

# **Tekniikan kandidaatintyö**

## **3D-tulostuksen hyödyntäminen erotus- ja puhdistustekniikoissa**

Lappeenranta 2019

Pinja Nieminen

Lappeenrannan—Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikka

Kandidaatintyö 2019

## **3D-tulostuksen hyödyntäminen erotus- ja puhdistustekniikoissa**

Pinja Nieminen

Työn ohjaajat ja tarkastajat: Prof. Eveliina Repo, Dos. Heidi Piili

## Tiivistelmä

Lappeenrannan—Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikka

Pinja Nieminen

3D-tulostuksen hyödyntäminen erotus- ja puhdistustekniikoissa

Kandidaatintyö

Kevät 2019

52 sivua, 18 kuvaa, 1 taulukko

Työn ohjaajat: Prof. Eveliina Repo, Dos. Heidi Piili

Hakusanat: 3D-tulostus, lisäävä valmistus, erotustekniikka, puhdistustekniikka, vedenpuhdistus, membraani

Työn tavoitteena oli selvittää, millaiset mahdollisuudet 3D-tulostuksella on tulla osaksi erotus- ja puhdistustekniikan prosesseissa käytettävien osien valmistusta. Aiheesta on tehty vasta vähän tutkimuksia ja monissa sovelluksissa lisäävää valmistusta jo käytetäänkin, mutta erotustekniikan alalla se ei vielä ole yleinen menetelmä etenkin yritysten keskuudessa. Tässä kirjallisuuskatsauksessa on tarkasteltu aiheesta tehtyjä tutkimuksia ja pohdittu mahdollisia syitä menetelmän vähäiselle käytölle erotus- ja puhdistustekniikoissa. Myös lisäävän valmistuksen tuomia etuja sekä sen puutteita tarkasteltuihin sovelluksiin on arvioitu. Lähteenä on käytetty tieteellisiä julkaisuja ja yritysten nettisivuja.

Tutkimuksen lopuksi voitiin päätellä, että useat tekijät vaikuttavat yrityksen mahdollisuuksiin ottaa uusi menetelmä osaksi tuotantoaan tai korvata se. Tärkeimpinä tekijöinä lisäävän valmistuksen käytön laajentamiseksi yritysten keskuudessa voidaan pitää tiedon lisäämistä ja erilaisten yhteistyösuhteiden muodostamista.

Tutkimukset osoittavat 3D-tulostuksen potentiaalinen erotusprosesseihin. Aiheesta löytyi paljon hajanaisia tutkimuksia, jotka usein päättyivät toteamukseen lisätutkimuksen tarpeesta. Tämän vuoksi olisikin tärkeää, että jo tutkittuja aiheita tutkittaisiin ja kehitettäisiin edelleen, jotta ne saataisiin kehitettyä käyttökelpoisiksi myös teollisuuden ja yritysten prosesseihin.

# Sisällysluettelo

<b>1. Johdanto</b> .....	<b>5</b>
<b>2. 3D-tulostuksen menetelmät</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Lisävä valmistus ja siihen liittyvät tutkimukset</b> .....	<b>16</b>
3.1 Kiinnostus tutkimukseen .....	16
<b>4. 3D-tulostuksen hyödyntäminen erotustekniikan sovelluksissa</b> .....	<b>17</b>
4.1 Välilevyt .....	17
4.2 Membraanit.....	20
4.3 Turbulenssipromootorit .....	25
4.4 Elektrodit .....	27
4.5 Raskasmetallien poistaminen vedestä.....	29
4.6 3D-tulostettu keräin kullan talteenottoon .....	29
4.7 Biofilmireaktorit .....	31
4.8 Tislaus.....	33
4.9 Kromatografia.....	34
4.10 Tarkastellut sovellukset .....	35
<b>5. Käytettävät materiaalit</b> .....	<b>36</b>
<b>6. 3D-tulostus verrattuna perinteisiin valmistusmetodeihin</b> .....	<b>37</b>
<b>7. Turvallisuus</b> .....	<b>39</b>
<b>8. Menetelmän vähäinen käyttö erotustekniikoissa</b> .....	<b>40</b>
<b>9. 3D-tulostus yritysten keskuudessa</b> .....	<b>41</b>
<b>10. Lisävä valmistuksen integrointi yritysmailmaan</b> .....	<b>45</b>
<b>11. Digitalisaatio ja immateriaalioikeudet</b> .....	<b>46</b>
<b>12. Johtopäätökset</b> .....	<b>47</b>
<b>Lähdeluettelo</b> .....	<b>50</b>

