

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

METALLIEN JAUHEPETISULATUKSEN HYÖDYNTÄMINEN
HYDRAULIIKKALOHKOJEN VALMISTUKSESSA

USE OF METAL POWDER BED FUSION FOR MANUFACTURING HYDRAULIC
MANIFOLDS

Lappeenrannassa 6.1.2022

Tommi Laitinen

Tarkastaja TkT Ilkka Poutiainen

Ohjaaja TkT Ilkka Poutiainen

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Tommi Laitinen

Metallien jauhepetisulatuksen hyödyntäminen hydrauliiikkalohkojen valmistuksessa

Kandidaatintyö

2022

21 sivua, 7 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Ilkka Poutiainen

Ohjaaja: TkT Ilkka Poutiainen

Hakusanat: Lisäävä valmistus, 3D-tulostus, jauhepetisulatus, hydrauliikkalohkot

Tässä kandidaatintyössä käsitellään hydrauliikkalohkojen valmistusta jauhepetisulatusta hyödyntäen. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, voidaanko lisäävän valmistuksen teknologioihin lukeutuvalla jauhepetisulatuksella saavuttaa hydrauliikkalohkojen valmistuksessa hyötyjä verrattuna perinteisiin poistaviin valmistusmenetelmiin. Aiheesta tehtiin kirjallisuuskatsaus.

Perinteisesti hydrauliikkalohkot valmistetaan prismaattisesta metalliainhiosta jyrsimällä ja poraamalla siihen reikiä eri suunnista. Lohkoja käytetään jakamaan hydrauliiöljy haluttuihin paikkoihin hydraulisessa järjestelmässä. Valmistusprosessi on usein kallis, sillä lohkojen valmistukseen kuluu paljon työtunteja ja eräkoot ovat tyypillisesti melko pieniä.

Työssä tutkittiin esimerkkejä jauhepetisulatuksella valmistetuista hydrauliikkalohkoista. Vaikka jauhepetisulatus valmistusmenetelmänä saattaa olla kalliimpi kuin perinteiset valmistusmenetelmät, sen avulla valmistettu hydrauliikkalohko oli kuitenkin huomattavasti kevyempi ja geometrialtaan paremmin optimoitu perinteiseen valmistusmenetelmään verrattuna. Lisäksi jauhepetisulatus menetelmänä voi vaikuttaa myös hydrauliikkalohkojen laatuun parantavasti. Käsitellyissä esimerkeissä jauhepetisulatuksella valmistetut hydrauliikkalohkot olivat myös sellaisenaan sovitettavissa vanhaan kokoonpanoon. Hydrauliikkalohko vaikuttaa siten soveltuvan varsin hyvin lisäävän valmistuksen käyttökohteeksi.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Tommi Laitinen

Use of metal powder bed fusion for manufacturing hydraulic manifolds

Bachelor's thesis

2022

21 pages, 7 figures and 2 tables

Examiner: D.Sc. (Tech.) Ilkka Poutiainen

Supervisor: D.Sc. (Tech.) Ilkka Poutiainen

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, powder bed fusion, hydraulic manifolds

In this bachelor's thesis, the use of metal powder bed fusion in hydraulic manifolds is discussed. The focus of the study was the laser powder bed fusion of metals and the benefits it may offer over traditional manufacturing methods. A literature study was conducted to research the topic.

Traditionally hydraulic manifolds are manufactured by milling and drilling holes into a prismatic metal stock. The manifolds are used to distribute hydraulic fluid to the different parts of the hydraulic system. The manufacturing process is traditionally very expensive since the machining takes a lot of time and the volume of production is typically quite low.

Different case studies of existing manifold redesigns for additive manufacturing were studied. Although traditional manufacturing methods were cheaper than additive manufacturing with powder bed fusion in some cases, additive manufacturing offered considerable weight savings and optimized fluid channel geometries over traditional manufacturing methods. Additionally, the quality and performance of the hydraulic manifolds were improved. The redesigned hydraulic manifolds were also compatible with the existing assemblies, so they could be used as replacement parts. Therefore, hydraulic manifolds seem like a great application for additive manufacturing.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
LYHENNELUETTELO	5
1 JOHDANTO	6
2 HYDRAULIIKKALOHKOT JA NIIDEN VALMISTUSMENETELMÄT	8
2.1 Hydrauliiikkalohkojen ominaisuudet ja toiminnalliset vaatimukset.....	8
2.2 Hydrauliikkalohkojen valmistusmenetelmät	8
2.3 Hydrauliikkalohkon suunnittelutyökaluja.....	9
2.4 Hydrauliikkalohkoissa käytetyt materiaalit	10
2.5 Metallien jauhepetisulatus	11
2.6 Metallisten koneenosien lisäävän valmistuksen kustannuksista.....	12
3 HYDRAULIIKKALOHKOJEN VALMISTUS JAUHEPETISULATUKSELLE KÄYTÄNNÖSSÄ	13
3.1 Jauhepetisulatus hydrauliikkalohkojen valmistuksessa	13
3.2 Case GKN Powder Metallurgy	15
3.3 Case Aidro	16
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	18
LÄHTEET	20

LYHENNELUETTELO

AM	Additive Manufacturing (suom. lisäävä valmistus)
CAD	Computer Aided Design (suom. tietokoneavusteinen suunnittelu)
CAM	Computer Aided Manufacturing (suom. tietokoneavusteinen valmistus)
CFD	Computational Fluid Dynamics (suom. numeerinen virtausdynamiikka)
CNC	Computer Numerical Control (suom. numeerinen ohjaus)
L-PBF	Laser Powder Bed Fusion (suom. laser jauhepetisulatus)

1 JOHDANTO

Lisäävän valmistuksen (engl. additive manufacturing, AM) eli 3D-tulostuksen yleistymisen on viime vuosina mullistanut koneenosien suunnittelua. Toisin kuin perinteisessä poistavassa valmistusteknologiassa, lisäävässä valmistuksessa käytetään vain se materiaali, mitä tarvitaan. Näin ollen valmistusteknologiana lisäävä valmistus mahdollistaa erittäin optimoitujen rakenteiden valmistuksen kustannustehokkaasti. Vaikka koneenosien suunnittelussa on ensisijaisesti ajateltava koneenosien tulevaa käyttötarkoitusta ja siihen liittyviä vaatimuksia, myös koneenosien valmistuksen kustannukset on huomioitava osana suunnitteluprosessia. Yksi keskeisimmistä koneenosien suunnitteluprosessin vaiheista onkin kustannustehokkaimman valmistusmenetelmän löytäminen.

