



**TURUN  
YLIOPISTO**  
Kauppakorkeakoulu

## **Lisäävän valmistuksen vaikutus toimitusketjujen riskienhallintaan**

Toimitusketjujen johtaminen,  
Markkinoinnin ja arvoketjujen johtamisen laitos  
Kandidaatin -tutkielma

Laatija:  
Joonas Paldanius

Ohjaaja:  
KTT Sini Laari

3.12.2025

Turku

Opiskelijan lausunto tekoälyn käytöstä tähän tutkielmaan liittyen:

**En ole käyttänyt tekoälyä hyödyntäviä työkaluja** tätä tutkielmaa kirjoittaessani.

**Olen käyttänyt tekoälyä hyödyntäviä työkaluja** tätä tutkielmaa kirjoittaessani. Tämä käyttö on dokumentoitu tutkielman liitteessä. Vakuutan, että tekoälyä käytettiin yliopiston ohjeistuksen mukaisella tavalla.

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

**Oppiaine:** Toimitusketjujen johtaminen

**Tekijä:** Joonas Paldanius

**Otsikko:** Lisäävän valmistuksen vaikutus toimitusketjujen riskienhallintaan

**Ohjaaja(t):** KTT Sini Laari

**Sivumäärä:** 34 sivua

**Päivämäärä:** 3.12.2025

Tämä kirjallisuuskatsauksena toteutettu kandidaatintutkielma syventyy tarkastelemaan 3D-tulostustuotannon (Lisäävä valmistus; eng. ”Additive manufacturing”) vaikutusta toimitusketjujen riskienhallintaan ja resilienssiin. Kuten esimerkiksi koronapandemia osoitti, globaalit toimitusketjut ja maantieteellisesti laajat logistiikkaverkostot ovat alttiita maailmanlaajuisille häiriöille. Teknologian kehitys ja toimitusketjujen digitalisoituminen ovat lisänneet mahdollisuuksia vaikuttaa toimitusketjujen riskienhallintaan. Tässä tutkimuksessa pyritään vastaamaan kysymykseen: Miten teollinen 3D-tulostustuotanto vaikuttaa toimitusketjuriskeihin sekä mitä mahdollisuuksia riskejä sen käyttöönotto synnyttää toimitusketjuissa.

Tutkimuksen keskeisimmät havainnot ovat, että lisäävän valmistuksen implementointi osaksi tuotantoprosessia voi lisätä koko toimitusketjun joustavuutta. Kirjallisuuden perusteella toimitusketjun joustavuus on keskeisin tekijä riskienhallinnassa ja resilienssin kasvattamisessa. Lisäävä valmistus mahdollistaa paikallisen, räätälöidyn ja kompleksisten tuotteiden valmistuksen joihin perinteisillä valmistusmenetelmillä ei pystytä. Lisäksi teollisen 3D-tulostamiselle ominaista on tuotannon viivästyttäminen lähelle tilauksen kohdennuspistettä, joka helpottaa kysynnän ennakoimista. Lisäävän valmistuksen implementointiin liittyy kuitenkin haasteita, kuten korkeat investointikustannukset, toimitusketjun rakenteelliset muutokset sekä lisääntyvä henkilöstön osaamisen tarve. Lisäksi 3D-tulostus teknologia tarvitsee ympärilleen tietojärjestelmäverkoston ja riittävän datainfrastruktuurin. Yhdessä muiden digitaalisen toimitusketjun teknologioiden, kuten tekoäly, IoT ja big data, lisäävä valmistus tarjoaa mahdollisuuden vaikuttaa toimitusketjun riskienhallintaa lisäämällä sen läpinäkyvyyttä ja parantamalla informaation käsittelykykyä.

**Avainsanat:** Lisäävä valmistus, Industry 4.0, Toimitusketjun riskienhallinta, Toimitusketjun resilienssi

# SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Lisäävä valmistaminen toimitusketjussa</b>	<b>9</b>
	2.1 Metallimateriaalien kiertokulku	11
	2.2 Lisäävän valmistuksen tarjoamat mahdollisuudet	12
	2.3 Kustannukset ja raaka-aineet haasteena	13
	2.4 Lisäävä valmistus ja Industry 4.0	14
	2.5 Massaräätälöinti	16
<b>3</b>	<b>Toimitusketjujen riskienhallinta</b>	<b>17</b>
	3.1 Sisäiset riskit	17
	3.2 Ulkoiset riskit	18
	3.3 Resilienssin hallinta	19
<b>4</b>	<b>Lisäävä valmistus osana toimitusketjun riskienhallintaan</b>	<b>21</b>
	4.1 Toimitusketjun joustavuus	21
	4.2 Vaikutus toimitusketjun kustannuksiin	23
	4.3 Lisäävän valmistuksen implementoinnin ongelmat ja haasteet	24
	4.4 Lisäävä valmistus ja toimitusketjun riskienhallinta	25
	4.5 3D-tulostustuotannon rooli tulevaisuudessa	26
<b>5</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset</b>	<b>28</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>31</b>
	<b>Liitteet</b>	<b>34</b>
	Liite 1 Selvitys tekoälyn käytöstä	34

## **KUVIOT**

Kuva 1 Lisäävän valmistuksen jakautuminen teollisuuksittain	10
Kuva 2 Kerätty data ja pilvilaskenta Lisäävän valmistuksen pohjana. Pilvilaskenta analysoi asiakas- ja valmistusdataa.	15
Kuva 3 Digitalisoitumisen vaikutuksen mallinnus	20
Kuva 4 Lisäävän valmistuksen vaikutus joustavuuteen	22
Kuva 5 Yhteenveto tutkimuksen johtopäätöksistä	29

## **TAULUKOT**

Taulukko 1 Lisäävässä valmistuksessa käytettävät materiaalit	10
--	----



# 1 Johdanto

Toimitusketjut ovat viime vuosikymmenten aikana muuttuneet entistä laajemmiksi ja monimutkaisemmiksi. Prosessien ulkoistamisesta on tullut strateginen keino yrityksille vähentää kustannuksia, parantaa raaka-aineiden saatavuutta sekä saavuttaa uusia markkina-alueita (Aloqlan & Lam, 2014; Um, 2021). Ulkoistetut ja maantieteellisesti hajaantuneet logistiikkaketjut tuovat mukanaan haasteita, jotka johtuvat lisääntyvästä kompleksisuudesta. Toimitusketjun kompleksisuudella ja maantieteellisesti laajalla levittäytymisellä voi olla negatiivinen vaikutus yrityksen määräysvaltaa ja kykyyn valvoa sen omia prosesseja (Brusset, 2017). Globaalit kriisit, kuten koronapandemia ja Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan, paljastivat useiden yritysten kohdalla puutteita riskienhallinnassa ja kyseiset yritykset kärsivät eniten toimitusketjujen häiriöistä. Varsinkin koronapandemia osoitti kuinka maailman mentyä sulkutilaan, toimitusketjujen oli löydettävä uusia ratkaisuja turvatakseen materiaalien ja tuotteiden virtaus (Mohammed ym., 2023).

Industry 4.0, eli neljäs teollinen vallankumous on ollut tutkijoiden mielestä käynnissä jo parin vuosikymmenen ajan. Toimitusketjujen digitalisoinnin ja kehittyvän teknologian uskotaan tarjoavan uusia ratkaisuja perinteisten toimitusketjujen ongelmiin ja vahvistaa riskienhallintaa. Uudet teknologiat, kuten pilvilaskenta, IoT (eng. *Internet of Things*), big data, tekoäly sekä lisäävä valmistus, integroituvat yhä enemmän toimitusketjuihin ja kehittyvät kovaa vauhtia (Rad ym., 2022). Kirjallisuus osoittaa, että toimitusketjujen joustavuus on korrelaatioissa toimitusketjun resilienssin kanssa (esim. Delic & Eyers, 2020; Singh, 2024; Aloglan & Lam, 2015). Toimitusketjun digitalisoinnin on todettu olevan tapa lisätä toimitusketjun joustavuutta esimerkiksi 3D-tulostustuotannon ja informaation käsittelykyvyn parantumisen myötä (Rashid, 2024). 3D-tulostustuotanto mahdollistaa räätälöityjen ja kompleksisten komponenttien ja osien valmistuksen suoraan kysynnän mukaan. 3D-tulostusteknologia kehittyy koko ajan ja sen yleistyminen tuotantomenetelmänä on osa toimitusketjujen digitaalista muutosta (Frederico, 2018).

Tässä tutkimuksessa tutkitaan kirjallisuuden avulla, miten lisäävä valmistus, eli teollinen 3D-tulostaminen, vaikuttaa toimitusketjun riskienhallintaan ja resilienssiin. Lisäksi tutkimuksessa syvennytään siihen mitä lisäävän valmistuksen implementointi osaksi tuotantoprosessia mahdollistaa ja mitkä sen haasteet ovat. Näin ollen, tutkimuksessa pyritään vastamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä mahdollisuuksia ja haasteita lisäävän valmistuksen implementointiin toimitusketjuun liittyy?
- Miten lisäävä valmistus voi vähentää toimitusketjuriskejä?

Tutkimuksen tavoitteena on lisätä ymmärrystä lisäävän valmistuksen mahdollisuuksista toimitusketjun riskienhallinnassa. Lisäksi tavoitteena on tutkia kuinka toimitusketjujen digitalisoituminen auttaa lisäämään toimitusketjujen resilienssiä. Tutkimus pyrkii myös antamaan kokonaisvaltaisen kuvan mahdollisuuksista ja haasteista, jotka syntyvät toimitusketjun digitalisoitumisen ja lisäävän valmistamisen takia.

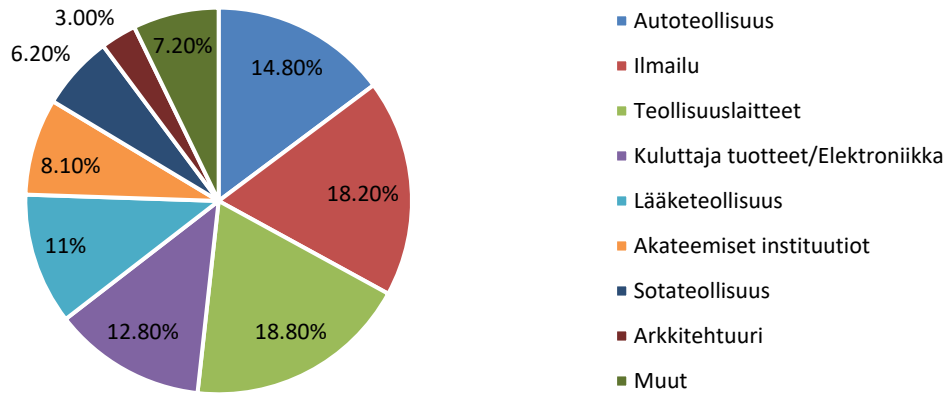
Tutkimuksessa esiintyvä termi ”lisäävä valmistus” on suora käännös englannin kielen termistä ”Additive manufacturing” ja suomalaisessa kirjallisuudessa käytetään molempia termejä ”Additiivinen valmistus” sekä ”lisäävä valmistus”. Tutkimuksessa ”lisäävä valmistus” termiä käytetään viittaamaan teolliseen 3D-tulostustuotantoon. Kuluttajamarkkinoiden 3D-tulostaminen on jätetty vähemmälle huomiolle, koska sen osuus 3D-tulostus tuotannon tuottamasta lisäarvosta on pieni (Frederico, 2018). Lisäävän valmistuksen tuottamasta lisäarvosta suurin osa syntyy teollisuuden aloilla, kuten ilmailu-, auto- ja elektroniikkateollisuudessa, joten tutkimuksessa käytetyssä kirjallisuudessa on myös keskitytty näihin aloihin.