## 1. Johdanto

3D-tulostus on suuri innovaatio jo monilla eri aloilla, kuten lääketieteessä, koulutuksessa ja tekniikassa. Puhdistus- ja erotustekniikassa sen hyödyntäminen on aloitettu vasta viime vuosina. Tällä alalla AM-teknologiaa (additive manufacturing, lisäävä valmistus) on alettu käyttää erityisesti membraanisysteemien valmistuksessa. [1] Etenkin monet yliopistot ovat havainneet 3D-tulostuksen potentiaalin, ja aiheesta tehtyjen tutkimuksien määrä on kasvanut runsaasti viimevuosien aikana.

3D-tulostuksen keskeisimmät tekniikat kehitettiin 1980-luvulla, jonka jälkeen siihen liittyvä tutkimus on lisääntynyt. Menetelmä perustuu siihen, että kappale kootaan kerros kerrokselta tietokonemallin pohjalta kolmiulotteiseksi rakenteeksi. 3D-tulostuksen lisäksi tekniikasta puhutaan erityisesti lisäävänä valmistuksena, jolla viitataan teolliseen valmistamiseen. Etenkin rakenteeltaan erikoiset, tilaustyönä tehtävät komponentit ovat edullisempia valmistaa 3D-tulostuksella kuin perinteisellä valmistuksella. [2]

Lisäävän valmistuksen käytössä on otettava huomioon erilaisia prosessiparametrejä. Suurimpia ongelmia 3D-tulostuksessa aiheuttavat resoluutio ja valmistusnopeus, joita molempia tulisi parantaa, jotta valmistusmetodia voitaisiin hyödyntää laajemmin esimerkiksi erotustekniikassa. Muita huomioon otettavia tekijöitä ovat prosessin hinta, tuotannon nopeus, valmistetun objektin vahvuus sekä laatu ja pinnan lopputulos. [3]

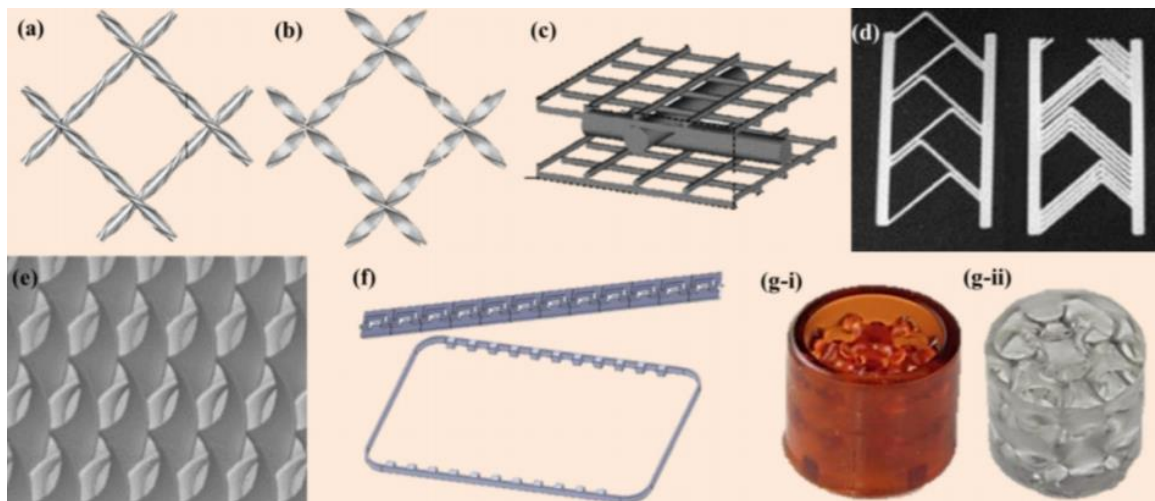
Usein pohditaan sitä, kuinka 3D-tulostuksesta saataisiin kilpailukykyinen perinteisten valmistusmetodien kanssa. Tällä hetkellä eikä lähitulevaisuudessa 3D-tulostus ei ole syrjäyttämässä perinteisiä valmistusmetodeja. Jos komponentin valmistaminen onnistuu helposti perinteisillä menetelmillä, ei lisäävän valmistuksen käytölle edes ole tarvetta. Geometrista tarkkuutta vaativissa monimutkaisia geometrioita sisältävissä sovelluksissa 3D-tulostus kuitenkin on jo perinteisiä valmistusmetodeja käyttökelpoisempi menetelmä. [4] Tarve 3D-tulostuksen käytölle tulee esille tilanteissa, joissa tuotteelle halutaan ominaisuuksia, joita ei voida saada aikaan perinteisellä valmistuksella. Tutkimuksen ja kehityksen avulla lisäävä valmistus voisi tarjota myös useille erotustekniikan sovelluksille uuden, vähemmän rajoitetun ja tuotteen funktioita lisäävän valmistustavan.