Erityistä hyötyä lisäävän valmistuksen teknologioista voi olla metallista valmistettavien hydraulisten lohkojen valmistusprosessissa, jossa valmistuskustannukset voivat olla suuria. Hydrauliikassa tehoa siirretään nesteen paineen ja virtauksen avulla. Hydrauliikkalohko on yksi keskeisistä tehonsiirron elementeistä. Lohkon tehtävänä on jakaa hydrauliikkaöljy haluttuun paikkaan järjestelmässä useiden sisäisten kanavien avulla. Koska nesteen paine lohkon sisällä on suuri, valmistetaan ne käytännössä aina metallista. Perinteisesti hydrauliikkalohkot valmistetaan prismaattisesta metalliaihiosta jyrsimällä ja poraamalla siihen reikiä eri suunnista. Tällainen niin sanottu poistava valmistustekniikka on prosessina kallis, sillä tyypillisesti lohkojen valmistukseen kuluu paljon työtunteja.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, voidaanko lisäävän valmistuksen teknologioihin lukeutuvalla jauhepetisulatuksella saavuttaa hydrauliikkalohkojen valmistuksessa hyötyjä verrattuna perinteisiin poistaviin valmistusmenetelmiin. Tutkimusongelma voidaan jakaa seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Voidaanko jauhepetisulatuksella saavuttaa kustannussäästöjä hydrauliikkalohkojen valmistuksessa?
- Kuinka paljon hydrauliikkalohkojen rakennetta voidaan keventää, kun valmistusmenetelmänä käytetään jauhepetisulatusta?
- Voidaanko jauhepetisulatuksella parantaa hydrauliikkalohkojen laatua?

- Sopiiko jauhepetisulatuksella valmistettu hydrauliiikkalohko sellaisenaan vanhaan kokoonpanoon?

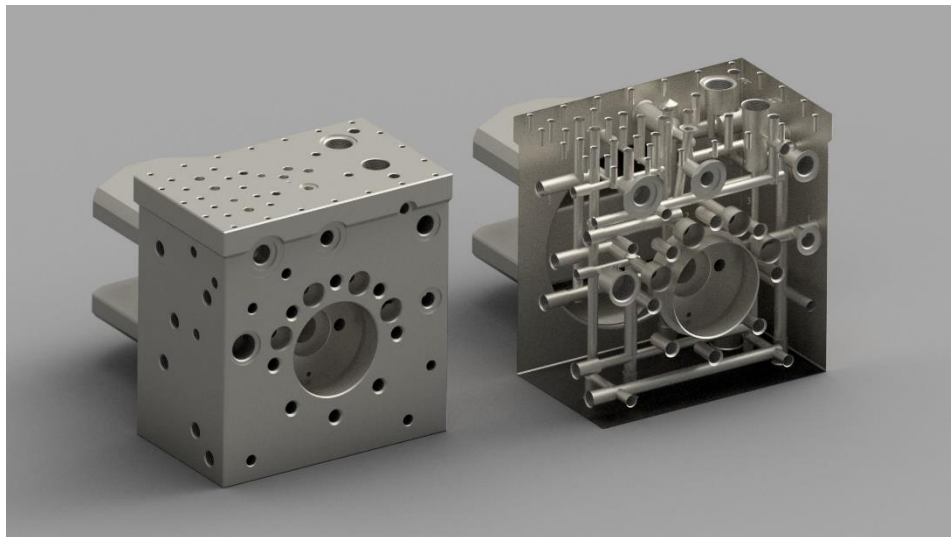
Koska tutkielman tarkoituksena on selvittää jauhepetisulatuksen mahdollisia hyötyjä hydrauliikkalohkojen valmistuksessa, on tutkimusmenetelmäksi valittu kirjallisuuskatsaus. Tutkielmaan on haettu lähteitä LUT Primo ja Google Scholar -palveluiden kautta käyttämällä hakutermeinä mm. ”additive manufacturing”, ”hydraulic manifold” sekä ”laser powder bed fusion”. Tässä työssä tärkeimpinä lähteinä on käytetty Gibson et. al. teosta Additive Manufacturing Technologies sekä Diegel et. al. artikkelia Design for additive manufacturing process for a lightweight hydraulic manifold. Lisäksi tässä työssä on käytetty lähteenä koneensuunnittelualan yritysten julkaisemia case-tutkimuksia liittyen hydrauliikkalohkojen valmistukseen jauhepetisulatusmenetelmällä. Tutkimukseen valikoitui case-tutkimukset GKN Powder Metallurgylta ja Aidrolta.

Tämän tutkielman toisessa luvussa käsitellään hydrauliikkalohkojen toiminnallisia vaatimuksia sekä erilaisiin valmistusmenetelmiin liittyviä etuja ja haittoja. Kolmannessa luvussa esitellään käytännön kokemuksia hydrauliikkalohkojen valmistuksesta jauhepetisulatusmenetelmällä perustuen akateemiseen tutkimukseen sekä alan yritysten julkaisemiin case-tutkimuksiin. Lopuksi tutkielman viimeisessä luvussa kootaan havainnot kirjallisuudesta ja case-tutkimuksista johtopäätösten muotoon.

