hitsauskustannusten muodostuminen sekä aiempi tutkimus aiheeseen liittyen.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella luotiin menetelmät-vaihe, johon kuuluu kolmivaiheinen karsintamenetelmä, komponentin uudelleensuunnittelu WAAM-valmistusta varten ja WAAM-valmistukseen suunniteltujen komponenttien arvioiminen. Kolmivaiheinen karsintavaihe käsittää vaiheet komponenttien karsimisesta aina komponentin valintaan. Ensimmäinen karsintavaihe, karsii komponenteista noin 98 % pois lähes automaattisesti. Toinen karsintavaihe suoritettiin luodun arviointimatriisin perusteella, jonka tarkoituksena oli pisteyttää komponentit parhaimpien valitsemiseksi tarkempaa tarkastelua varten. Komponentin valintavaiheessa valittiin kahden valmistusmenetelmän valmistuskustannusten vertailun perusteella potentiaalisimmat komponentit. Tämän jälkeen komponenteille suunniteltiin valmistusstrategia WAAM-valmistukseen. Viimeiseksi määriteltiin, kuinka komponentit arvioidaan kustannusten, materiaalin- ja ajankäytön perusteella.

Tuloksissa on esitetty työn kannalta tärkeimmät ja oleelliset tulokset. Näiden perusteella voidaan todeta, että luotu karsintamenetelmä on toimiva ja sen perusteella pystytään löytämään potentiaalisimmat komponentit WAAM-valmistukseen. Analyysin ja pohdinnan perusteella havainnollistettiin, mitkä asiat ovat yleisellä tasolla toimineet hyvin sekä mitä asioita pitäisi parantaa, jotta karsintamenetelmä olisi vielä luotettavampi ja tehokkaampi. Jatkokohitysehdotukset on annettu analyysin ja pohdinnan perusteella.

Johtopäätöksissä todettiin, että asetetut tavoitteet saavutettiin ja tutkimuskysymyksiin vastattiin. Vaikka luotu karsintamenetelmä on toimiva, niin karsintamenetelmän tehokkuuden, luotettavuuden ja automatiikan nostamiseksi on komponenttien tietoja eri järjestelmistä integroitava yhteiseen osaluetteloon. Kohdeyhteyden WAAM-menetelmän kustannustehottomuus verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin vähentää WAAM-valmistukseen soveltuvien potentiaalisten komponenttien määrää. Näin ollen WAAM-menetelmä soveltuu valmistusmenetelmänä heikosti tässä työssä tarkasteltuihin selluteollisuuden pesulaitteisiin.

Lähteet

- Andritz. 2022a. Washers & Filters. Tuotekodin kotisivu. [Andritz Oy:n intranetissä]. [Viitattu: 15.12.2022]. Saatavilla: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.
- Andritz. 2022b. Pressure Diffuser. PowerPoint -esitys. [Andritz Oy:n intranetissä]. [Viitattu: 16.12.2022]. Saatavilla: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.
- Andritz. 2022c. Andritz in Finland. PowerPoint -esitys. [Andritz Oy:n intranetissä]. [Viitattu: 17.12.2022]. Saatavilla: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.
- Andritz. 2022d. Center of Excellence in Savonlinna. PowerPoint -esitys. [Andritz Oy:n intranetissä]. [Viitattu: 17.12.2022]. Saatavilla: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.
- Andritz. 2021. Käyttö- ja huolto-ohje. DD-Pesuri DD4570-10. [Andritz Oy: n intranetissä]. [Viitattu: 14.12.2022]. Saatavilla: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.
- Campatelli, G., Montevicchi, F., Venturini, G., Ingarao, G. & Priarone, P, C. 2019. Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 7. s. 1–11.
- Chang, K. 2013. Product Manufacturing and Cost Estimating using CAD/CAE. Chapter 6 – Product Cost Estimating. s. 237–294.
- Cunningham, C. R., Wikshåland, S., Xu, F., Kemakolam, N., Shokrani, A., Dhokia, V. & Newman, S. T. 2017. Cost Modeling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM 2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy. *Procedia Manufacturing* 11, s. 650–657.
- Diegel, O., Nordin, A. & Motte, D. 2020. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. Springer Series in Advanced Manufacturing. s. 43–47.
- Etteplan. 2023. AMOTool. [Verkkosovellus]. [Viitattu: 19.1.2023]. Saatavilla: [<https://amo-tools.com/login>]

Huff, R. & Wohlers, T. 2019. DfAM insight: How to choose candidate products for AM production applications. The magazine for the metal additive manufacturing industry. *Metal Additive Manufacturing* 5 (2). s. 137–142.