Erotus- ja puhdistustekniikassa hyödynnetään erilaisia välilevyjä sekä membraaneja, joiden geometrista rakennetta optimoimalla pystytään vaikuttamaan niiden ominaisuuksiin ja suorituskykyyn. Erilaisilla geometrioilla voi siten olla suora vaikutus prosessin kustannus- ja energiatehokkuuteen. Näissä sovelluksissa 3D-tulostuksen hyödyntäminen monimutkaisten

geometrinen rakenteiden valmistukseen on todettu hyödylliseksi. Erityisesti monikerroksiset membraanit ja niihin lisättävät säikeet parantavat välilevyn suorituskykyä. [5]

Juuri tämänkaltaisten osien valmistukseen 3D-tulostus on erinomainen menetelmä, ja sen hyödyntämistä näissä sovelluksissa kannattaisi lisätä.

Kuvassa 1 on esitetty 3D-tulostuksen avulla eri tutkimuksissa valmistettuja membraaneja ja välilevyjä. Näissä osissa on hyödynnetty juuri lisäävän valmistuksen kykyä luoda erilaisia geometrioita. [5]



Kuva 1 Kohdassa (a) on esitetty muunneltu filamenttivililevy, kohdassa (b) kierteinen välilevy ja kohdassa (c) monikerroksinen välilevy. Kohdassa (d) on kuvattu porrastetut kalanruotokuvioiset välilevyt, (e) on mikrorakenteinen välilevy ja (f) on staattinen sekoitusvälilevy. (g-i) on tulostettua kanavaa ja (g-ii) valettua membraania. [5]

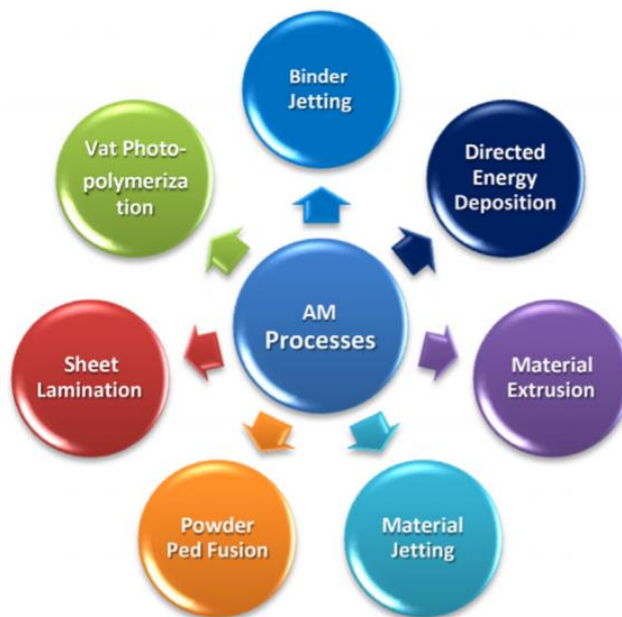
3D-tulostus ei myöskään ole monille yrityksille kovin tuttu menetelmä, eikä niillä välttämättä ole oikeanlaista tietoa siitä. Tämän takia yritysten kouluttaminen on tärkeä osa 3D-tulostuksen saamista laajempaan käyttöön. [6] Se, ettei 3D-tulostusta vielä hyödynnetä laajasti erotus- ja puhdistustekniikoissa, voi johtua monesta eri tekijästä. Suurimpia näistä voivat olla tiedon puute, vääränlaiset ennakkoluulot sekä menetelmän rajoitteet etenkin käytettävien materiaalien suhteen.