2 HYDRAULIIKKALOHKOT JA NIIDEN VALMISTUSMENETELMÄT

2.1 Hydrauliikkalohkojen ominaisuudet ja toiminnalliset vaatimukset

Hydrauliikkalohko on yksi keskeisistä tehonsiirron elementeistä hydraulikassa. Lohkon tehtävänä on jakaa hydrauliiikkaöljy haluttuun paikkaan järjestelmässä useiden sisäisten kanavien avulla. Lohkoja käytetään usein liikkuvissa laitteissa, kuten robotiikassa ja työkoneissa. Kuvassa 1 on malli ohjusjärjestelmässä käytetystä hydrauliikkalohkosta. Tyypillinen vaatimus hydrauliikkalohkolle on suuri tehotiheys tai tehopainosuhte. Suuri tehotiheys saavutetaan keventämällä rakennetta ja minimoimalla lohkon sisäiset tehohäviöt. Lisäksi lohkon sisäisten kanavien tulee kestää nesteen suuresta paineesta aiheutuvat rasitukset. (Zhang et. al., 2020)



Kuva 1. Malli hydrauliikkalohkosta ja sen sisäisestä rakenteesta. (Fluid Power Engineering, 2021)

2.2 Hydrauliikkalohkojen valmistusmenetelmät

Perinteisissä valmistusmenetelmissä, kuten jyrsinnässä ja porauksessa, materiaalia poistetaan aihioista. Hydrauliikkalohkon sisäisten kanavien valmistus on haastavaa näillä menetelmillä ja usein monimutkaisissa lohkoissa joudutaan tekemään kompromisseja osan toiminnallisen tehokkuuden ja ylimääräisen painon osalta. Joissain tapauksissa lohkon sisäinen rakenne voi olla yksinkertaisesti mahdotonta valmistaa perinteisin menetelmin. (Zhang et. al., 2020)

Tärkeimmät lisäävän valmistuksen tuomat hyödyt perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna voidaan tiivistää seuraavasti:

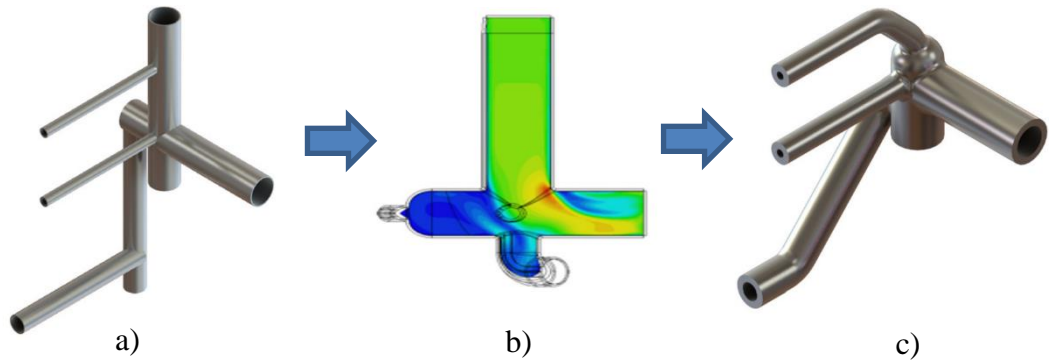
1. rakenteen muodon vapaus mahdollistaa suorituskykyisempien osien suunnittelun,
2. valmistus suoraan CAD-mallin pohjalta yksinkertaistaa valmistusprosessia,
3. valmistusprosessi vaatii vähemmän suunnittelua ja valmisteluja,
4. laajemmat räätälöinti- ja optimointimahdollisuudet tuotteille,
5. lyhyempi toimitusketju, varastotilan ja logistiikan tarve pienenee,
6. pienempi ympäristöjalanjälki ja materiaalihukan minimointi.

(Afkhami et. al., 2021)

Edellä mainituista hyödyistä tärkein hydrauliiikkalohkoja ajatellen on rakenteen muodon vapaus. Koska lisäävä valmistus mahdollistaa huomattavasti vapaamman rakenteen lohkolle, voidaan lohkon sisäistä rakennetta optimoida entistä tehokkaammin ja säästää materiaalia. (Zhang et. al., 2020)

2.3 Hydrauliikkalohkon suunnittelutyökaluja

Lisäävässä valmistuksessa osat valmistetaan suoraan CAD-mallien pohjalta, joten se on tietokoneavusteista valmistusta (engl. computer aided manufacturing, CAM). Ennen kuin osaa lähdetään valmistamaan CAD-mallin pohjalta, on syytä tarkistaa osan toimivuus simuloimalla sen toimintaa virtuaalisesti. Hydrauliikkalohkojen suunnittelun osalta tärkeä työkalu on numeerinen virtausdynamiikka (engl. computational fluid dynamics, CFD). Virtausdynamiikan avulla nesteen virtausta lohkon sisällä voidaan simuloida ja näin optimoida lohkon rakennetta asettamalla haluttuja tavoitteita lohkon toiminnalle. Hydrauliikkalohkon osalta optimoinnin tavoitteita voivat olla esimerkiksi painehäviöiden ja seinämäpaksuuden minimointi. Kuvassa 2 on esitetty vaiheittain hydrauliikkalohkon sisäisen putkiston rakenteen optimointi CFD-analyysia käyttäen. (Alshare et. al., 2019)



Kuva 2. Hydraulikkalohkon putkiston optimointi virtausdynamiikkaa hyödyntäen.

a) alkuperäinen putkisto yksinkertaistettuna, b) CFD-analyysillä löydetty ongelmakohta, c) CFD-analyysin perusteella optimoitu putkisto. (Renishaw, 2016)

2.4 Hydraulikkalohkoissa käytetyt materiaalit

Tyypillisesti tehonsiirrossa käytetyt hydraulikkalohkot valmistetaan teräksestä, alumiinista tai ruostumattomasta teräksestä. Tärkeimmät materiaalinvalintaan vaikuttavat tekijät ovat järjestelmässä käytettävä nesteen paine ja osan käyttöympäristö. Alumiini kannattaa valita silloin, kun järjestelmän paine on alhainen ja halutaan mahdollisimman kevyt rakenne. Terästä ja ruostumatonta terästä käytetään tyypillisesti korkeamman paineen järjestelmissä. (Diegel et. al., 2020)