Hytönen, J. 2005. Sellupesurin sisäiset vaiheet erottavien komponenttien kehittäminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto. Koneensuunnittelunlaitos. 71 s.

KnowPulp. 2022. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. v. 21.0. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 14.12.2022]. Saatavilla: [<http://www.knowpulp.com.ezproxy.cc.lut.fi/extranet/suomi/kps/ui/knowpulp.htm>]

Lange, J., Feucht, T. & Erven, M. 2021. 3D Printing with steel: Additive Manufacturing for connections and structures. Extended keynote paper of Eurosteel 2021. Ernst & Sohn. *Steel Construction* 13 (3). s. 144–153.

Lin, Z., Song, K. & Yu, X. 2021. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing processes* 70. s. 24–45.

Nuopponen, M. 2023. Myynnin ja projektien päällikkö Andritz Savonlinna Works Oy:lla. Sähköpostikeskustelu 21.3.2023.

Piili, H., Hirvimäki, M., Väistö, T., Nyamekye, P., Pekkarinen, J. & Salminen, A. 2014. Katsaus lisäävän valmistuksen (aka 3D-tulostus) mahdollisuuksiin ja kustannuksiin metallisten tuotteiden valmistuksessa. FAST COINS-projekti. LUT-Yliopisto. 31 s.

Posch, G., Chladil, K. & Chladil, H. 2017. Material properties of CMT – metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries. *International Institute of Welding. Weld World* 61. s. 873–882.

Priarone, P. C., Campatelli, G., Montevecchi, F., Venturini, G. & Settineri, L. 2019. A modelling framework for comparing the environmental and economic performance of WAAM-based integrated manufacturing and machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 68. s. 37–40.

Rodrigues, T. M., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G. & Oliveira, J. P. 2019. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Review. Materials* 12 (7). 41 s.

- SelectAM. 2023. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 20.1.2023]. Saatavilla: [<https://selectam.io/>]
- SFS-EN ISO/ASTM 52900. 2021. Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 68 s.
- Sigmund, O. & Maute, K. 2013. Topology optimization approaches. A comparative review. *Structural and multidisciplinary optimization*. 48 (6). s. 1031–1055.
- Snellman, H. 2023. Kehitysinsinööri Andritz Savonlinna Works Oy:lla. Haastattelu 17.3.2023. Teams-puhelu.
- Srivastava, M., Rathee, S., Tiwari, A. & Dongre, M. 2023. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. *Materials Chemistry and Physics* 294. 30 s.
- Stenbacka, N. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys.
- Van de Ven, E., Ayas, C. & Langelaar, M. 2021. Computational Design of Complex 3D Printed Objects. *3D Printing for Energy Applications. Part II 3D printing challenges for production of complex objects*. s. 91–108.
- Varis, S. 2020. Lankapohjaisen suorakerrostuksen hyödyntäminen sellu- ja paperiteollisuuden konepajavalmistuksessa. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. School of Energy Systems. 61 s.
- Varis, S. 2022. Lisäävän valmistuksen päällikkö Andritz Savonlinna Works Oy:lla. Haastattelu 12.12.2022. Savonlinna.
- Varis, S. 2023. Lisäävän valmistuksen päällikkö Andritz Savonlinna Works Oy:lla. Haastattelu 20.2.2023. Teams-puhelu.
- Vesasto, M. 2023. Myynti- ja kehitysinsinööri Andritz Savonlinna Works Oy:lla. Haastattelu 14.3.2023. Teams-puhelu.