Tämän työn tavoitteena on tarkastella 3D-tulostusta erilaisissa erotus- ja puhdistustekniikoissa sekä pohtia sen etuja ja haittoja esitetyissä sovelluksissa. Työssä pohditaan myös mihin erotusmenetelmiin 3D-tulostuksella on suurin hyödyntämispotentiaali sekä mitkä ovat menetelmän rajoitteet esitetyissä sovelluksissa. Tutkimusten pohjalta on tarkoitus arvioida 3D-tulostuksen eli lisäävän valmistuksen tulevaisuutta erotus- ja puhdistustekniikoissa sekä luoda yleinen katsaus siitä, minkälaisia tutkimuksia aiheesta on jo tehty.

## 2. 3D-tulostuksen metodit

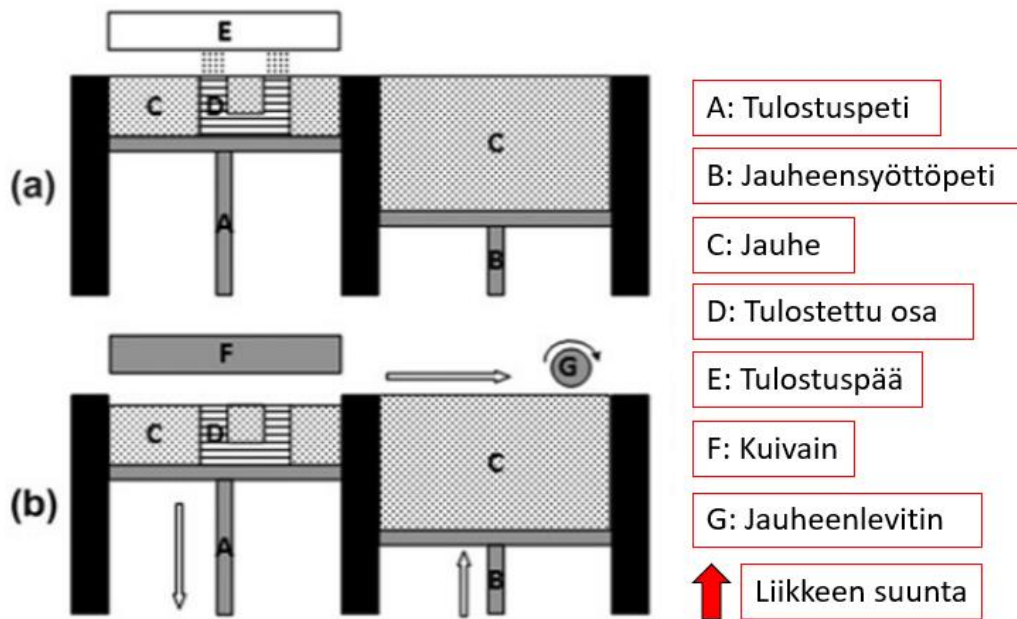
ASTM (American Society for Testing and Materials) luokittelee lisäävän valmistuksen metodit seitsemään kategoriaan. Nämä kategoriat ovat 1. Sideaineen suihkutus (Binder jetting), 2. Suorakerrostus (Direct energy deposition), 3. Materiaalin pursotus (Material extrusion), 4. Materiaalin suihkutus (Material jetting), 5. Jauhepetisulatus (Powder bed fusion), 6. Kerroslaminointi (Sheet lamination) ja 7. Valokovetus altaassa (Vat photopolymerization). [3]

Kuvassa 2 on esitetty lisäävän valmistuksen seitsemän eri prosessia ASTM-standardien mukaisesti [3]. Menetelmistä voidaan tilannekohtaisesti valita valmistukseen sopivin vaihtoehto. Valmistusmenetelmään valintaan vaikuttavat mm. syöttömateriaalin ominaisuudet sekä lopputuotteen vaatimukset. Nämä 7 menetelmää sisältävät vielä useita eri variaatioita kyseisestä valmistusmenetelmästä. Laitteistoja on monia erilaisia, aina halvoista kuluttajatulostimista vaativampiin teollisuustulostimiin.