Hydraulikkalohkojen lisäävään valmistukseen soveltuvista materiaaleista yleisimmät ovat alumiini ja ruostumaton teräs. Yksi ruostumattoman teräksen tyypeistä on AISI 316L, jota käytetään myös hydraulikkalohkoissa ja se soveltuu lisäävään valmistukseen. Alumiiniseoksista esimerkiksi AlSi10Mg on tähän tarkoitukseen soveltuva materiaali. (Diegel et. al., 2020)

Taulukossa 1 on vertailtu näiden kahden materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Lisäävässä valmistuksessa tuotteen lopullinen kestävyys riippuu osittain myös valmistuksessa käytetyistä parametreista. Yksi keskeisimmistä on kerrospaksuus, joka on tässä vertailussa jauhepetisulatuksessa AISI 316L:n osalta 40 μm (EOS, 2021b) ja AlSi10Mg:n osalta 30 μm (EOS, 2021a).

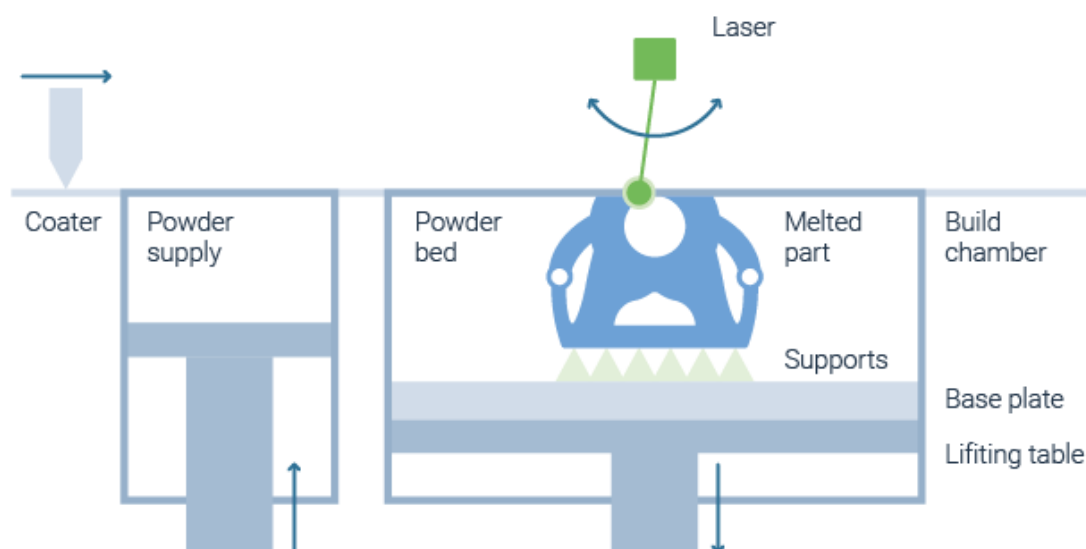
Taulukko 1. AISI 316L ja AlSi10Mg mekaaniset ominaisuudet jauhepetisulatuksessa (EOS, 2021a; EOS, 2021b)

	AISI 316L (40 μm)	AlSi10Mg (30 μm)
Tiheys	7.97 g/cm ³	2.67 g/cm ³
Myötölujuus $R_{p0,2}$	480–540 MPa	230–270 MPa
Murtolujuus R_m	570–640 MPa	450–460 MPa
Kimmomoduuli	180 GPa	70 GPa
Murtovenymä	40–50%	6–10%

2.5 Metallien jauhepetisulatus

Menetelmiä lisäävään valmistukseen on kehitetty aikojen saatossa monia, mutta vain osa niistä soveltuu metallisten osien teolliseen valmistukseen. Etenkin Suomessa yksi yleisimmistä teknologioista metallisten osien lisäävään valmistukseen on laser jauhepetisulatus (engl. laser powder bed fusion, L-PBF). (Afkhami et. al., 2021)

Metallien jauhepetisulatuksessa tavoitteena on sulattaa lasersäteellä tulostusalueelle levitettyä metallijauhetta kerros kerrokselta. Kuvassa 3 on esitelty yksinkertaistetusti prosessia.



Kuva 3. Jauhepetisulatus prosessina. (AMPOWER, 2021)

Laitteeseen syötetään metallijauhetta, jonka laite levittää ohueksi kerrokseksi rakennusalustan päälle. Lasersäde sulattaa tämän kerroksen CAD-mallin poikkileikkauksen mukaisesti. Tämän jälkeen rakennusalustaa lasketaan ja vastaavasti syöttösäiliöstä syötetään lisää jauhetta, jonka laite taas levittää seuraavaksi kerrokseksi. Kerros kerrokselta näin muodostuu CAD-mallin mukainen osa. Tulostusvaiheen jälkeen osat vaativat lähes aina jälkikäsittelyä. Jauhepetisulatuksessa osa voidaan joutua käytetystä materiaalista riippuen leikkaamaan irti tulostuslevystä. Lisäksi mahdolliset tukimateriaalit leikataan irti osasta. (Gibson et. al., 2021, s. 125–127)

2.6 Metallisten koneenosien lisäävän valmistuksen kustannuksista

Poistavilla valmistusmenetelmillä koneenosien geometrialla on suuri vaikutus sen valmistuskustannuksiin. Tyypillisesti mitä enemmän materiaalia joudutaan poistamaan, sitä suuremmat valmistuskustannukset tulevat olemaan, koska osan valmistus vaatii tällöin enemmän työtunteja. Samasta syystä koneenosien geometrian monimutkaisuus myös tyypillisesti nostaa valmistuskustannuksia perinteisillä valmistusmenetelmillä. Lisäävässä valmistuksessa tilanne on päinvastainen: mitä kevyempi valmistettava tuote on, sen edullisempi se on valmistaa. Valmistettavan kappaleen paino on suoraan verrannollinen sen kustannuksiin, koska vain valmistuksessa lisätty materiaali maksaa. Kappaleen geometrian monimutkaisuudella ei ole läheskään yhtä suurta merkitystä kustannuksiin lisäävässä valmistuksessa. (Piili et. al., 2014)