Rakenteeltaan tutkimus etenee siten, että johdannon jälkeen luvussa 2 käsitellään toimitusketjuihin kohdistuvia riskejä sekä resilienssiä. Luvussa 3 syvennyttään lisäävään valmistamiseen ja sen tarjoamaan mahdollisuuksiin sekä mahdollisiin haasteisiin. Lisäksi luvussa 3 käsitellään neljännen teollisen vallankumouksen keskeisimpien teknologioiden vaikutusta toimitusketjuihin. Tutkimuksen luvussa 4 pyritään kirjallisuuden sekä lukujen 2 ja 3 avulla tutkimaan lisäävän valmistuksen vaikutusta toimitusketjun riskienhallintaa, resilienssiin ja toimintakykyyn. Luvussa 5 tutkimus vastaa johtopäätöksillä tutkimuskysymyksiin.

## 2 Lisäävä valmistaminen toimitusketjussa

Lisäävällä valmistamisella (eng. *Additive Manufacturing*) tarkoitetaan 3D-tulostusteknologiaa, joka mahdollistaa prosessin, jossa yhdistetään valmistusmateriaalia kerros kerrallaan kolmiulotteisen tietokonemallin mukaisesti (Frazier ym. 2014). Lisäävän valmistamisen katsotaan olevan osa Industry 4.0, joka tarkoittaa uusien digitaalisten teknologioiden käyttöönottoa yritysten liiketoimintamalleissa ja toimitusketjuissa. Industry 4.0 luonnehditaan neljänneksi teolliseksi vallankumoukseksi, jonka lisäarvo yrityksille arvioidaan olevan 100 triljoonaa Yhdysvaltain dollaria vuonna 2025 (Frederico, 2018).

Lisäävään valmistukseen käytettävät materiaalit sisältävät kaikki erilaisia ominaisuuksia, joiden perusteella niitä voidaan käyttää eri tarkoituksiin (Taulukko 1.). Eniten käytetyimmät materiaalit ovat polymeerit, metallit ja metalliseokset (Bhatia, 2023). Polymeerit on kaikkein käytetyin materiaali kuluttajamarkkinoilla sen hyvän saatavuuden, alhaisen hinnan ja ominaisuuksien ansiosta. Niitä käytetään esimerkiksi lelujen ja elektroniikkaosien valmistuksessa. Metalli- ja metalliseoksia käytetään prototyyppien ja osien valmistuksessa sekä tutkimuksessa. Metalleja käytetään 3D-tulostuksessa varsinkin ilmailu-, teknologia- ja autoteollisuudessa. Esimerkiksi ilmailuteollisuudessa 3D-tulostamista käytetään kompleksisten osien, kuten turbiinien valmistamisessa (Srivastava & Rathee, 2021). Kuva 1. kertoo, kuinka lisäävän valmistamisen käyttöaste jakautuu teollisuuksittain. Srivastavan ja Ratheen mukaan 3D-tulostusta hyödynnetään eniten teollisuuslaitteiden valmistamisessa sekä ilmailuteollisuudessa. Ilmailuteollisuudella viitataan sekä lentokone- ja avaruusteollisuuteen.



Kuva 1 Lisäävän valmistuksen jakautuminen teollisuuksittain (Srivastava & Rathee, 2021)

Materiaalityyppi	Valmistusmateriaali	Käyttäjä teollisuudet
Polymeerit	ABS, Nylon, ASA, HIPS, PET, PLA, PC, PETG, PEEK, TPC, MABS Jne.	Lääketeollisuus, Lentoteollisuus, Autoteollisuus, Leluteollisuus, Elektroniikkateollisuus
Metallit ja metalliseokset	Titaaniyhdisteet, Nikkeliyhdisteet, ruostumatoneräs, alumiiniyhdisteet, kupari, kulta, platina, pronssi	Avaruusteollisuus, Lentoteollisuus, Autoteollisuus, Puolustusteollisuus, Lääketeollisuus
Biomateriaalit	Biolääketieteelliset metallit, biolääketieteelliset polymeerit, biolääketieteelliset keraamiset materiaalit	Lääketeollisuus
Komposiitit	Partikkelivahvisteiset komposiitit, luonnonkuituvahvisteiset komposiitit, synteettiset kuituvahvisteiset komposiitit, nanomateriaaleilla vahvistetut komposiitit, ioniset polymeerikomposiitit, grafeenipohjaiset komposiitit ja kevyet huokoiset komposiitit jne.	Tuotanto, elektroniikka, lentoteollisuus, lääketieteellisyys, puettava elektroniikka, autoteollisuus, urheiluteollisuus.
Keraamit	Teippivalettu alumiinioksidi, zirkonia-levy, piikarbidit, pii-pii-karbidikomposiitti, lasikeraamiset komposiitit ja lyijy-zirkonaattititanaatit (PZT) jne.	Lääketeollisuus, lentoteollisuus, autoteollisuus jne.

Rakennusmateriaalit	Betonit, hydrauliset sideaineet, lentotuhka, mikrokuidut, piidioksidihuurteet jne.	Rakennusteollisuus, Avaruusteollisuus
Ruoan 3D-tulostusmateriaalit	Ruoka-aineet (luonnostaan tulostettavat: suklaa, taikinat, maitotuotteet ja hydrogeelit. Ei-luonnostaan tulostavat: liha, kasvikset, hedelmät, vihannekset ja levät)	Elintarviketeollisuus, elintarviketuotanto.
Älymateriaalit	Kehittyneet nanokomposiitit, muotomuisti-seokset, muotomuisti-polymeerit, itseorganisoituvat rakenteet, aktiivinen origami, älyhydrogeelit, hiilinanorakenteet, kopolymeerit, viskoelastinen muste, nanoclay, glukoosi, PLA ja grafeeni, hartsi ja akryyliamidimonomeerit jne.	Avaruus- ja lentoteollisuus, autoteollisuus, lääketeollisuus, robotiikka, puolustusteollisuus, taide- ja tekstiiliteollisuus.
Muut materiaalit	Lasi, puu, valokovettuvat tai valoaktivoituvat hartsit, selluloosamateriaalit jne.	Tekstiiliteollisuus, huonekalujen valmistus, terveysteollisuus, elektroniikkateollisuus, älykkäiden tekstiilien valmistus.

Taulukko 1 Lisävässä valmistuksessa käytettävät materiaalit (Bhatia, 2021)

## 2.1 Metallimateriaalien kiertokulku

Metallimateriaalien tulostaminen tapahtuu sulattamalla metallijauhoa kerros kerrallaan laserin tai sähköisen säteen avulla. Biomateriaaleilla tarkoitetaan lääketeollisuudessa käytössä olevia materiaaleja, joista voidaan 3D-tulostamalla valmistaa implantteja ja muita monimutkaisia kokonaisuuksia. Biomateriaalin on täytettävä lääketieteelliset kriteerit, jotta niitä voidaan käyttää valmistukseen. Muita materiaaleja, joita käytetään ovat komposiitti, keramiikka, rakennusmateriaalit, ruoka ja älymateriaalit. Taulukossa 1 on Bhatian tutkimuksen pohjalta koottu taulukko lisäävän valmistuksen raaka-aineista ja niiden käyttökohteista. Bhatian ja Fredericon tutkimuksien mukaan metallit ja metalliseosten käyttö tuottaa eniten lisäarvoa loppuasiakkaalle teollisessa 3D-tulostustuotannossa. Ruoka-, äly- ja rakennusmateriaalit ovat tutkimuksen mukaan vielä tutkimuskohteita ja eivät liity teolliseen 3D-tulostustuotantoon.

Teollisessa 3D-tulostustuotannossa käytettävillä materiaaleilla on omat toimitusketjunsä. Nyamekye ym. tutkivat lisäävän valmistuksen vaikutusta titaanin toimitusketjuun auto- ja lentoteollisuudessa. Titaania käytetään auto-, ilmailu- ja lääketeollisuudessa koska se on ominaisuuksiltaan kevyttä ja

kestävää. Titaanin 3D-tulostaminen on kustannustehokkaampaa kuin tuotantolinjan luominen, lisäksi näillä aloilla tarvittavien titaani-osien täytyy usein olla räätälöityjä ja uniikkeja (Nyamekye, 2023).

Titaanin, niin kuin muidenkin metallien, elinkierto alkaa kaivoksista, josta se siirretään jatko jalostuslaitoksiin, joissa kaivetusta titaanista jalostetaan puhtaita kappaleita. Jotta metalleja pystytään käyttämään 3D-tulostimen raaka-aineena, on ne jalostettava jauhoksi. Kovan metalliseoksen jalostus metallijauhoksi tapahtuu atomisoimalla. Atomisointi tapahtuu hajottamalla sula metalli pieniksi pisaroiksi virtaavan väliaineen, kuten kaasun tai veden avulla. Nopeasti virtaava väliaine aiheuttaa sulan metallin äkillisen jäähtymisen, jolloin se jähmettyy ja muodostaa hienojakoista metallijauhoa. Atomisoidun metallijauhon on täytettävä ASTM:n vaatimukset, jotta sitä voidaan käyttää lisäävässä valmistuksessa (Nyamekye, 2023). ASTM (*American Society for Testing and Materials*) on kansainvälinen järjestö, joka kehittää ja julkaisee teknisiä standardeja materiaaleille, tuotteille, järjestelmille ja palveluille (*Detailed Overview*. ASTM. [www.astm.org/about/detailed-overview](http://www.astm.org/about/detailed-overview)). Kun metallista on jalostettu hienojakoista jauhoa, voidaan sitä käyttää 3D-tulostinjärjestelmissä.

3D-tulostus tuotannossa metallijauhoa voidaan uudelleen käyttää niin kauan kuin jauhoa on riittävästi. Tämä on merkittävä etu, sillä esimerkiksi titaani on ominaisuuksiensa ansiosta kallista, mutta sitä pystytään hyödyntämään tehokkaasti 3D-tulostamisen avulla. Kun valmistetut osat saapuvat elinkiertoonsa päähän voidaan ne kierrättää ja atomisoida uudelleen. Näin ollen materiaalien näkökulmasta 3D-tulostaminen on tehokas ratkaisu, joka vähentää materiaalihukkaa. Päästöjä kuitenkin syntyy kuljetuksissa, jalostuksessa ja tuotantoprosesseissa (Nyamekye, 2023).

## **2.2 Lisäävän valmistuksen tarjoamat mahdollisuudet**

3D-tulostustuotanto vaatii ymmärryksen toimitusketjun materiaali- ja informaatiovirroista. Tämän ansiosta lisäävän valmistuksen avulla voidaan vähentää toimitusketjun kuljetus- ja varastointikustannuksia ja mahdollistaa ”just-in-time” tuotantomalli. Räätälöity 3D-tulostus yhdessä ”just-in-time” tuotantomallin kanssa optimoi toimitusketjun materiaalivirtaa, koska esimerkiksi valmistuskomponenttien ja varaosien valmistus on mahdollista tehdä tarkasti tarpeen ja kysynnän mukaan (Rad ja ym 2022). Luvussa 2.5 syvennyttään enemmän lisäävän valmistuksen mahdollistamaan osien ja komponenttien massaräätälöintiin.

3D-tulostamisessa käytettävät materiaalit sitovat pääomaa, mutta niiden tehokas uusiokäyttö ja pieni loppuvaraston tarve nopeuttavat varasto- ja materiaalinkiertoa (Rad ym., 2022; Nyamekye, 2023). Lisäävän valmistuksen avulla pystytään vähentämään materiaalihukkaa, koska tarkat valmistusmallit

vaativat vain tarvittavan määrän materiaalia. Metallista valmistettujen osien uudelleen jalostus raaka-aineeksi on mahdollista kierrätyksen ansiosta (Nyamekye, 2023).