Kuva 2 Lisäävän valmistuksen luokittelu sen eri menetelmiin. [3]

Sideaineen suihkutusta (binder jetting) toteutetaan systeemissä, joka koostuu tulostuspedistä, syöttöpedistä, telasta, kuivausyksiköstä ja tulostuspäästä. Lyhyesti tulostus tapahtuu siinä siten, että tulostuspää suihkuttaa sideainetta jauhemaiseen materiaaliin viipaloidun datan mukaisesti. Tämän jälkeen liiallinen sideaine kerroksesta poistetaan elektronisen infrapunalämmittimen avulla. Tätä ominaisuutta ei kuitenkaan ole käytettävissä kaikissa sideaineen suihkutuksen tekniikoissa. Prosessi jatkuu siten, että tulostuspeti laskeutuu ja syöttöpeti nousee ylös. Uuden syöttömateriaalin tultua prosessiin jauheenlevitin levittää sen tasaiseksi kerrokseksi jo tulostetun kerroksen päälle. Kerroksia lisätään, kunnes valmistettava kappale on vaaditun mukainen. Kuvassa 3 on esitetty esimerkki sideaineen suihkutuksen toimintaperiaatteesta. Myös muunlaiset variaatiot samasta valmistusmenetelmästä ovat mahdollisia. [7]



Kuva 3 Sideaineen suihkutusta (binder jetting) -menetelmän toimintaperiaate. Kohta (a) on tulostusvaihe ja (b) kuivuminen ja levittäminen. [7, muokattu]

Sideaineen suihkutuksella lisäävän valmistuksen metodina on monia positiivisia piirteitä. Tulostuksen nopeus on hyvä, kustannukset ovat suhteellisen alhaiset ja rakentamisen tilavuus on suuri. Lisäksi menetelmä antaa hyvät valmiudet toteuttaa geometriselta rakenteeltaan lähes minkälaisia kappaleita tahansa.