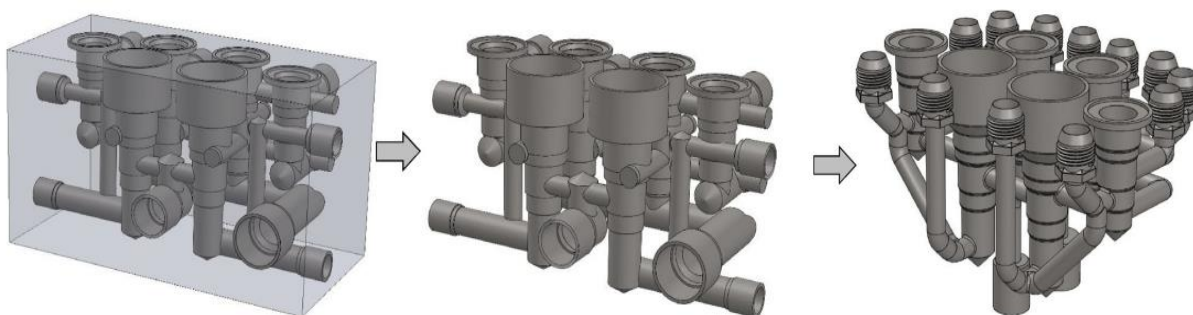
Perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistuskustannuksia pyritään tyypillisesti laskemaan kasvattamalla eräkokoja. Kaikkien tuotteiden osalta tämä ei kuitenkaan ole aina kannattavaa, joten pienillä eräkoilla on merkittävät valmistuskustannukset. Lisäävässä valmistuksessa eräkoolla ei ole juurikaan merkitystä, koska valmistusprosessi on aina sama eräkoosta riippumatta. Näin ollen lisäävä valmistus voi olla huomattavasti edullisempaa, kun eräkoot ovat pieniä. (Piili et. al., 2014)

3 HYDRAULIIKKALOHKOJEN VALMISTUS JAUHEPETISULATUKSELLA KÄYTÄNNÖSSÄ

3.1 Jauhepetisulatus hydrauliiikkalohkojen valmistuksessa

Jauhepetisulatusta hydrauliikkalohkojen valmistusmenetelmänä on tutkittu sekä konesuunnittelualan yrityksissä että akateemisessa tutkimuksessa. Esimerkiksi Diegel et. al. selvittivät tutkimuksessaan ”Design for additive manufacturing process for a lightweight hydraulic manifold” porajumbon hydrauliikkalohkon olemassa olevan rakenteen keventämistä jauhepetisulatusmenetelmää hyödyntäen. Lähtökohtana tutkimuksessa oli AISI 316 ruostumattomasta teräksestä CNC-poraamalla valmistettu hydrauliikkalohko. Lohko oli kooltaan 200 mm x 112 mm x 98 mm ja painoi 16,2 kg.

Tutkimuksessa kehitettiin hydrauliikkalohkon rakennetta vaiheittain kuvan 4 mukaisesti. Aluksi olemassa olevan lohkon CAD-mallista poistettiin kaikki toiminnan kannalta tarpeeton materiaali. Alkuperäisestä lohokosta jäi siis vain jäljelle putkisto, jonka seinämävahvuus määriteltiin täyttämään paineen asettamat vaatimukset. Tarpeettoman materiaalin poistaminen kevensi jo huomattavasti lohkon painoa ja mikä tärkeintä, se vähensi merkittävästi osan valmistuskustannuksia, sillä lisäävässä valmistuksessa tarpeeton materiaali pidentää valmistusaikaa ja materiaalia menee hukkaan. (Diegel et. al., 2020)



Kuva 4. Hydrauliikkalohkon uudelleen suunnittelu vaiheittain (Diegel et. al., 2020)

Alkuperäisessä hydrauliikkalohkossa putket tulivat ulos usealta sivulta, koska perinteisen poraamisen kannalta se oli valmistusteknisesti helpoin vaihtoehto, ei niinkään lohkon toiminnan kannalta tehokkain. Näin ollen hydrauliikkalohkon rakennetta muutettiin siten, että sisääntuloputket osoittivat alas ja ulostuloputket ylös, mikä pienensi lohkon

asennukseen tarvittua tilaa ja paransi nesteen virtausta lohkon sisällä. Uuden hydrauliiikkalohkon CAD-malliin myös lisättiin kaikki tarvittavat liittimet, jotka täytyi aiemmin asentaa lohkon erikseen. Liittimien kierteet pystyttiin tulostamaan suoraan eikä erillistä kierteitystä tarvittu tehdä jälkikäteen. (Diegel et. al., 2020)

Lopuksi hydrauliikkalohkon rakennetta lähdettiin optimoimaan vielä valittua materiaalia ja valmistusmenetelmää varten. Uusi hydrauliikkalohko valmistettiin AISI 316L ruostumattomasta teräksestä jauhepetisulatusmenetelmällä. Hydrauliikkalohkon vaakatasossa kulkevat putket aseteltiin 45 asteen kulmaan, mikäli se oli lohkon toiminnan kannalta mahdollista. Näin välttyttiin vaakatasossa olevien putkien vaatiman tukimateriaalin käytöltä. CAD-malliin lisättiin myös tiettyihin paikkoihin tukiseinämiä, jotka jäykistivät lohkon rakennetta entisestään ja toimivat samalla tukimateriaalina valmistusvaiheessa. (Diegel et. al., 2020)

AISI 316L ruostumattomasta teräksestä valmistetun hydrauliikkalohkon lisäksi sama lohko valmistettiin vertailua varten myös AlSi10Mg alumiiniseoksesta, jolloin hydrauliikkalohkon painoa voitiin pudottaa vielä enemmän. Koska koko valmistusprosessi otettiin huomioon jo suunnitteluvaiheessa, välttyttiin myös mittavilta jälkikäsitteilyprosesseilta. Hydrauliikkalohko leikattiin irti tulostusalustasta ja pienen viilaamisen jälkeen se oli käyttövalmis 15 minuutissa. Taulukossa 2 on koottuna tutkimuksen hydrauliikkalohkojen ominaisuuksia. (Diegel et. al., 2020)