Lisävällä valmistamisella on prosesseja integroiva vaikutus toimitusketjussa. Sen ansiosta syntyy tarve yhteistyölle 3D-mallien suunnittelijoille ja loppuasiakkaan kanssa (Chan ym. 2018). Lisävän valmistuksen ansiosta tutkimuksessa ja kehityksessä ei tarvitse tukeutua isoihin ja hitaisiin tuotantolinjoihin. Esimerkiksi tuotekehityksessä pystytään 3D-tulostuksen ansiosta valmistamaan tuotteita pieniä määriä materiaalitehokkaasti. Lisäksi tuotekehityksessä asiakaspalaute pystytään ottamaan nopeammin huomioon ja tekemään muutoksia valmistettuihin tuotteisiin sen pohjalta (Rad ym., 2022). Mohsen Attaran mukaan teollisuudet, jotka hyötyvät lisäävästä valmistuksesta ovat esimerkiksi lentoteollisuus, autoteollisuus, koneteollisuus ja hyvinvointiteollisuus. 3D-tulostus mahdollistaa näillä teollisuudenaloilla prototyypin ja kriittisten komponenttien valmistuksen. Osien ja komponenttien lisäävän valmistuksen on todettu vähentävän koneiden huoltoaikoja, kustannuksia ja materiaalihukkaa. Hyvinvointiteollisuudessa 3D-tulostus valmistusta käytetään esimerkiksi tekonivelien räätälöidyssä valmistuksessa (Attaran, 2017). 3D-tulostaminen on myös energiatehokkaampi ratkaisu ja yhden valmistetun osan hiilijalanjälki on pienempi kuin perinteisillä tuotantotavoilla tuotetut vastaavan tarpeen osat tai komponentit (Baumers ym., 2013)

### **2.3 Kustannukset ja raaka-aineet haasteena**

Lisävän valmistuksen haasteet ovat kustannukset ja ajankäyttö. Lisäksi lisäävä valmistus voi vaatia toimitusketjun uudelleen järjestelyn, koska sen käyttöönotto muuttaa prosesseja ja toimittajatarpeita. Esimerkiksi materiaalien saatavuudella voi olla merkittäviä vaikutuksia toimitusketjun tehokkuuteen (Rad ym., 2022).

Tutkimuksessaan 2016, Douglas Thomas tutkii lisäävän valmistuksen käyttöönoton ja käyttöön liittyviä kustannuksia. Thomasin mukaan lisäävän valmistuksen merkittävimmät kustannukset ovat järjestelmä investoinnit sekä materiaali-, työntekijä- sekä kuljetuskustannukset. Valmistusmateriaalit ovat merkittävä kustannus, koska esimerkiksi metallimateriaalien hinta määräytyy vaihtelevan markkinahinnan perusteella (Thomas, 2016). Thomasin mukaan materiaalikustannuksia on kuitenkin mahdollista skaalata lisäämällä 3D-tulostustuotanto kapasiteettiä. Valmistuskapasiteetin kasvattaminen laskee yksittäisen osan muuttuvaa materiaalikustannusta (Thomas, 2016).

Teollisuudessa lisäävän valmistuksen materiaaleina käytettävät metallimateriaalit voidaan luokitella kriittisiksi luonnonvaroiksi (Sun, 2022). Esimerkiksi tungsten, nikkeli, koboltti ja kupari ovat kriittisiä metalleja, joita käytetään 3D-tulostus tuotannossa (Singh, 2016). Kaivokset ja jalostamot

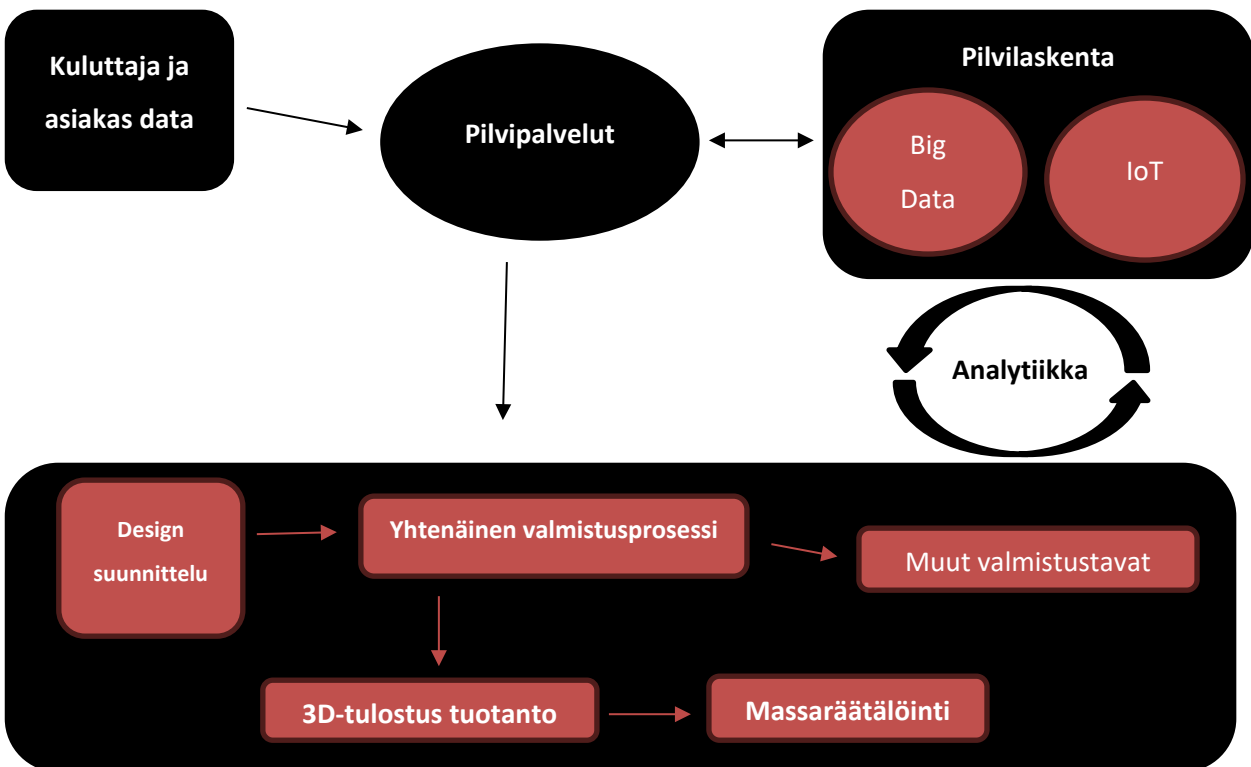
sijaitsevat maantieteellisesti ympäri maailmaa, joten ne muodostavat kompleksisia materiaalien logistiikkaverkostoja. Monimutkaiset logistiikkaverkostot sisältävät useita talousalueita sekä rahoituksen lähteitä, jotka yhdistävät sen yhdeksi suureksi verkoksi. Kriittisten materiaalien saatavuuteen vaikuttaa niiden louhinta ja saatavuus. Häiriöt raaka-aineiden tuotannossa aiheuttavat metallien voimakkaan hinnan vaihtelun, joka on haaste yrityksille, jotka käyttävät lisäävää valmistusta tuotantomuotona (Sun, 2022).

Lisävä valmistaminen osana toimitusketjua vaatii yrityksiltä panostusta data-alustaan, joka vastaa 3D-tulostimien ja kolmiulotteisten mallien suunnittelijoiden vaatimuksia. 3D-tulostus on riippuvainen tuotemallinnuksesta eli käytännössä se vaatii osaavaa työvoimaa ja sopeutuvan johtamisjärjestelmän, jotta sen tehokas käyttö on mahdollista (Rad ym., 2022).

## **2.4 Lisävä valmistus ja Industry 4.0**

Industry 4.0, eli neljännen teollisen vallankumouksen, keskeisimmät teknologiat ovat ihmisten internet (IoP, eng. *Internet of People*), kaikkien esineiden internet (IoT), pilvipalvelut, big datateknologia, lohkoketju, lisätty todellisuus, automaatio, robotiikka, lisävä valmistus, simulointi ja semanttiset teknologiat. Näiden teknologioiden integroiminen osaksi yritysten toimitusketjuja on tällä hetkellä keskeinen tapa suorituskyvyn parantamiseksi (Rad ym., 2022). Radin ym. tutkivat Industry 4.0 ja sen vaikutusta toimitusketjuun. Heidän mukaansa suurin hyöty kaikkien teknologioiden kohdalla on niiden vaikutus toimitusketjun optimointiin ja integraatioon. Integraatiolla he tarkoittavat, että toimitusketjun tiedon kulku paranee ja toimitusketjun eri te prosessien välinen yhteistyö helpottuu. Toimitusketjun optimointi oikeanlaisella teknologialla tehostaa prosesseja, lisää laatua ja nopeuttaa niitä. Industry 4.0 suurimmat haasteet ovat kustannuksissa ja henkilöstön osaamisessa. Uusien teknologioiden käyttöönotto ja ylläpito vaatii työntekijöiden kouluttamista tai uusien työntekijöiden palkkaamista. Uuden teknologian käyttöönotto vaatii investointeja laitteistoihin ja tietojärjestelmiin. Radin ym. mukaan teknologioiden yhteensovitus ja johtajien tuki ovat keskeisimmät tekijät toimitusketjun toimivuuden kannalta. Yrityksen liiketoiminta tavoitteiden, strategian ja teknologian on oltava linjassa koko toimitusketjun läpi. Industry 4.0 teknologioiden käyttöönotto vaatii yrityksiltä muutoksia sisäisiin ja ulkoisiin prosesseihin, joten esihenkilöiden ja ylimmän johdon muutosjohtaminen vaikuttaa koko

toimitusketjuun (Rad ym., 2022)



Kuva 2 Kerätty data ja pilvilaskenta Lisävän valmistuksen pohjana. Pilvilaskenta analysoi asiakas- ja valmistusdataa (Dilberoglu, 2017).

Esineiden internet (IoT), Big Data ja pilvilaskenta mahdollistavat suuren data määrän keräämisen, jota voidaan käyttää älykkäässä valmistuksessa. IoT:in avulla kerätään dataa fyysisiltä osapuolilta, kuten laitteista, tuotantolinjoista ja prosesseista, tietokoneverkkojen kautta. Big Data käsittää suuren määrän dataa, jota analysoidaan ja käytetään päätöksenteossa. Nämä kyberteknologiat, yhdessä pilvilaskennan kanssa, auttavat hyödyntämään informaatiota älykkäässä valmistuksessa. Valmistusprosessien ja pilvilaskennan välinen analytiikka käsittelee valmistuksesta sekä asiakkailta saatua dataa (Kuva 2.). Tätä dataa voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotekehityksessä ja tutkimuksessa (Dilberoglu ym. 2017).

Älykkäässä valmistuksessa keskeinen asia on massaräätelöinti, johon perinteiset valmistustavat eivät pysty. Kuten aikaisemmin mainittu, lisäävä valmistus mahdollistaa monimutkaisten ja räätälöityjen tuotteiden valmistamisen. 3D-tulostus järjestelmien avulla pystytään valmistamaan tarkkoja ja laadukkaita tuotteita asiakkaiden vaatimuksiin. Kyberteknologian avulla käsitellyn datan ansiosta voidaan luoda asiakaskohtaisia tuotteita sekä 3D-tulostus valmistusta valmistusprosesseissa (Dilberoglu ym. 2017).