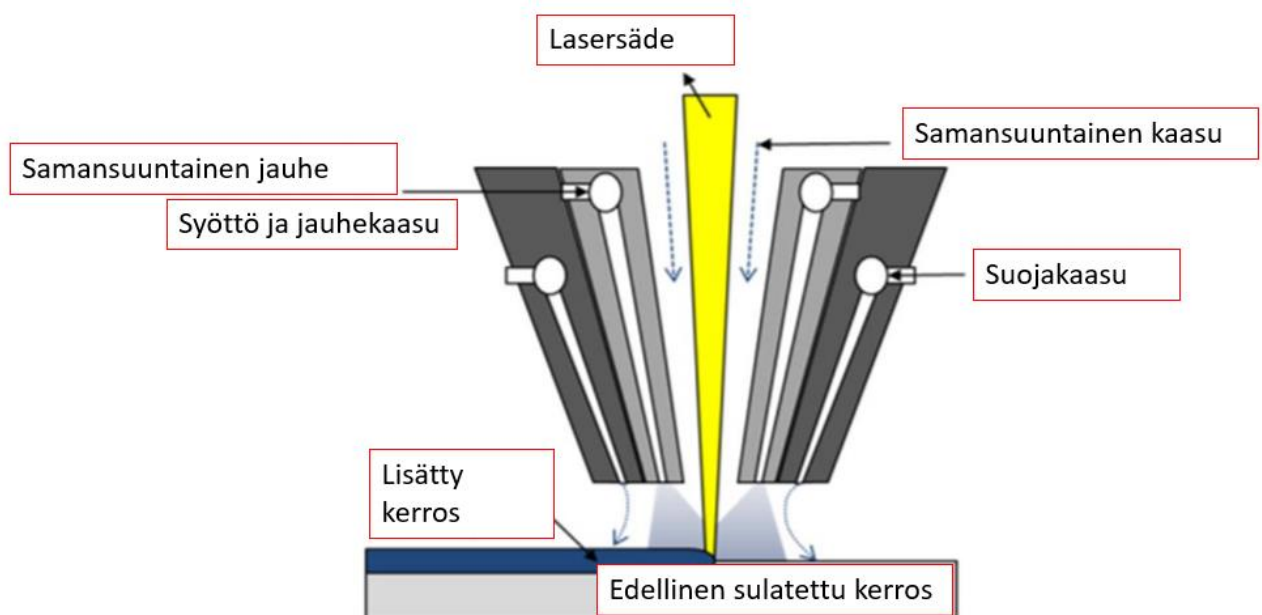


Mahdollisia käyttömateriaaleja sideaineen suihkutukseen löytyy laajalti. Syöttömateriaaleina voidaan käyttää esimerkiksi metalleja, keraameja, hiekkaa, zirkonia tai kromiittia. Käyttömateriaaliksi soveltuu myös teräs, jolla on erityisen hyvät mekaaniset ominaisuudet. Tämä tekee siitä hyvän tulostusmateriaalin teollisuuteen. Vaikka menetelmä on kehitetty 1990-luvulla, se kaupallistettiin vasta vuonna 2010. [3] Etenkin verrattuna perinteisiin valmistusmetodeihin, on tämä menetelmä vielä hyvin uusi. Suurimpana haittapuolena voidaan kuitenkin pitää sitä, että valmistusmenetelmä on monivaiheinen: valmistettu kappale on lähes aina jälkiuunitettava. Tämä pidentää valmistusaikaa ja lisää vaadittavan työn määrää. Valmistustekniikan voidaankin olettaa edelleen kehittyvän, jolloin myös sen käyttömahdollisuudet laajenevat.

Suorakerrostus (direct energy deposition) on menetelmä, jossa metallijauheita- tai lankoja sulatetaan kerros kerrokselta laserpinnoituksen kaltaisella prosessilla, usein lasersäteen avulla. Menetelmän mukaan myös muita lämpölähteitä voidaan hyödyntää. Valmistusmetodi hyödyntää laserteknologian lisäksi robotiikkaa, tietokonesuunnittelua ja erilaisia sensoreita. Lasersäteen lämpö sulattaa metallin, jonka jälkeen sitä voidaan lisätä kerroksittain. [8] Suorakerrostuksessa lisätyt kerrokset ovat suhteellisen paksuja, jonka takia tulosteena saadaan melko karkeita kappaleita. Ne on myös koneistettava lopullisiin mittoihinsa. [9] Käytetyn metallijauheen määrä vaikuttaa tulostetun osan resoluutioon [3]. Myös käytetyllä energialähteellä, esimerkiksi laserilla, on vaikutusta resoluutioon [8].