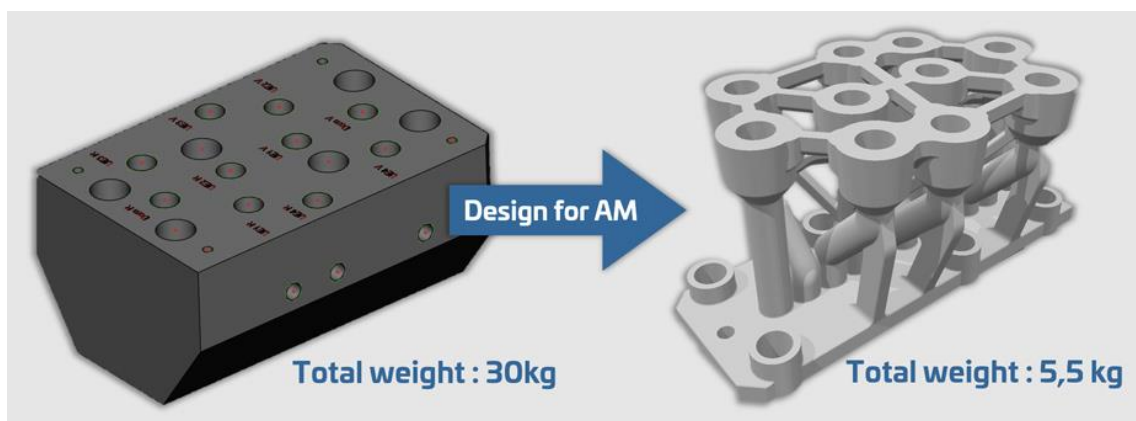
Taulukko 2. Hydrauliikkalohkojen tekniset ominaisuudet. (Diegel et. al., 2020)

	Alkuperäinen hydrauliikkalohko (AISI 316)	Uusi hydrauliikkalohko (AISI 316L)	Uusi hydrauliikkalohko (AlSi10Mg)
Mitat (mm)	200 x 112 x 98	176.2 x 125.5 x 120	176.2 x 125.5 x 120
Paino (kg)	16,2	1,4	0,494
Hinta (\$)	1200	1579	1300
Valmistusaika	12 h (4 vk läpimenoaika)	24 h	24 h

Tuloksista voidaan nähdä, että hydraulikkalohkon paino putosi yli 91 % alkuperäisestä. AlSi10Mg alumiiniseoksella uuden hydraulikkalohkon paino putosi vielä 64 % AISI 316 ruostumattomasta teräksestä valmistettuun verrattuna. Perinteisesti CNC-poraamalla valmistettu hydraulikkalohko on vain 24 % halvempi kuin jauhepetisulatuksella valmistetut versiot. Valmistusajan osalta koneistamiseen menee puolet vähemmän aikaa kuin koko prosessiin lisäävällä valmistuksella. On kuitenkin huomioitava, että alkuperäisen hydraulikkalohkon läpimenoajaksi on arvioitu neljä viikkoa, koska valmistusprosessiin kuuluu muitakin vaiheita kuin itse koneistus. Näin ollen lisäävä valmistus on huomattavasti nopeampi valmistusmenetelmä kyseisen osan valmistuksessa.

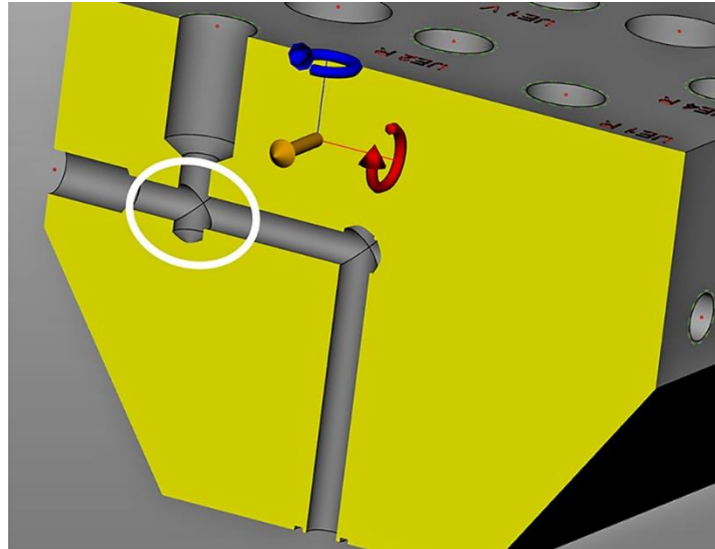
3.2 Case GKN Powder Metallurgy

GKN Powder Metallurgy on metallisten koneenosien suunnitteluun ja lisäävään valmistukseen erikoistunut kansainvälinen yritys. GKN Powder Metallurgy on pyrkinyt jauhepetimenetelmää hyödyntämällä parantamaan hydraulikkalohkon laatua. Tässä tapauksessa tarkastelun kohteena oli olemassa oleva 30 kg painoinen teräksinen hydraulikkalohko. Tavoitteina oli optimoida lohkon rakenne jauhepetimenetelmälle sopivaksi ja parantaa öljyn virtausta lohkon läpi. Koska lohkon reiät pidettiin alkuperäisillä paikoillaan, tämän osan voisi käytännössä vaihtaa olemassa olevaan kokoonpanoon tekemättä mitään muita muutoksia. Kuvassa 4 näkyy uudelleensuunnittelun lopputulos, lohkon paino putosi 5,5 kilogrammaan eli 80 %. (GKN Powder Metallurgy, 2021)



Kuva 4. Lohkon uudelleensuunnittelun lopputulos. (GKN Powder Metallurgy 2021)