## 2.5 Massaräätälöinti

Lisävä valmistus mahdollistaa yrityksille siirtymisen kohti massaräätälöinnin tarjoamista palvelumuotoisena (MPaaS, eng. *Mass Personalization as a service*). Massaräätälöityjen tuotteiden avulla yritykset voivat erottua markkinoilla tarjoamalla henkilökohtaisia asiakaskokemuksia, jotka luovat lisäarvoa niin asiakkaalle kuin palvelua myyvälle yritykselle. 3D-tulostustuotanto asiakkaan tarpeisiin tuo asiakkaan osaksi palvelua ja lopputuotteen suunnittelua, jolloin asiakkaan tarpeet ja vaatimukset tulevat huomioituksi. Massaräätälöinti ja lisävä valmistus voidaan myös myydä kestävässä liiketoimintana, koska tuotteiden valmistus kysynnän mukaan vähentää materiaalihävikkiä ja varastotasojä. Teknologiat, kuten IoT, Big Data ja pilvipalvelut mahdollistavat tiedonsiirron ja CAD 3D-mallinnusten tehokkaan jakamisen palveluiden tarjoajan ja asiakkaiden välillä. Tekoälyn ja Big Datan avulla voidaan teoriatasolla ennustaa asiakasdatasta millaista personointia valmistetuissa tuotteissa tullaan tarvitsemaan (Pereira & Dos Santos, 2023)

Tarjotakseen massaräätälöintiä palveluna, yritysten on rakennettava modulaarinen, joustava ja skaalautuva tuotantojärjestelmä mukautuakseen muuttuvaan liiketoimintaympäristöön ja kysyntään. Kilpailukykyisenä pysyminen vaatii yrityksiltä investointeja teknologiaan, kuten pilvipalveluihin ja 3D-tulostusjärjestelmiin (Pereira & Dos Santos, 2023).

3D-tulostuksen etuna on, että sen avulla voidaan valmistaa geometrisesti haastavia kappaleita ilman kalliita muotteja tai työkaluja, jotka ovat välttämättömiä perinteisessä valmistuksessa. Tuotemuotoja pystytään myös muokkaamaan nopeasti tietokonemallien avulla, joka mahdollistaa nopean reagoinnin markkinoiden tai asiakkaan kysyntään (Barata J, 2023). Näin ollen massaräätälöinti palveluna voidaan myydä asiakkaalle nopeana palveluna, joka on joustava ja tuottaa näin lisäarvoa asiakkaalle (Pereira & Dos Santos, 2023). Lisävä valmistus ei kuitenkaan yksinään ole vielä kustannustehokas ratkaisu massatuotantoon tai massaräätälöintiin. Keskeisiä ongelmia lisäävän valmistuksen käytössä massatuotannossa on valmistuskapasiteetti, tulostusnopeus ja sitovat kustannukset. Lisävä valmistus on ympäristö ja talouden kannalta kannattavampaa mitä monimutkaisempia tuotteet ovat ja volyymit ovat pieniä. Siksi lisäävää valmistusta ja massaräätälöintiä hyödynnetään tällä hetkellä eniten auto-, ilmailu- ja lääketieteellisyydessä. Tulevaisuudessa teknologian kehitys voi mahdollistaa 3D-tulostusjärjestelmien tehokkaamman käytön, joka taas mahdollistaa kannattavan massaräätälöinnin suurilla tuotantovolyyymeilla (Barata J, 2023). Massaräätälöinti on olennainen osa lisäävän valmistuksen tarjoamasta mahdollisuudesta tehdä toimitusketjusta joustavampi. Lisäävän valmistuksen vaikutuksesta riskienhallintaan ja resilienssiin tutkitaan lisää luvussa 4.

### 3 Toimitusketjujen riskienhallinta

Globalisaation myötä toimitusketjut ovat muuttuneet monimutkaisemmiksi ja prosesseja ulkoistetaan kustannusten ja läpimenoaikojen pienentämiseksi. Toimitusketjujen toimivuus heijastuu suoraan yrityksen liiketoimintaan, koska lopputuotteiden lisäksi toimitusketjussa liikkuvat raaka-aineet ja komponentit, niin teollisuus- kuin palvelualoilla (Aqlan & Lam, 2014). Globaalit toimitusketjut ovat osa yritysten pitkäaikaista strategiaa ja tavoitteita, joten kustannusten vähentämisen ja tehokkuuden lisäämisen takia prosessien ulkoistaminen valtionrajojen ulkopuolelle on kannattavaa. Toimintojen ulkoistaminen tuo kuitenkin mukanaan myös globaaleja ongelmia ja epävarmuutta, jotka johtuvat toimitusketjuun kohdistuvista riskeistä. Toimitusketjujen kannalta keskeistä globaalissa toiminnassa on pitää huoli toimitusketjun joustavuudesta, monimuotoisuudesta ja mukautuvaisuudesta, jotta se pystyy vähentämään riskitekijöiden aiheuttamia häiriöitä ja niiden vaikutuksia (Um, J, 2021)

Toimitusketjuihin liittyvät riskitekijät voidaan luokitella sisäisiin ja ulkoisiin riskitekijöihin. Sisäiset toimitusketjuriskit liittyvät yrityksen omaan toimintaan ja prosesseihin, kuten hankintaan, valmistukseen ja kuljetuksiin. Ulkoiset riskit ovat yrityksestä riippumattomia tekijöitä, eli esimerkiksi yhteiskunnalliset tekijät kuten politiikka tai talousmarkkinat. Lisäksi ulkoisia riskitekijöitä ovat maantieteelliset tekijät, kuten sääolosuhteet (Um, J, 2021). Toimitusketjujen riskienhallinnassa pyritään vähentämään näiden riskitekijöiden vaikutuksia kehittämällä toimitusketjun kykyä sopeutua ja selviytyä muuttuvassa ympäristössä. Tällä tarkoitetaan toimitusketjun resilienssiä, eli äkillisten häiriöiden aiheuttamien ongelmien ennakointi, häiriöiden vaikutuksen vähentämistä sekä kykyä toipua ja jatkaa toimintaa häiriön jälkeen (Salamai, 2019). Molemmat riskityypit ovat läsnä niin toimitusketjun ala- kuin ylävirrassa. Toimitusketjun alavirta tarkoittaa jakelukanavia ja asiakkaita, jotka ovat kytköksissä toimitusketjuun. Ylävirralla tarkoitetaan toimittajia ja alihankkijoita, jotka tarjoavat tavaroita tai palveluita toimitusketjun alkupäässä (Um, J, 2021).

#### 3.1 Sisäiset riskit

Toimitusketjujen sisäiset riskitekijät voidaan kategoroida hankinta-, valmistus- ja kuljetusriskeihin. Sisäiset riskit liittyvät materiaali- tai informaatiovirtoihin, kapasiteetti ongelmiin tai prosessien välisiin kuljetusongelmiin (Um, J, 2021).

Toimitusketjun alavirrassa yrityksen oman jakeluketjun häiriintyminen voi johtaa tavarantoimituksiin, pienentyneisiin varastoihin sekä huonoon asiakaspalveluun. Toimitusketju on alttiimpi jakeluketjun riskeille, kun se luottaa vain yhteen kuljetusmuotoon. Esimerkiksi vahvasti rekkakuljetuksiin luottavan yrityksen jakeluketju on altis kuorma-autonkuljettajien aiheuttamille häiriöille.

Toimitusketjun alavirran häiriöt voivat myös johtua asiakkaiden kysynnän äkillisestä muutoksesta. Väärinymmärrys yrityksen suunnitelmissa ja markkinoiden oikeassa kysynnässä kuormittaa jakeluketjua ja johtaa materiaalipuutteisiin ja vähäisiin varastotasoihin (Bode, 2013). Ongelmat varastotasoiissa ja jakelussa vaikuttavat yrityksen tuottaman palvelun laatuun. Tämä vaikuttaa suoraan asiakkaiden ostopäätöksiin, joka vaikuttaa palvelun tarjoajan taloudelliseen tulokseen (Um, J, 2023).

Toimitusketjun valmistus- ja tuotantoprosesseihin liittyy aina infrastruktuurista aiheutuvat riskit. Tällaisia riskejä ovat tuotantolaitteistojen hajoaminen, onnettomuudet, IT-häiriöt, veden- tai sähkön jakelun katkeaminen sekä paikallisen väestön aiheuttamat ongelmat, kuten vandalisointi ja sabotaasit (Bode, 2013). Tuotannon katkeaminen esimerkiksi onnettomuuden takia johtaa tuotanto kapasiteetin häiriintymiseen. Ulkoistettuun toimintaan liittyy myös omistajuusriski, eli kysymys siitä kuka on vastuussa mistäkin ja kuinka emoyhtiö pystyy valvomaan omaa prosessiaan.

Hankintaan liittyvät riskit toimitusketjun ylävirrassa johtuvat yrityksen ja toimittajien välisten suhteiden häiriöistä. Toimittajasuhteista ja toimittajaverkostosta johtuvia riskejä ovat liiketoiminnan riskit, rajoittunut tuotantokapasiteetti, laatuongelmat ja vaihtuvuus teknologiassa ja tuotesuunnittelussa. Liiketoiminnan riskejä aiheuttaa toimittajasuhteiden katkeaminen ja liian harvan toimittajan käyttäminen. Esimerkiksi yhden toimittajan konkurssi voi pahimmillaan aiheuttaa taloudellista vahinkoa palvelua ostavalle yritykselle (Bode, 2013). Häiriöt toimittajien omissa jakeluketjuissa aiheuttaa myös kustannuksia ostavalle yritykselle. Huonot toimittajasuhteet nostavat materiaalien hintoja, joka nostaa itse tuotantohintoja. Hyvillä toimittajasuhteilla ja laajalla toimittajaverkostolla yritys voi taata itselleen kilpailukykyiset materiaalihinnat sekä varmistaa materiaalien saatavuuden (Um, J, 2023).

### **3.2 Ulkoiset riskit**

Toimitusketjujen ulkoisia riskejä ovat usein yrityksestä itsestään riippumattomia tekijöitä, kuten luonto, poliittinen järjestelmä tai markkinat. Myös alueiden geopoliittiset tekijät, kuten valtion sisäinen turvallisuus tai konfliktit ovat ulkoisia riskitekijöitä. Ulkoisille riskeille ominaista on, että ne ovat vaikeita ennustaa, kuten esimerkiksi luonnonkatastrofit (Um, J, 2023).

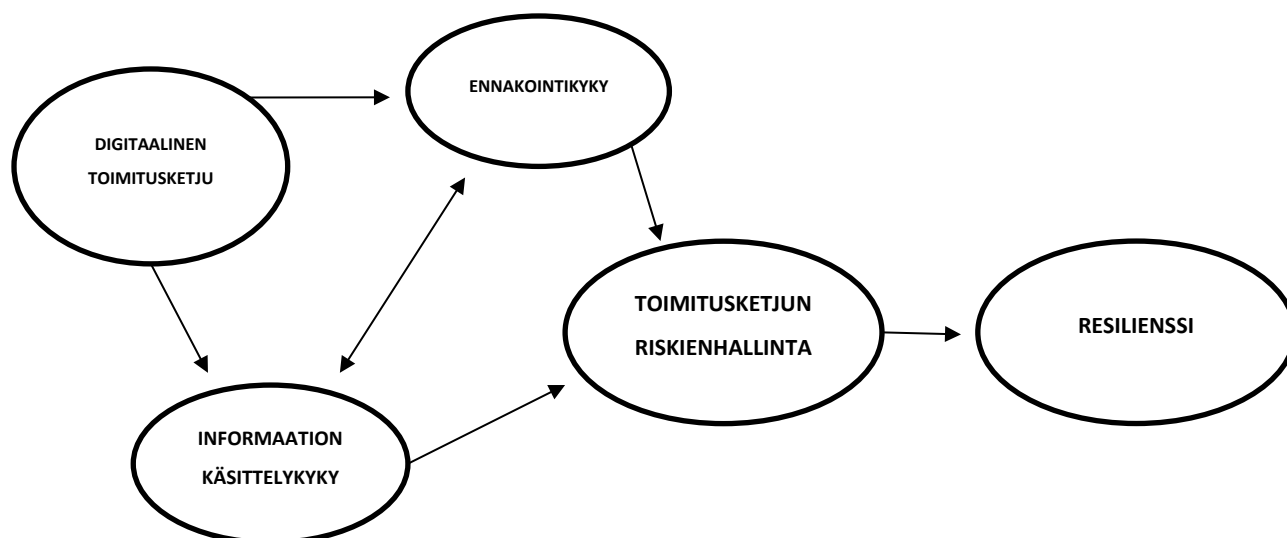
Ulkoiset ja sisäiset toimitusketjuriskit eivät ole toisistaan riippumattomia. Toimitusketjun ulkoinen häiriö, kuten luonnonkatastrofi, voi paljastaa toimitusketjun sisäisiä haavoittuvuuksia (Brusset & Teller, 2017). Esimerkiksi COVID-19 pandemia paljasti monien yritysten toimitusketjujen haavoittuvuuden. Pandemian aiheuttamat sulut ja toimitusketjuhäiriöt kurittivat niitä yrityksiä eniten, joiden toimitusketjun riskienhallinta ja resilienssi olivat pieniä. Useat maat sulkiivat äkillisesti rajansa,

joka johti tavaravirtojen katkeamiseen ja merkittäviin katkoksiin yritysten tuotannoissa (Mohammed, A. 2023). Toimitusketjun sisäisten riskitekijöiden ehkäisy esimerkiksi joustavuudella, monipuolisuudella ja yhteistyöllä vähentää myös ulkoisten riskien vaikutusta (Brusset & Teller. 2017).