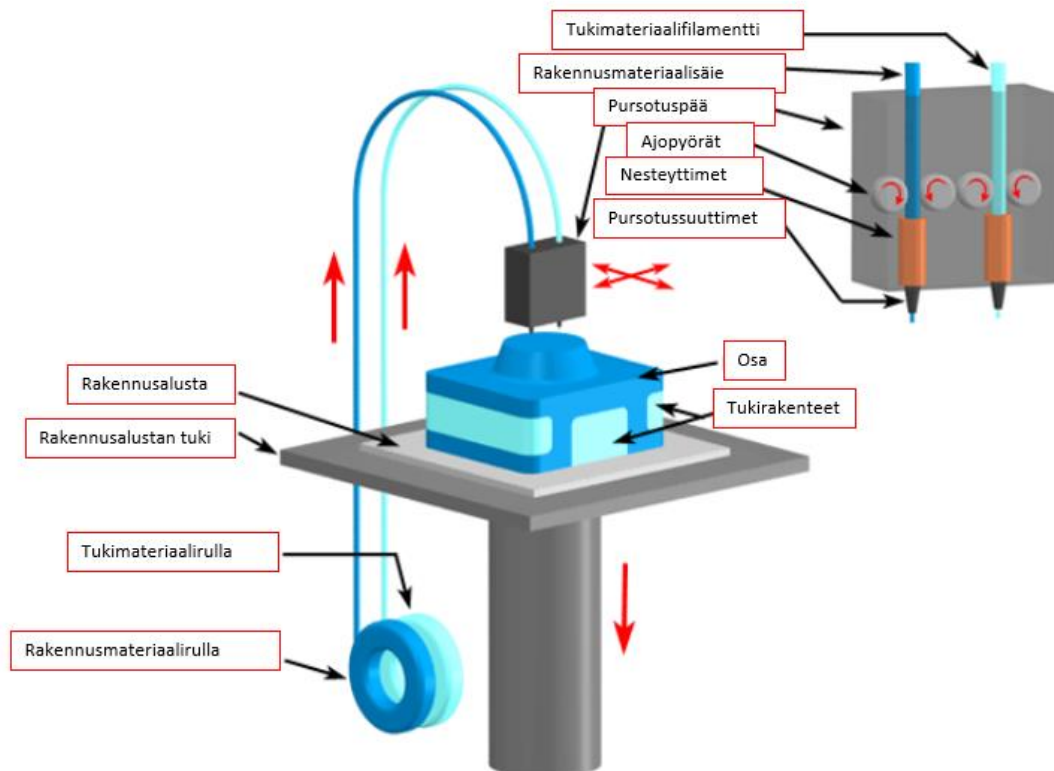
Suorakerrostuksella on erityisen hyvät käyttömahdollisuudet materiaalien prosessoinnissa. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi prototyyppien valmistukseen ja metallipinnoitteiden lisäämiseen. Menetelmää voidaan jo käyttää suurenkin mittakaavan tuotannossa. Tämä osoittaa sen potentiaalın valmistaa prototyyppien lisäksi käyttöön tulevia lopullisia komponentteja. Suorakerrostukseen liittyy useita eri parametreja, jotka vaikuttavat lopputuotteen ominaisuuksiin. Esimerkiksi jauheen syöttönopeudella ja käytetyn lasersäteen teholla molemmilla on merkitystä lopputuotteeseen. [8]

Suorakerrostuslaitteiston keskellä on esimerkiksi lasersäde, jonka avulla lämmitys tapahtuu. Myös muiden lämpölähteiden, kuten elektronisuihkun, käyttäminen on mahdollista. Lämmitettävä alue absorboi energiaa lasersäteestä, jolloin substraattiin muodostuu sula-allas. Metallijauhetta syötetään samanaikaisesti tähän altaaseen, jossa se sulaa. Tämä saa edellisen sulatetun kerroksen ja syötetyn aineen kiinnittymään toisiinsa. Menetelmällä rakennettavien osien kokoaminen tapahtuu kerros kerrokselta. Kuvassa 4 on esitetty yhden mahdollisen suorakerrostuslaitteiston osat ja toimintaperiaate. Samalla menetelmällä on olemassa myös muunlaisia kokoonpanoja, joilla tulostus voidaan toteuttaa. [10]



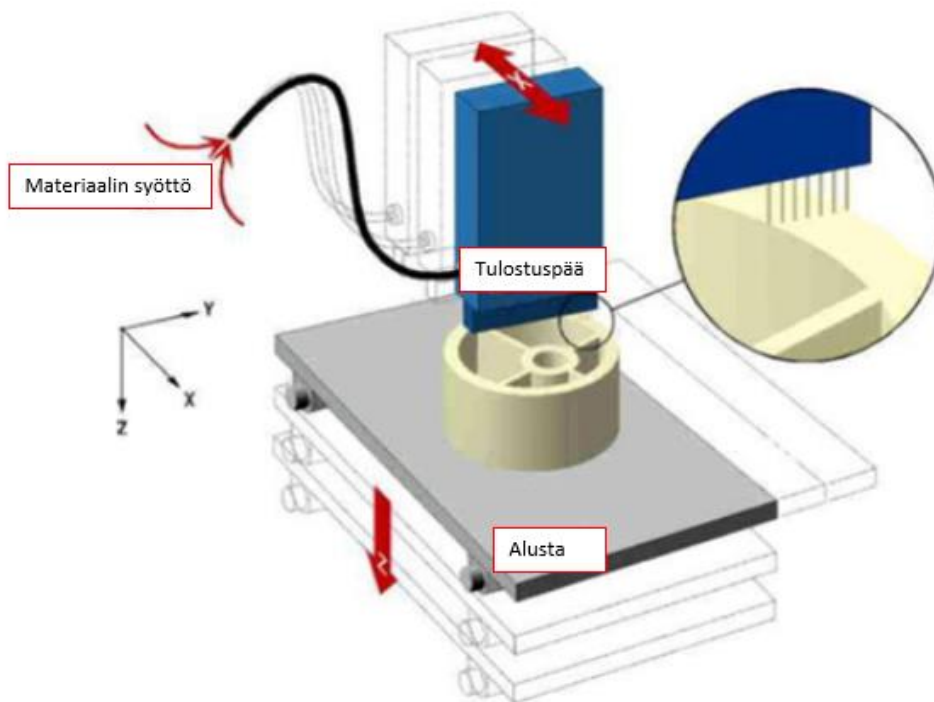
Kuva 4 Suorakerrostus (direct energy deposition) - prosessin toimintaperiaate. [10, muokattu]