Painonpudotuksen lisäksi uutta osaa kehitettiin myös toiminnan kannalta. Toisin kuin perinteisessä poraamalla valmistetussa lohkoissa, lisäävällä valmistuksella tehdyssä rakenteessa öljy pääsee virtaamaan ilman jyrkkiä mutkia. Lohkon sisällä ei myöskään ole valmistuksen jäljiltä osioita, joihin pääsisi kertymään likaa, kuten kuvassa 5. (GKN Powder Metallurgy, 2021)



Kuva 5. Poikkileikkaus perinteisestä hydraulikkalohkosta. (GKN Powder Metallurgy 2021)

Lisävä valmistus mahdollistaa myös sisäisten kanavien pituuden minimoinnin, mikä vähentää kitkasta syntyviä tehohäviöitä. Näin saadaan aikaan kaikin puolin tehokkaammin toimiva kokoonpano. Seinämävahvuus putkistossa voidaan säätää käyttötarkoitukseen sopivaksi samalla minimoiden hukkaan menevää materiaalia. (GKN Powder Metallurgy, 2021)

3.3 Case Aidro

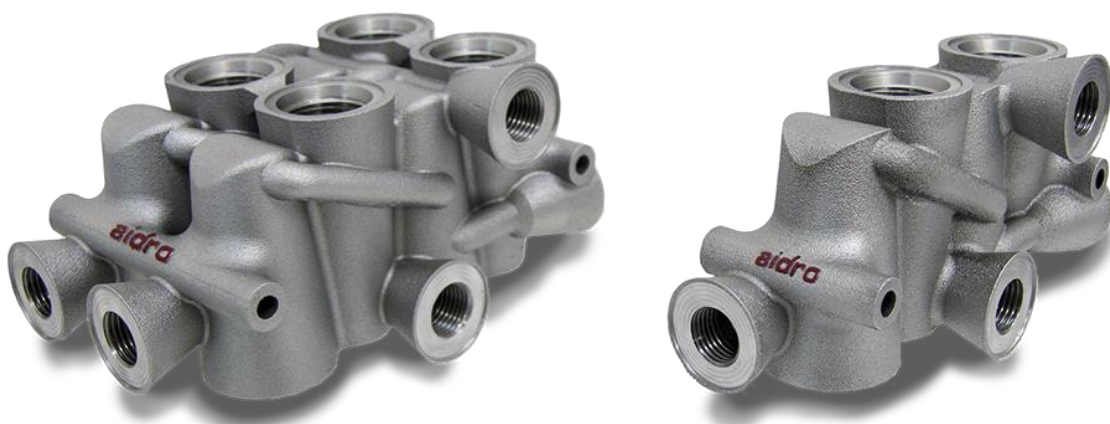
Myös italialainen hydraulikkaratkaisuihin erikoistunut Aidro on tutkinut lisäävän valmistuksen käyttöä erilaisten hydraulikkakomponenttien valmistuksessa. Tässä esimerkissä on tarkasteltu korkean paineen hydraulikkalohkoa, joka on suunniteltu kestäväksi 700 barin paineeseen. Kuvassa 6 näkyy uudelleensuunnittelun lopputulos.



Kuva 6. Korkeapaineisen hydraulikkalohkon uudelleensuunnittelu. (Aidro 2021)

Lopputuloksena oli alkuperäistä rakennetta 60 % kevyempi rakenne, joka toimii yhtä hyvin tai paremmin kuin alkuperäinen. Vaihtamalla käytössä olevaa materiaalia, voidaan samalle geometrialle saada erilaisia lisäominaisuuksia. Esimerkkinä Aidro on valmistanut saman lohkon ruostumattomasta teräksestä ja alumiinista. Ruostumattomalla teräksellä saavutetaan hyvä korroosionkestävyys ja alumiinilla vastaavasti saadaan rakenteesta huomattavasti kevyempi. (Aidro, 2021)

Aidro on myös tutkinut modulaarisia hydraulikkalohkoja. Kuvassa 7 on esitelty hydraulikkalohko, jota voidaan monistaa haluttu määrä CAD-ohjelmistossa. Näin saadaan räätälöityä tiettyyn käyttökohteeseen soveltuva lohko hyvin nopeasti ja yksinkertaisesti.



Kuva 7. Modulaarinen hydraulikkalohko. (Aidro 2021)

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkielman tavoitteena oli selvittää, voidaanko lisäävän valmistuksen teknologioihin lukeutuvalla jauhepetisulatuksella saavuttaa hydrauliiikkalohkojen valmistuksessa hyötyjä verrattuna perinteisiin poistaviin valmistusmenetelmiin. Yhtenä tutkimuskysymyksenä oli selvittää, voidaanko jauhepetisulatuksella saavuttaa kustannussäästöjä hydrauliikkalohkojen valmistuksessa. Tämä riippuu pitkälti hydrauliikkalohkon geometrian monimutkaisuudesta ja tuotantoerän koosta. Edellä käsitellyissä case-esimerkeissä kustannussäästöjä saavutettiin esimerkiksi siitä, että materiaalia käytetään vähemmän ja hävikkiä ei synny juuri lainkaan. Valmistusmenetelmänä jauhepetisulatus on siten myös huomattavasti ekologisempi perinteiseen poistavan valmistuksen menetelmiin verrattuna. Tutkimuksessaan Diegel et. al. totesivat, että hydrauliikkalohkon valmistuskustannukset olivat hieman suuremmat lisäävässä valmistuksessa CNC-poraamiseen verrattuna. Lisäävällä valmistuksella valmistettu hydrauliikkalohko oli kuitenkin huomattavasti kevyempi ja geometrialtaan paremmin optimoitu, joten sen käyttökustannukset mahdollisesti laskevat.