### 3.3 Resilienssin hallinta

Turvataksaan koko organisaation toimintakyvyn yritysten on huolehdittava toimitusketjunsä resilienssistä ja hallittava toimitusketjuun liittyviä riskejä. Toimitusketjujen tyypilliset piirteet, kuten tiivistyneet yhteistyösuhteet, lisääntynyt kompleksisuus, vähentyneet varastotasot ja maailmanlaajuinen levittäytyminen tekevät toimitusketjuista haavoittuvaisia (Brusset, 2017). Koronapandemia aiheutti toimitusketjuille ympäri maailmaa merkittäviä häiriöitä koska maailmanlaajuinen kysyntä vaihteli äkisti sekä työvoimasta oli puutetta kokoontumisrajoitusten takia. Pandemia oli muistutus yrityksille miksi toimitusketjun resilienssistä on huolehdittava ja miksi sen tutkimukseen kannattaa panostaa (Mohammed ym., 2023). Toimitusketjun resilienssi auttaa yritystä toipumaan häiriöistä nopeammin ja vähentää niistä koituvaa haittaa. Resilienssin parantamiseksi yrityksen on tunnistettava mahdollisia riskejä ja niiden mukaan hallinnoida ja muokata toimitusketjuaan (Um, J. 2023)

Parantaakseen toimitusketjun resilienssiä yritysten tulisi lisätä toimitusketjun integraatiota ja joustavuutta. Toimittajien, asiakkaiden, kuljetusyhtiöiden ja jakelijoiden yhdistäminen osaksi toimitusketjua tietojärjestelmien avulla mahdollistaa tiedon nopean siirtämisen toimitusketjussa. Ennusteiden, myyntidatan sekä tavarän jäljitystieto luovat läpinäkyvän toimitusketjun ja lisäävät joustavuutta (Pettit, 2019). Toimitusketjun joustavuudella on useita tasoja. Ensimmäinen taso on kyky vastata muuttuvaan tuotekysyntään. Tämä tarkoittaa modulaarisia ja monikäyttöisiä tuotteita, jotka ovat helposti muokattavissa kysynnän muuttuessa. Toinen taso on toimitusketjun mukautumiskyky muuttuvaan ympäristöön. Tällä tarkoitetaan toimitusketjun joustavaa päätöksentekoa, tuotetaanko prosessi itse vai ulkoistetaanko ulkopuoliselle toimijalle. Lisäksi mukautuvan toimitusketjun on pystyttävä muuttamaan toimipaikkojen sijaintaan, toteuttamaan tuotantopaikkojen erikoistumisia sekä huolehtimaan toimittajaverkostostaan. Lisätäkseen toimitusketjun integraatiota ja joustavuutta toimitusketju tarvitsee myös inhimillistä pääomaa, eli päätöksentekokykyisiä työntekijöitä, jotka ymmärtävät ja tunnistavat riskejä sekä mahdollisia toimitusketju ongelmia (Pettit, 2019).



Kuva 3 Digitalisoinnin vaikutuksen mallinnus (Rashid, 2024)

Tänä päivänä tutkijat uskovat, että toimitusketjun digitalisoituminen on mukautuvan toimitusketjun yksi merkittävimmistä tekijöistä (Ghobakhloo, 2025; Rashid, 2024). Industry 4.0 nähdään tuovan toimitusketjuille merkittäviä etuja ja kykyjä lisätä joustavuutta. Teknologiat, kuten tekoäly, big data ja IoT auttavat toimitusketju tiedonsiirrossa, läpinäkyvyydessä ja integroinnissa (Ghobakhloo, 2025). Valmistusteknologiat, kuten 3D-tulostaminen, mahdollistavat digitalisoitujen toimitusketjujen mukautuvan valmistuksen, jossa tuotteita pystytään räätälöimään asiakkaiden tarpeeseen (Rad ym., 2022). Kuva 2. havainnollistaa kuinka toimitusketjun digitalisoituminen ja informaation prosessointikyky tukevat riskienhallintaa, joka luo toimitusketjulle resilienssiä. Informaation käsittelykyky mahdollistaa paremman ennakkoinnin ja valmistautumisen häiriöihin.

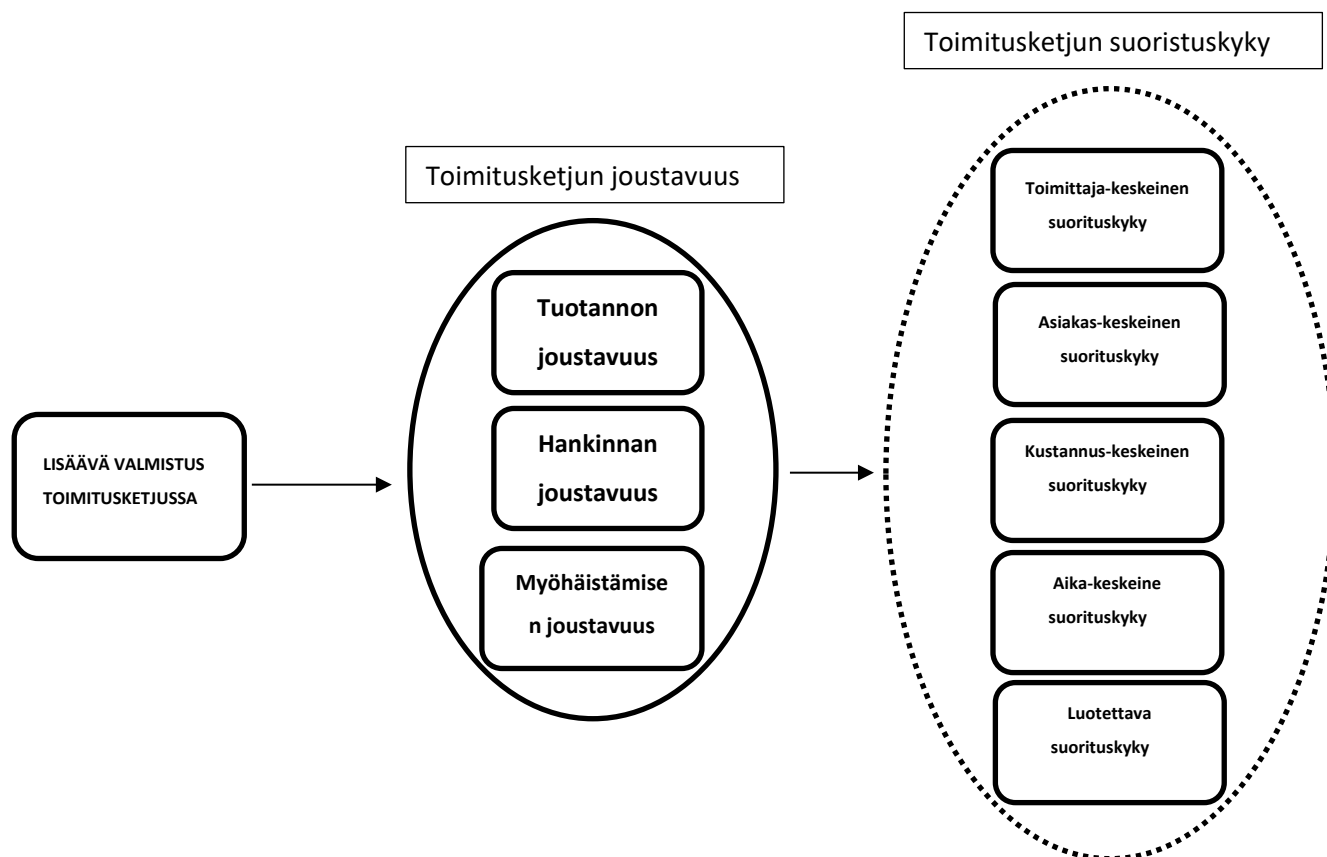
## 4 Lisäävä valmistus osana toimitusketjun riskienhallintaan

### 4.1 Toimitusketjun joustavuus

Toimitusketjun riskienhallinnassa toimitusketjun joustavuus on avainasemassa. Delic ja Eyers (2020) mukaan lisäävän valmistuksen sisällyttäminen toimitusketjuun lisää joustavuutta, joka taas lisää toimitusketjun suorituskykyä. Näin ollen heidän johtopäätöksensä on, että yritysten tulisi lisätä toimitusketjun joustavuutta sen kokonaisvaltaisen toimivuuden parantamiseksi (Kuva 4.). Delic ja Eyersin mukaan lisäävällä valmistuksella on tilastollisesti todistettuja positiivisia vaikutuksia yrityksen toimitusketjun tuotannon, hankinnan ja viivästyttämisen joustavuuteen. Lisäävä valmistus lisää toimitusketjun joustavuutta mahdollistamalla sellaisten tuotteiden valmistuksen, jotka eivät olisi tavallisilla tuotantotavoilla mahdollisia. 3D-tulostamalla valmistetuilla tuotteilla voi olla uusia ominaisuuksia, kuten pidempi käyttöaika tai vähentynyt työvoiman- tai luonnonvarojen tarve. Esimerkiksi autoteollisuudessa 3D-tulostamalla valmistetaan auton osia, kuten moottorirunkoja. 3D-tulostamisen ansiosta pystytään auton osien valmistuksessa hyödyntämään tehokkaammin kevyempiä materiaaleja, kuten alumiinia, titaania ja nikkeliyhdisteitä, jolloin saadaan myös autojen kokonaispainoa kevyemmäksi (Douglas, 2016).