LIITTEET

Liite 1. Osien arviointimatriisi

OSIEN ARVIOINTI					
Arvosana/ Parametri	1	2	3	4	5
Hybridivalmistus	Hybridivalmistus ei mahdollista.	Hybridivalmistus mahdollista, mutta siitä ei ole hyötyä.	Yksi seuraavista ehtoista toteutuu: - Painon vähennys -Työvaiheitten määrän vähentäminen -Rakenteen yksinkertaistaminen valmistuksen näkökulmasta	Kaksi seuraavista ehtoista toteutuu: - Painon vähennys -Työvaiheitten määrän vähentäminen -Rakenteen yksinkertaistaminen valmistuksen näkökulmasta	Kaikki seuraavista ehtoista toteutuu: - Painon vähennys -Työvaiheitten määrän vähentäminen -Rakenteen yksinkertaistaminen valmistuksen näkökulmasta
Kompleksisuus	Yksinkertaisin komponentti. Päämitat vastaavat komponenttia, poikkileikkaus samanlainen koko paksuudelta. Esimerkkinä yksinkertainen laippa.		Yksinkertaisen ja kompleksisen komponentin välimuoto. Poikkileikkaus muuttuu komponentin eri kohdissa. Sisältää jo eräviä piirteitä.		Kompleksinen komponentti. Poikkileikkaus muuttuu radikaalisti eri suuntiin koordinaatiston mukaan. Sisältää paljon eräviä piirteitä.
Työvaiheitten määrä	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä nousisi.	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä pysyisi samana.	WAAM-valmistuksessa työvaiheita voitaisiin vähentää 1 tai 2 kappaletta.	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä vähentyy puolella.	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä vähentyy yli puolet alkuperäisestä.
Painon vaikutus	WAAM-valmistuksessa paino pysyy samana tai sitä lisätään.		WAAM-valmistuksen avulla materiaalihukka vähentyisi noin 20–30 %.		WAAM-valmistuksen avulla materiaalihukka vähentyisi yli 50 %.

Liite 2. Kokoonpanojen arviointimatriisi

KOKOONPANOJEN ARVIOINTI					
Arvosana/ Parametri	1	2	3	4	5
Hybridivalmistus	Hybridivalmistus ei mahdollista tai se haittaa valmistusta.	Hybridivalmistus mahdollista, mutta siitä ei ole hyötyä.	Yksi seuraavista ehdoista toteutuu: - Painon vähennys -Työvaiheitten määrän vähentäminen -Osien määrän vähennys	Kaksi seuraavista ehdoista toteutuu: - Painon vähennys -Työvaiheitten määrän vähentäminen -Osien määrän vähennys	Kaikki seuraavista ehdoista toteutuu: - Painon vähennys -Työvaiheitten määrän vähentäminen -Osien määrän vähennys
Kompleksisuus	Yksinkertaisin komponentti. Päämitat vastaavat komponenttia, poikkileikkaus samanlainen koko pak-suudelta. Esimerkkinä yksinkertainen laippa.		Yksinkertaisen ja kompleksisen komponentin välimuoto. Poikkileikkaus muuttuu komponentin eri kohdissa. Sisältää jo eräviä piirteitä.		Kompleksinen komponentti. Poikkileikkaus muuttuu radikaalisti eri suuntiin koordinaatiston mukaan. Sisältää paljon eräviä piirteitä.
Työvaiheitten määrä	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä nousisi.	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä pysyisi samana.	WAAM-valmistuksessa työvaiheita voitaisiin vähentää 1 tai 2 kappaletta.	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä vähentyy puolella.	WAAM-valmistuksessa työvaiheitten määrä vähentyy yli puolet alkuperäisestä.
Painon vaikutus	WAAM-valmistuksessa paino pysyy samana tai sitä lisätään.		WAAM-valmistuksen avulla materiaalihukka vähentyisi noin 20–30 %.		WAAM-valmistuksen avulla materiaalihukka vähentyisi yli 50 %.
Osien määrän vähentäminen	Osien määrä pysyy samana.		WAAM-valmistuksen avulla voidaan vähentää puolet alkuperäisestä osien määrästä. Suhdeluku saadaan 3. Suhdeluku lasketaan seuraavasti: Alkuperäisen kokoonpanon osien määrä jaettuna osien määrällä WAAM-valmistuksessa.		Suhdeluvuksi saadaan yli 6. Suhdeluku lasketaan seuraavasti: Alkuperäisen kokoonpanon osien määrä jaettuna osien määrällä WAAM-valmistuksessa.