Toisena tutkimuskysymyksenä oli arvioida, kuinka paljon hydrauliikkalohkojen rakennetta voidaan keventää jauhepetisulatukseen perustuvilla valmistusmenetelmillä. Edellä käsitellyissä case-esimerkeissä uudelleensuunnittelulla hydrauliikkalohkojen painoa saatiin pudotettua 60–90 %. Liikkuvissa koneissa, kuten metsäkoneissa ja kaivinkoneissa, tällaisilla painonpudotuksilla voi laitteen suorituskyky nousta merkittävästi, koska laitteiden tehopainosuhte paranee. Painonpudotus myös osittain pienentää tuotteen ympäristöjalanjälkeä ja vähentää merkittävästi materiaalihukkaa.

Kolmantena tutkimuskysymyksenä oli selvittää, voidaanko jauhepetisulatuksella parantaa hydrauliikkalohkojen laatua. Jauhepetisulatusmenetelmä mahdollistaa hydrauliikkalohkon sisäisen geometrian optimoinnin. Analysoimalla hydrauliikkalohkon sisäistä virtausdynamiikkaa voidaan minimoida lohkoissa syntyvät painehäviöt optimoimalla lohkon putkistojen rakennetta. Lisäävän valmistuksen myötä hydrauliikkalohkon putkisto on suoraviivaisempi, joten myöskään mihinkään lohkon sisäisiin koloihin ei pääse kertymään likaa, joka voisi pahimmassa tapauksessa vahingoittaa hydraulisen järjestelmän muita

komponentteja. Näin ollen voidaan todeta, että jauhepetisulatus menetelmänä vaikuttaa myös hydraulikkalohkojen laatuun parantavasti.

Neljäntenä tutkimuskysymyksenä oli selvittää, sopiiko jauhepetisulatuksella tehty hydraulikkalohko sellaisenaan vanhaan kokoonpanoon. Sekä case GKN Powder Metallurgyn että case Aidron lähtökohtana oli olemassa oleva koneenosa. Tutkimuksissa hydraulikkalohkon reikien paikkoja ei muutettu, vaan hydraulikkalohkon putkiston rakennetta optimoitiin ja tarpeeton materiaali poistettiin. Näin ollen uudelleensuunniteltu osa voitaisiin vaihtaa suoraan vanhan osan tilalle. Siten voidaan todeta, että käsiteltyjen case-esimerkkien perusteella jauhepetisulatuksella valmistettu hydraulikkalohko voi olla sellaisenaan sovitettavissa vanhaan kokoonpanoon.

Edellä esiteltyjen casejen perusteella hydraulikkalohko vaikuttaa soveltuvan varsin hyvin lisäävän valmistuksen käyttökohteeksi. On kuitenkin huomioitava, että osa käsitellyistä esimerkeistä ei ole vertaisarvioidusta tieteellisestä lähteestä. Näin ollen yritysten julkaisemiin tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti.

Uusia laitteita suunniteltaessa lisäävää valmistusta ajatellen kannattaa yleensä lähteä liikkeelle puhtaalta pöydältä. Tällöin maksimoidaan valmistusteknologian tarjoamat edut ja samaan osaan voidaan mahdollisesti yhdistää useampi toiminto. Suunnitteluvaiheessa tulisi huomioida paitsi valmistusmenetelmästä aiheutuvat koneenoson valmistuskustannukset, myös laitteen lopulliset käyttökustannukset, joihin vaikuttavat olennaisesti ne koneenoson ominaisuudet, kuten kevyempi paino tai optimoitu geometria, joita lisäävän valmistuksen menetelmillä voidaan saavuttaa.

LÄHTEET

Afkhami, S., Amraei, M., Unt, A., Piili, H. & Björk, T. 2021. Metal additive manufacturing for industrial applications. Lappeenranta. 44 s.

Aidro. 2021. Hydraulic components. [verkkodokumentti] [Viitattu 11.12.2021] Saatavissa: <https://aidro.it/additive-manufacturing/#hydraulic-components>

Alshare, A.A., Calzone, F., Muzzupappa, M. 2019. Hydraulic manifold design via additive manufacturing optimized with CFD and fluid-structure interaction simulations. Rapid prototyping journal. Volume 25. p. 1516–1524

AMPOWER GmbH & Co. KG. 2021. Laser Beam Powder Bed Fusion. [Viitattu 20.12.2021] Saatavissa: <https://additive-manufacturing-report.com/technology/metal/laser-beam-powder-bed-fusion/>

Diegel, O., Schutte, J., Ferreira, A., Chan, Y. L. 2020. Design for additive manufacturing process for a lightweight hydraulic manifold. Additive Manufacturing. Volume 36.

EOS. 2021 (a). EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet. [verkkodokumentti] [Viitattu 28.12.2021] Saatavissa: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf

EOS. 2021 (b). EOS StainlessSteel 316L Material Data Sheet. [verkkodokumentti] [Viitattu 28.12.2021] Saatavissa: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/stainlesssteel/material_datasheet_eos_stainlesssteel_316l_en_web.pdf

Fluid Power Engineering. 2021. Hydraulic Manifold for Missile Defense Applications. [Viitattu 17.12.2021] Saatavissa: <https://fpe.gr/product/hydraulic-manifold-for-missile-defense-applications/>

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. 2021. Additive Manufacturing Technologies. 3rd ed. Springer. Cham. 675 p.

GKN Powder Metallurgy. 2021. Redesigning hydraulic blocks in additive manufacturing. [verkkodokumentti] [Viitattu 12.12.2021] Saatavissa: <https://www.gknpm.com/en/our-businesses/gkn-additive/am-in-action/redesigning-hydraulic-blocks-in-additive-manufacturing/>

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: Case jauhepetitekniikka. LUT School of Technology LUT Kone, LUT Mechanical Engineering.

Renishaw. 2016. Hydraulic block manifold redesign for additive manufacturing. [Viitattu 28.12.2021] Saatavissa: <https://resources.renishaw.com/en/details/case-study-hydraulic-block-manifold-redesign-for-additive-manufacturing--82347>

Zhang, C., Wang, S., Li, J., Zhu, Y., Peng, T., Yang, H. 2020. Additive manufacturing of products with functional fluid channels: A review. Additive Manufacturing. Volume 36. p.101490