3D-tulostamisen ansiosta pystytään valmistamaan laaja-alaisesti erilaisia esineitä suoraan raaka-aineista. Tämä tarkoittaa, että lisäävän valmistuksen avulla voidaan toimitusketjussa tuotantoprosessia viivästyttää myöhemmäksi (eng. *Postponement*) helpottaakseen kysynnän ennustamista (Delic & Eyers, 2020). Tuotantoprosessin myöhäistäminen mahdollistaa osien ja komponenttien valmistuksen suoraan kysynnän mukaan, jolloin suurten tuotantolinjojen ja varastohallinnan tarve vähenee. Asiakaskohtaisesti räätälöityjen tuotteiden ja komponenttien valmistaminen on nopeampaa 3D-tulostamalla kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä (Singh, 2014; Delic & Eyers, 2020). Perinteisessä tuotantoprosessissa tuotteiden modulaarisuus saavutetaan yhdistelemällä erilaisia komponentteja yhdeksi lopputuotteeksi. Tämä tarkoittaa, että lopputuotteiden komponentteja on pidettävä varastossa, jotta vasteaika olisi mahdollisimman lyhyt. 3D-tulostustekniikalla voidaan vaikuttaa komponenttien varastotasoihin, koska tuotteet valmistetaan kokonaisiksi tulostamalle ne suoraan raaka-aineesta (Delic & Eyers, 2020). Kysyntää vastaava tuotanto 3D-tulostamalla vähentää tarvetta suurelle lopputuotevarastolle, jolloin lopputuotteiden varastonkierto myös nopeutuu (Singh, 2024). Lisäksi 3D-tulostamisessa käytettävien raaka-aineiden uudelleenkäyttö on mahdollista, joten raaka-ainevaraston koko pienenee (Zijm, 2018). Näin ollen, tarve monitasoiselle tuotantosuunnittelulla vähenee, joka nopeuttaa tuotantoprosessia ja vähentää siihen vaikuttavia riskejä ja kustannuksia (Zijm, 2018). Tuotannon räätälöinti ja myöhäistäminen

siirtää asiakaskohtaamispistettä, joka vähentää toimitusaikoja, vasteaikaa ja lisää asiakastyytyväisyyttä (Zijm, 2018). 3D-tulostamalla tehtyjen prototyyppien, testimallien ja tuotemuutosten avulla aika lopputuotteen saamiseksi markkinoille lyhenee, jolloin yrityksen vasteaika riski muuttuvaa kysyntää kohtaan pienenee (Singh, 2014).



Kuva 4 Lisäävän valmistuksen vaikutus joustavuuteen (Delic & Eysers, 2020)

Tuotannon joustavuudella on vaikutus hankinnan joustavuuteen. Tuotannon myöhäistäminen helpottaa kysynnän ennustamista, jolloin myös raaka-aineiden hankintaerien kokoja pystytään kasvattamaan tai pienentämään (Delic & Eysers, 2020). Tuotannon, hankinnan ja asiakaskohtaamispisteen joustavuus vaikuttaa suoraan toimitusketjun suorituskykyyn. Nämä ominaisuudet vievät valmistavan yrityksen lähemmäksi asiakkaita ja toimittajia, jolloin liiketoiminnasta tulee toimittaja- ja asiakaskeskeistä. Lisäksi joustavuuden avulla voidaan hallita kassavirtoja ja hallita vasteaikaa, jolloin koko toimitusketjun suorituskyky on joustavampi (Kuva 4; Delic & Eysers, 2020). Lisäävän valmistuksen integrointi osaksi tuotantoprosessia vähentää riippuvuutta komponenttien ja osien toimittajiin, mutta kääntöpuolena yrityksen on tukeuduttava raaka-aine toimittajiin (Singh, 2024). Zijm (2018) mukaan tämä on pienempi riski, sillä raaka-aine toimitukset tapahtuvat isoissa erissä, jolloin ne eivät ole riskialttiimpia kuin monen pienen erän

komponenttien tai osien toimitukset. Lisäksi 3D-tulostustuotanto vähentää toimittajien määrää, koska tuotantomalli tarvitsee vain laite- ja raaka-ainetoimittajan (Chan, 2018).

## 4.2 Vaikutus toimitusketjun kustannuksiin

Lisävään valmistuksen lisääminen osaksi toimitusketjua tuo myös kustannuksia. 3D-tulostamiseen tarvittavat laitteet ja järjestelmät ovat merkittävä osa kokonaiskustannuksia. Teknologian kehittyessä 3D-tulostusjärjestelmien hinnat ovat laskeneet, esimerkiksi vuosien 2001 ja 2013 välillä, teolliseen 3D-tulostamiseen tarkoitettujen järjestelmien keskihinta putosi 42 % (Douglas, 2016). Varsinkin teollisessa 3D-tulostuksessa materiaalikustannukset ovat isoja verrattuna perinteisiin tuotantotapoihin. Teolliseen käyttöön tarkoitettujen järjestelmät ja materiaalit ovat pienemmille yrityksille hankalampia hankkia kustannusten takia (Chaudhuri, 2018). Lisäävä valmistus tukeutuu vahvasti teknologian ympärille ja vaatii toimiakseen erikoistunutta työvoimaa. Järjestelmien käyttö ja tuotesuunnittelu vaatii usein koulutettuja asiantuntijoita. Ainoastaan 3D-tulostimien käyttöön tarvitaan perinteisen tason tuotantotyöntekijää. Näin ollen, lisäävän valmistuksen takia henkilöstökustannusten rakenne muuttuu koska fyysisen työn tarve vähenee ja korkeammin koulutettujen asiantuntijoiden tarve kasvaa. Manuaalisen työn hinta pienenee, mutta suunnitteluun ja järjestelmän huoltamiseen tarvittava työvoima maksaa enemmän (Zijm, 2018). Kuten aikaisemmin kerrottu, lisäävän valmistuksen avulla voidaan vähentää tarvetta lopputuotevarastolle. Pienemmät varastot vähentävät varastonhallintakustannuksia, kuten vakuutuksia, veroja ja korkoja. Lisäksi pienet varastot sitovat vähän pääomaa ja vapauttavat sitä yrityksen muuhun käyttöön (Singh, 2018).

Teollisuuksissa, joissa ei ole epävarmaa kysyntää tai tarvetta kompleksisille tuotteille, lisäävän valmistuksen implementointi toimitusketjuun voi johtaa korkeampiin tuotteiden yksikkökustannuksiin (Alogla & Lam, 2015). Toisaalta 3D-tulostusteknologia vähentää kustannuksia yrityksissä, joissa valmistetaan monimutkaisia ja räätälöityjä tuotteita (Douglas, 2016). 3D-tulostamisen käyttäminen tutkimuksessa ja kehityksessä on huomattu olevan vähentävä vaikutus uusien tuotteiden innovaatiokustannuksissa (Alogla & Lam, 2015). Esimerkiksi tutkimuksessaan Delic ja Eyers (2020) toteavat autovalmistaja BMW:n onnistuneen vähentämään kokonaiskustannuksiaan 58 prosenttia 3D-tulostamalla työkaluja, autonosia ja komponentteja. Lisäksi BMW onnistui vähentämään projekteihin tarvittavaa aikaa 92 prosentilla (Delic & Eyers, 2020). Vuonna 2018 BMW uutisoi mediatiedotteessaan, että sen on viimeisen kahdeksan vuoden aikana tulostanut yli miljoona autonosaa, joista noin 200 000 vuoden 2018 aikana.

### 4.3 Lisäävän valmistuksen implementoinnin ongelmat ja haasteet

3D-tulostustuotanto osana toimitusketjua luo mahdollisuuden lisätä toimitusketjun joustavuutta sekä yrityksen innovaatiokykyä. Johtuen kuitenkin 3D-tulostustekniikan saatavuudesta ja teknologisesta tehokkuudesta, lisäävän valmistamisen integroiminen kokonaiseksi tuotantoprosessiksi on haasteellinen. Aloglan ja Lamin mukaan lisäävän valmistus sopii parhaiten matalan kysynnän markkinoille, jossa tuotteet ovat kompleksisia ja nopeasti muokattavissa. Korkeamman kysynnän markkinoilla, joissa tuotantomäärällä voidaan luoda skaalaetua, Aloglan ja Lamin mukaan, perinteiset tuotantomallit ovat tehokkaampia, vaikka se tarkoittaisi isompia puskuri- ja varaosavarastoja.

Toinen merkittävä haaste 3D-tulostustuotannon integroimiseksi osaksi toimitusketjua on teknologian aiheuttamat kustannukset (Parvanda & Kala, 2022). Investoinnit 3D-tulostustekniikkaan ja järjestelmiin on varsinkin teollisuudessa kallista ja sen vaatima lisäosaaminen nostaa henkilöstökustannuksia. Lisäksi esimerkiksi metallimateriaalien hankinta aiheuttaa juoksevia raaka-ainekuluja (Parvanda & Kala, 2022).

Parvanda ja Kalan mukaan lisäävän valmistus vaatii myös rakenteellisia muutoksia toimitusketjussa. 3D-tulostusjärjestelmät vaativat toimiakseen digitaalisen infrastruktuurin ympärilleen, joka taas tarkoittaa, että kyberturvallisuuden tarve toimitusketjussa ja sen prosesseissa kasvaa. Rakenteelliset muutokset vaativat toimitusketjunhallinnan ja tuotantosuunnittelun osaamista, jotta tuotanto olisi mahdollisimman tehokasta ja yritys pystyisi luomaan skaalaetua 3D-tulostamisen avulla. Rakenteelliset muutokset vaativat tehokasta muutosjohtamista sekä koulutusta (Parvanda & Kala, 2022). Martinsuon ja Luomarannan (2018) mukaan lisäävän valmistuksen integroiminen osaksi toimitusketjua vaatii laajempia kansallisia investointeja tietojärjestelmiin. Lisäävää valmistusta tulisi myös mainostaa eri teollisuudenaloille, jotta ne osaisivat hyödyntää sitä omissa valmistusprosesseissaan. Tämä onnistuu Martinsuon ja Luomarannan mukaan tuotekehitysohjelmien sekä kattavan tietoliikenneverkon avulla.

Martinsuo ja Luomaranta (2018) ehdottavat tutkimuksensa pohjalta tapoja helpottaa 3D-tulostus tuotannon integroimista osaksi toimitusketjua. Yrityksen tulisi tehdä strategisia ja operatiivisia toimenpiteitä helpottaakseen lisäävän valmistuksen integroimista. Strategisia toimenpiteitä Martinsuon ja Luomarannan mukaan ovat kehitysstrategioiden luominen. Kehitysstrategioissa tulisi määrittää alueet, joissa yritys hyödyntäisi 3D-tulostusta sekä mitkä tuotantoprosessit se ulkoistaisi muiden tehtäväksi. Lisäksi yrityksen tulisi kehittää toimitusketjun digitalisaatiota ja henkilöstön osaamista. Martinsuon ja Luomarannan mukaan yrityksen tulisi tehdä läheisesti yhteistyötä

asiakkaiden kanssa ja luoda kysyntää luomalla tuoteprototyyppejä, joilla se voi houkutella uusia asiakkaita ja yhteistyökumppaneita. Operatiivisia toimenpiteitä, joita yritykset voivat tehdä ovat Martinsuon ja Luomarannan mukaan tutkimuksen, käytännön opettelu ja kokeilemisen avulla tekniikasta ja materiaaleista voidaan vähentää epävarmuuksia. Yritysten tulisi antaa tuotteiden- ja tuotantosuunnittelijoille resurssit, sekä vapaus, oppia ja tutkia lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia.

#### **4.4 Lisäävä valmistus ja toimitusketjun riskienhallinta**

Lisäävä valmistus on yksi digitaalisen vallankumouksen keskeisistä teknologioista. Kirjallisuudessa toistuvat samat toteamukset siitä, että 3D-tulostustuotanto mahdollistaa hajautetun ja joustavan tuotantomallin, jonka ansiosta tuotannon nopeampi reagointikyky tukevat toimitusketjujen riskienhallintaa (Esim. Gohbahkloo, 2025; Delic & Eyers, 2020; Gubpta ja ym., 2022). Gohbahkloon mukaan toimitusketjun digitalisoinnilla on siihen integroiva vaikutus, joka helpottaa tiedonsiirtoa ja tekee toimitusketjusta läpinäkyvämmän. Toimitusketjun tiedonkäsittelykyky on Rashidin mukaan suoraan vaikutuksissa toimitusketjun riskienhallintaa ja resilienssiin, sillä se auttaa ennustamaan ja tunnistamaan markkinoiden kysynnän muutoksia ja häiriöitä.

Toimitusketjun suurimmat riskit liittyvät riippuvuuksiin ja kyvyttömyyteen reagoida nopeasti häiriöihin. Luvussa kolme todetaan, että toimitusketjun resilienssiin vaikuttaa toimitusketjun joustavuus ja kyky mukautua muuttuviin tilanteisiin (Delic & Eyers, 2020). Delic ja Eyersin tutkimuksen mukaan lisäävä valmistus lisää toimitusketjun ketteryyttä ja joustavuutta, koska se vähentää riippuvuutta ulkoisiin varaosatoimittajiin. Lisäksi 3D-tulostustuotanto helpottaa ennakoitua ja sopeutumista kysynnän vaihteluun, koska se mahdollistaa tilauksenkohdennuspisteiden viemistä lähelle asiakasta. Tilauksenkohdennuspisteellä (OPP) tarkoitetaan pistettä materiaaliavirrossa, jossa tuote kohdennetaan asiakkaalle (Logistiikan maailma, 2025). Gupta ym. mukaan lisäävä valmistus luo joustavuutta varsinkin toimitusketjun ylävirtaan, koska sen avulla voidaan vähentää toimittajia ja logistiikkaketjuja. Lisäävälle valmistamiselle on ominaista, että sitä pystytään joustavasti käyttämään toimitusketjun kaikissa vaiheissa. Tämä mahdollistaa tuotantoprosessin optimaalisen sijainnin toimitusketjussa, jolloin esimerkiksi tarvittavien osien tai komponenttien valmistus voidaan tehdä suoraan tarvittuun vaiheeseen (Gupta ym., 2022).

Aloglan ja Lamin mukaan lisäävän valmistuksen avulla on vaikea saavuttaa skaalaetua, kun kysyntä ja tuotantomäärät ovat suuria. Douglasin (2016) mukaan lisäävän valmistuksen skaalaetu toimitusketjussa saavutetaan parhaiten varmistamalla sen avulla tärkeiden ja kompleksisten osien valmistus. 3D-tulostamalla pystytään Douglasin mukaan valmistamaan sellaisia osia ja

komponentteja, joita tavallisilla tuotantotavoilla ei pystytä. Esimerkiksi titaanin käytön suosio ilmailu- ja autoteollisuudessa perustuu sen keveys- ja kestävyysominaisuuksiin. Titaanisten osien 3D-tulostaminen on kustannustehokkaampaa, koska materiaalihukka on pienempi. Lisäksi 3D-tulostamalla voidaan tuottaa räätälöityjä ja kompleksisia osia, joita ilmailu- ja autoteollisuudessa tarvitaan. Kriittisten osien valmistaminen 3D-tulostamalla ei pelkästään säästä ilmailu- ja autoteollisuuden yritysten kustannuksia vaan lisää myös resilienssiä turvaamalla osien saannin (Nyamekyan, 2024).

Lisäävän valmistuksen integroiminen osaksi toimitusketjua ja toimitusketjun riskienhallintaa ei kuitenkaan ole ongelmaton. Digitaalinen toimitusketju luo uusia haasteita esimerkiksi kyberturvallisuuden puolelle. Toimitusketjun riskienhallintastrategiassa on otettava enemmän huomioon haavoittuvat tietoverkot ja digitaaliset informaatiovirrat (Douglas, 2016). Srirami ja Rambadun (2024) mukaan tuotantoteollisuuksien lisääntyminen tietoverkoissa aiheuttaa varsinkin lisäävän valmistuksen osalta riskin sabotaasille ja kyberhyökkäyksille. Heidän mukaansa sabotoijat voivat vioittaa tai varastaa CAD (Computer Aided Design) ohjelmistojen 3D-malleja.

#### **4.5 3D-tulostustuotannon rooli tulevaisuudessa**

3D-tulostusteollisuus on kehittynyt tuottamaan edistyksellisiä tuotteita prototyyppien lisäksi. Ohjelmistojen ja järjestelmien teknologinen kehitys on kiihdyttänyt valmistusalan kasvua. Kasvun myötä myös tieteellinen kiinnostus lisäävän valmistuksen mahdollisuuksiin on kasvanut merkittävästi. Tutkimusten ja teknologiakehitys luovat pohjaa mahdollisesti seuraavalle teolliselle vallankumoukselle, jossa metalliosien massatuotanto 3D-tulostamalla on arkipäivää (Armstrong ym. 2022). Srivastavan ja Ratheen mukaan 3D-tulostusteknologian kehitys massatuotanto kapasiteettiin asti tulee kuitenkin kestäväksi vuosikymmeniä. Heidän mukaansa tutkimuksen ja kehityksen tulisi keskittyä vähentämään kustannusten laskemiseen, prosessin standardointiin, korjaamaan laatuvirheitä sekä kehittämään valmistusmateriaaleja. Uusien tulostustapojen kehittäminen valmistuksen läpimenoajan nopeuttamiseksi on Srivastavan ja Ratheen mukaan tärkeää 3D-tulostustuotannon yleistymisen kannalta.

Lisäävä valmistaminen on todettu toimivaksi tavaksi tuottaa ainutlaatuisia tuotteita, komponentteja ja osia, mutta esimerkiksi Armstrongin ja muiden mukaan (2022) vielä on tutkittavaa siinä, miten 3D-tulostus teknologia pystyy hyödyntämään käytettyjen materiaalien ominaisuuksia. Ominaisuuksilla Armstrong viittaa esimerkiksi metallimateriaalien laser-tulostuksessa, laserin kuumuuteen, joka vaikuttaa lopputuotteen fyysisiin ominaisuuksiin kuten kestävyuteen. Näin ollen 3D-tulostuslaitteiden optimointi on haaste, johon tulevaisuuden teknologiakehitys Armstrongin mukaan

tarjoaa ratkaisun. Esimerkiksi koneoppiminen auttaa tulevaisuudessa tulostimia hyödyntämään dataa ja optimoimaan tulostus vaiheen parametrejä, jolloin tulostettavan osan fyysiset ominaisuudet optimoituvat. Tällä hetkellä tekoälyn ja koneoppimismallien käyttö on yksinkertaisesti kallista, joten ne eivät ole vielä yleistyneet (Armstrong ja ym. 2022).

Valmistavan teollisuuden, kuten auto- ja ilmailuteollisuuden, tavoitteena on kehittää massaräätälöintiä, vähentää materiaalihukkaa sekä päästöjä. Lisäävän valmistuksen muuttaminen automaatiotuotannoksi on yksi selkeä tulevaisuuden kehityskohde (Ashima ja ym. 2021). Ashiman mukaan tietoliikenne ja datavirta, IoT:in avulla, asuoraan asiakkaalta 3D-tulostin järjestelmiin mahdollistaa tulevaisuudessa automaation hyödyntämisen 3D-tulostustuotannossa. Lisäksi älymateriaalien käyttö 3D-tulostimissa tulee tarjoamaan uuden tavan valmistaa uudenlaisia ratkaisuja teollisuuksissa (Ashima ja ym. 2021). Älymateriaaleilla tarkoitetaan esimerkiksi sellaisia materiaaleja, joilla on kyky säilyttää jokin muoto tai mukautua ympäristön ominaisuuksien mukaisesti. Voidaan puhua myös mukautuvista materiaaleista, joita voidaan hyödyntää 4D-tulostamisessa (Ryan ja ym. 2021). Neliulotteiset tuotteet, eli älymateriaaleista 4D-tulostetut mukautuvat tuotteet, tulevat Ryanin ja muiden mukaan olemaan seuraavan sukupolven valmistusratkaisu. 4D-tulostaminen tarkoittaa 3D-tulostettuja tuotteita, jotka on valmistettu älymateriaaleista ja pystyvät mukautumaan ajan myötä vallitseviin olosuhteisiin, kuten lämpötilaan (Momemi ja ym., 2017). Materiaalit, jotka pystyvät mukautumaan olosuhteisiin, parantaen niiden elinikää ja toimivuutta, tulevat olemaan keskeinen tekijä tulevaisuuden 3D- ja 4D-tulostustuotannossa (Ryan ja ym. 2021).

## 5 Yhteenveto ja johtopäätökset

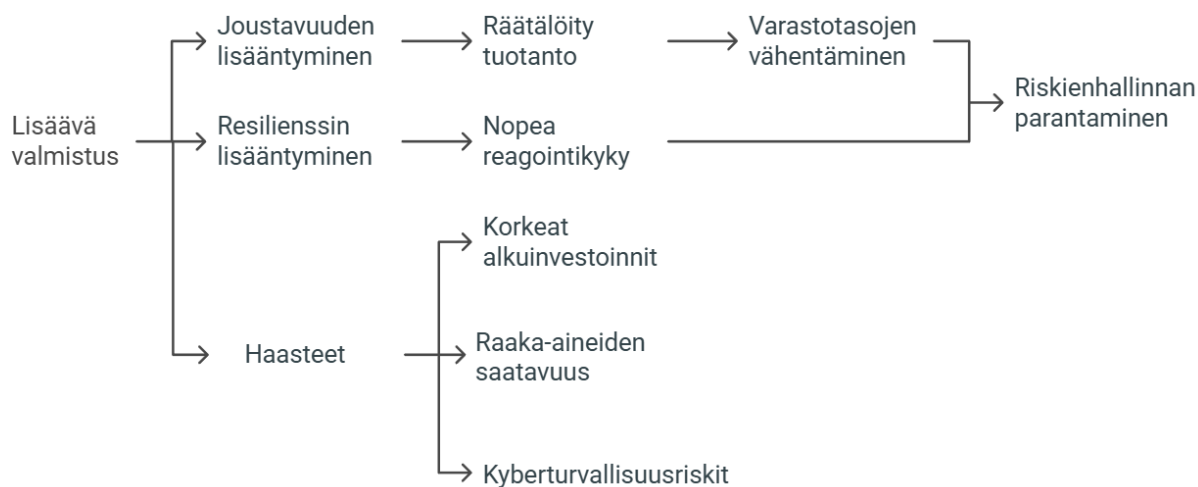
Tässä kandidaatintutkielmassa tutkitaan kirjallisuuden avulla teollisen 3D-tulostustuotannon vaikutuksia toimitusketjun riskienhallintaan. Lisäksi tutkimuksessa pyritään havainnollistamaan miten lisäävän valmistuksen implementointi mahdollistaa toimitusketjuissa, ja mitä mahdollisuuksia ja haasteita se synnyttää valmistaville yrityksille.

Kirjallisuus osoittaa, että lisäävällä valmistuksella on potentiaalia lisätä toimitusketjun joustavuutta. 3D-tulostustekniikan mahdollistama räätälöity tuotantomalli mahdollistaa kysynnän mukaisen valmistamisen, joka taas mahdollistaa varastotasojen sekä toimittaja riippuvuuksien vähentämisen (Delic & Eyers; Barata). 3D-tulostamisen lyhyt vasteaika mahdollistaa nopeamman reagointikyvyn kysynnän muutoksiin. Nopea kysynnän reagointikyky sekä vähentyneet varastotasot tukevat toimitusketjun resilienssiä (Kuva 5.). Lisäävä valmistus on osa neljättä teollista vallankumousta, jossa yritysten toimitusketjut digitalisoituvat (Dilberoglu ym., 2017). Toimitusketjujen digitalisoituminen helpottaa informaation käsittelykykyä, joka helpottaa toimitusketjun ennakoitukykyä. Nämä yhdessä helpottavat toimitusketjun riskienhallintaa ja kasvattavat resilienssiä äkillisissä häiriöissä (Pereira & Dos Santos, 2023; Rashid, 2024).

Lisäävän valmistuksen haasteet ovat sen korkeissa alkuinvestoinneissa, raaka-aineiden saatavuudessa, teknologisessa osaamisessa ja datainfrastruktuurin tarpeessa. Teollisten 3D-tulostimien hankintahinta on vielä toistaiseksi korkea ja mahdollisten tuotantomäärien takia lisäävällä valmistuksella on vaikea saavuttaa skaalaetua korkean kysynnän markkinoilla (Douglas, 2016; Chaudhuri, 2018). Lisäävän valmistuksen vaatima datainfrastruktuuri vaatii myös lisäosaamista ja toimitusketjun rakenteen muutoksia. Nämä aiheuttavat lisäkustannuksia ja merkittäviä lisäinvestointeja. Lisäksi toimitusketjun digitalisoitumisen takia kyberturvallisuus ja digitaalisten riskien määrä toimitusketjussa kasvaa (Aloglan & Lam 2015; Parvanda & Kala, 2022). Lisäävä valmistus toimitusketjussa lisää tarvetta päätöksentekokyvyille, koska yritysten on päätettävä mitä se valmistaa 3D-tulostamalla ja mitä se ulkoistaa kolmannelle osapuolelle (Tziantopoulos ym., 2019).

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että toimitusketjujen digitalisoinnilla (Industry 4.0) tulee olemaan merkittävä rooli toimitusketjujen riskienhallintaan ja resilienssiin. 3D-tulostustuotanto on vain yksi tekijä, joka yhdessä muiden teknologioiden kanssa tulevat mullistamaan teollisuuksia (Ashima ym., 2021). IoT:in ja koneoppimisen avulla valmistusteollisuudet pystyvät automatisoimaan tuotantomenetelmiään sekä asiakashallintaa. 3D-tulostustekniikan ja tulostusmateriaalien kehittyessä,

lisäävä valmistus pystytään skaalaamaan suurempiin valmistusvolyymeihin ja tekniikan saatavuus helpottuu pienemmillekin yrityksille (Armstrong ym., 2021; Ryan ym., 2021).



Kuva 5 Yhteenveto tutkimuksen johtopäätöksistä

Kirjallisuuden perusteella tutkimuksen vastaus tutkimuskysymyksiin on, että lisäävä valmistus mahdollistaa tuotannon räätälöinnin ja hajauttamisen, joka lisää sen joustavuutta ja vähentää riippuvuuksia toimittajista. Toimitusketjun joustavuuden lisääntyminen kasvattaa toimitusketjun reagointikykyä, joka kasvattaa resilienssiä sekä vähentää toimitusketjunriskejä. lisäävän valmistuksen implementointi toimitusketjuun luo myös uusia riskitekijöitä, koska tarvittavat osaamisvaatimukset ja järjestelmät nostavat kustannuksia sekä lisäävät kyberturvariskejä.

Tutkielman ja kirjallisuuden perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että lisäävän valmistuksen tukevan toimitusketjun resilienssiä, mutta ilman kokonaisvaltaista riskienhallintastrategiaa se ei yksinään ratkaise riskienhallinnan ongelmia. Tehokkain tapa hyödyntää 3D-tulostustuotantoa on matalan kysynnän markkinoilla, joissa tarvittavien osien kompleksisuus on ongelma perinteisille tuotantomenetelmille. Lisäävä valmistus ei vielä yksinään korvaa muita tuotantomenetelmiä sen rajallisen valmistuskapasiteetin ja soveltuvuuden takia. Kirjallisuus osoittaa, että lisäävä valmistus on tehokkaimmillaan, kun se täydentää perinteisen tuotantomallin valmistamalla kompleksisia ja uniikkeja osia tai komponentteja (Delic & Evers; Alogla & Lam; Barata; Dilberoglu ja ym.). Tutkielman perusteella voidaan myös todeta, että digitaalisen vallankumouksen myötä toimitusketjujen digitalisoituminen muuttaa riskienhallintatarpeita. Lisäävä valmistus on esimerkki siitä, että yksittäisten teknologioiden kehitys tulee kasvattamaan sen roolia tulevaisuudessa, koska 3D-tulostettujen osien volyyymi kasvaa ja tulostamisen läpimenoaika vähenee.

Tulevaisuuden tutkimuskohteet lisäävän valmistuksen ja toimitusketjun digitalisaation osalta, tulisi mielestäni kohdistua lisäävän valmistuksen konkreettiseen vaikutukseen. Tällä hetkellä mielestäni alasta ei ole riittävästi kattavaa empiiristä tutkimusta, joka tutkisi miten konkreettisesti 3D-tulostustuotanto toimii, kun se korvaa perinteiset tuotantomenetelmät. Ala on haastava, sillä 3D-tulostusteknologia ei ole skaalautunut vielä niin laajalle, että se pystyisi tuotantovolyymissa korvaamaan muut tuotantomallit. Lisäksi tulevaisuudessa tutkimus voisi kohdistua lisäävän valmistuksen rooliin suhteessa muihin Industry 4.0 teknologioihin.

## Lähteet

- ASTM. *Detailed Overview*. Saatavilla osoitteessa. [www.astm.org/about/detailed-overview](http://www.astm.org/about/detailed-overview)
- Aljabhan, B. (2023). Economic strategic plans with supply chain risk management (SCRM) for organizational growth and development. *Alexandria Engineering Journal*, 79, 411-426.
- Aloqlan, F., & Lam, S. S. (2015). Supply chain risk modelling and mitigation. *International Journal of Production Research*, 53(18), 5640-5656.
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 60(5), 677-688.
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E., & Hague, R. (2013). Transparency built-in: Energy consumption and cost estimation for additive manufacturing. *Journal of industrial ecology*, 17(3), 418-431.
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2023). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81, 1060-1067.
- BMW Group, 2018. A million printed components in just ten years: BMW Group makes increasing use of 3D printing. Saatavilla osoitteessa: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0286895EN/a-million-printed-components-in-just-ten-years:-bmw-group-makes-increasing-use-of-3d-printing?language=en>.
- Brusset, X., & Teller, C. (2017). Supply chain capabilities, risks, and resilience. *International journal of production economics*, 184, 59-68.
- Chan, H. K., Griffin, J., Lim, J. J., Zeng, F., & Chiu, A. S. (2018). The impact of 3D Printing Technology on the supply chain: Manufacturing and legal perspectives. *International Journal of Production Economics*, 205, 156-162.
- Chaudhuri, A., Boer, H., & Taran, Y. (2018). Supply chain integration, risk management and manufacturing flexibility. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(3), 690-712.
- Delic, M., & Eysers, D. R. (2020). The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 228, 107689
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 545-554.
- Thomas, D. (2016). Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5), 1857-1876.
- Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6), 1917-1928.
- Frederico, G. F., Garza-Reyes, J. A., Anosike, A., & Kumar, V. (2020). Supply Chain 4.0: concepts, maturity and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*, 25(2), 262-282.

- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Tseng, M. L., Nikbin, D., & Khanfar, A. A. (2025). Industry 4.0 digital transformation and opportunities for supply chain resilience: a comprehensive review and a strategic roadmap. *Production planning & control*, 36(1), 61-91.
- Gupta, S., Bag, S., Modgil, S., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Kumar, A. (2022). Examining the influence of big data analytics and additive manufacturing on supply chain risk control and resilience: An empirical study. *Computers & Industrial Engineering*, 172, 108629.
- Jung, S., Kara, L. B., Nie, Z., Simpson, T. W., & Whitefoot, K. S. (2023). Is additive manufacturing an environmentally and economically preferred alternative for mass production? *Environmental science & technology*, 57(16), 6373-6386.
- Kunovjanek, M., Knofius, N., & Reiner, G. (2022). Additive manufacturing and supply chains—a systematic review. *Production Planning & Control*, 33(13), 1231-1251.
- Logistiikan maailma. *Tuotantomuodot: Tilauksen kohdennuspiste*. Saatavilla osoitteessa: <https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/tilauksen-kohdennuspiste-opp/>
- Martinsuo, M., & Luomaranta, T. (2018). Adopting additive manufacturing in SMEs: exploring the challenges and solutions. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), 937-957.
- Mohammed, A., Jabbour, A. B. L. D. S., & Diabat, A. (2023). COVID-19 pandemic disruption: a matter of building companies' internal and external resilience. *International Journal of Production Research*, 61(8), 2716-2737.
- Momeni, F., Liu, X., & Ni, J. (2017). A review of 4D printing. *Materials & design*, 122, 42-79.
- Nyamekye, P., Golroudbary, S. R., Piili, H., Kraslawski, A., & Luukka, P. (2023). Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6(C), 100112.
- Parvanda, R., & Kala, P. (2023). Trends, opportunities, and challenges in the integration of the additive manufacturing with Industry 4.0. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(3), 587-614.
- Pereira, R., & Dos Santos, N. (2023). Mass Personalization in Industry: An Integrative Review.
- Pettit, T. J., Croxton, K. L., & Fiksel, J. (2019). The evolution of resilience in supply chain management: a retrospective on ensuring supply chain resilience. *Journal of business logistics*, 40(1), 56-65.
- Rad, F. F., Oghazi, P., Palmié, M., Chirumalla, K., Pashkevich, N., Patel, P. C., & Sattari, S. (2022). Industry 4.0 and supply chain performance: A systematic literature review of the benefits, challenges, and critical success factors of 11 core technologies. *Industrial Marketing Management*, 105, 268-293
- Rashid, A., Rasheed, R., Ngah, A. H., Pradeepa Jayaratne, M. D. R., Rahi, S., & Tunio, M. N. (2024). Role of information processing and digital supply chain in supply chain resilience through supply chain risk management. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 17(2), 429-447.
- Salamai, A., Hussain, O. K., Saberi, M., Chang, E., & Hussain, F. K. (2019). Highlighting the importance of considering the impacts of both external and internal risk factors on operational parameters to improve supply chain risk management. *Ieee Access*, 7, 49297-49315.

- Seyed Nezhad Fahim, S. R., & Gholami Gelsefid, F. (2023). The impact of internal and external driving forces and strategic decisions on supply chain risk management (case study: automotive industry). *Journal of applied research on industrial engineering*, 10(3), 472-491.
- Singh, S., Misra, S. C., & Singh, G. (2024). Greening the supply chain: Leveraging additive manufacturing for sustainable risk management. *Business Strategy and the Environment*, 33(8), 8233-8246.
- Sriram, G., & Rambabu, S. (2024). IMPORTANCE OF CYBERSECURITY IN ADDITIVE MANUFACTURING IN THE ERA OF INDUSTRY 4.0. *Int. J. Manuf. Mater. Mech.(IJMMME)*, 2940, 6442.
- Srivastava, M., & Rathee, S. (2022). Additive manufacturing: Recent trends, applications and future outlooks. *Progress in Additive Manufacturing*, 7(2), 261-287.
- Sun, X. (2022). Supply chain risks of critical metals: Sources, propagation, and responses. *Frontiers in Energy Research*, 10, 957884.
- Thomas, D. (2016). Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5), 1857-1876.
- Tziantopoulos, K., Tsolakis, N., Vlachos, D., & Tsironis, L. (2019). Supply chain reconfiguration opportunities arising from additive manufacturing technologies in the digital era. *Production Planning & Control*, 30(7), 510-521.
- Um, J., & Han, N. (2021). Understanding the relationships between global supply chain risk and supply chain resilience: the role of mitigating strategies. *Supply chain management: an international journal*, 26(2), 240-255.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012(1), 208760.
- Zijm, H., Knofius, N., & van der Heijden, M. (2018). Additive manufacturing and its impact on the supply chain. In *Operations, logistics and supply chain management* (pp. 521-543). Cham: Springer International Publishing.

## **Liitteet**

### **Liite 1 Selvitys tekoälyn käytöstä**

Tässä tutkimuksessa tekoälyä on käytetty tutkimuksen rungon ja aihealueiden hahmottelussa. Lisäksi tekoälyä on käytetty palautteenanto välineen sekä kielenkorjaus työkaluna. Kuvan 5 tekemiseen on käytetty Napkin Ai kuviotyökalua.