Materiaalin pursotus (material extrusion) on menetelmä, jossa tulostettava materiaali työnnetään suuttimen läpi sopivan paineen avulla. Pursotettu materiaali jää tietyllä nopeudella edelliseen sulatettuun kerrokseen. Tullessaan ulos suuttimesta ja jäähtyttyään se kiinnittyy edelliseen kerrokseen. Valmistuksessa tulevan materiaalin on sitouduttava edelliseen sulatettuun kerrokseen, jotta kiinteä osa voi muodostua. [3] Kuvassa 5 on esitetty esimerkki materiaalin pursotuksessa käytettävästä laitteistosta ja sen toiminnasta. [11]



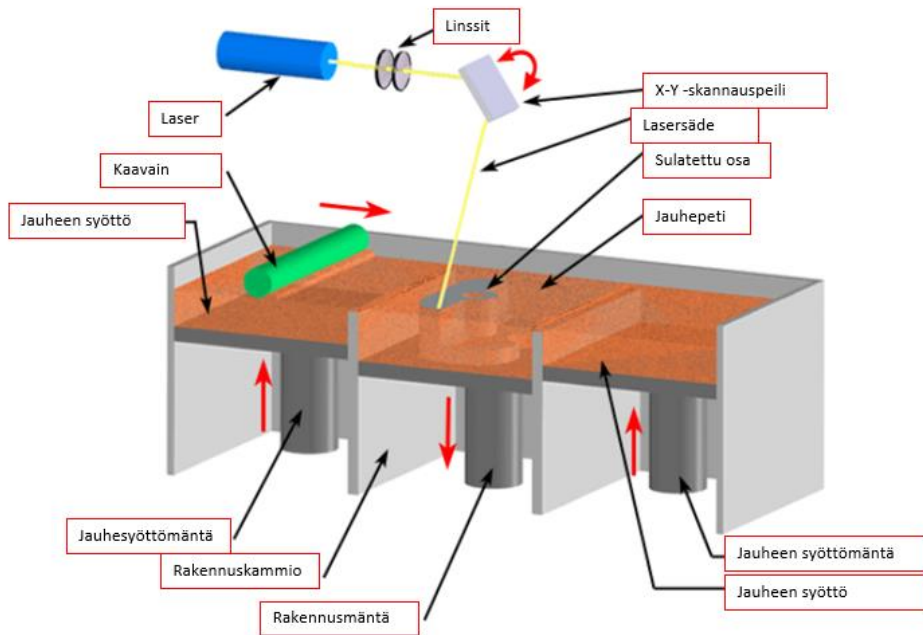
Kuva 5 Materiaalin pursotus ja sen toimintaperiaate. [11, muokattu]

Materiaalin suihkutus (material jetting) – menetelmä perustuu nestepisaroiden kiinteytymiseen. Käytettävää materiaalia suihkutetaan alustalle nestemäisinä pisaroina, jolloin ne saavat edellisen kerroksen pehmenemään. Prosessin aikana nämä kovettuvat aina yhdeksi kappaleeksi, ja näin objekti saadaan valmistettua tarvittava määrä kerroksia lisäämällä. [3] Kuvassa 6 on esitetty yksi mahdollisuus materiaalin suihkutuksessa käytettävästä laitteistosta ja sen toimintaperiaatteesta [11].



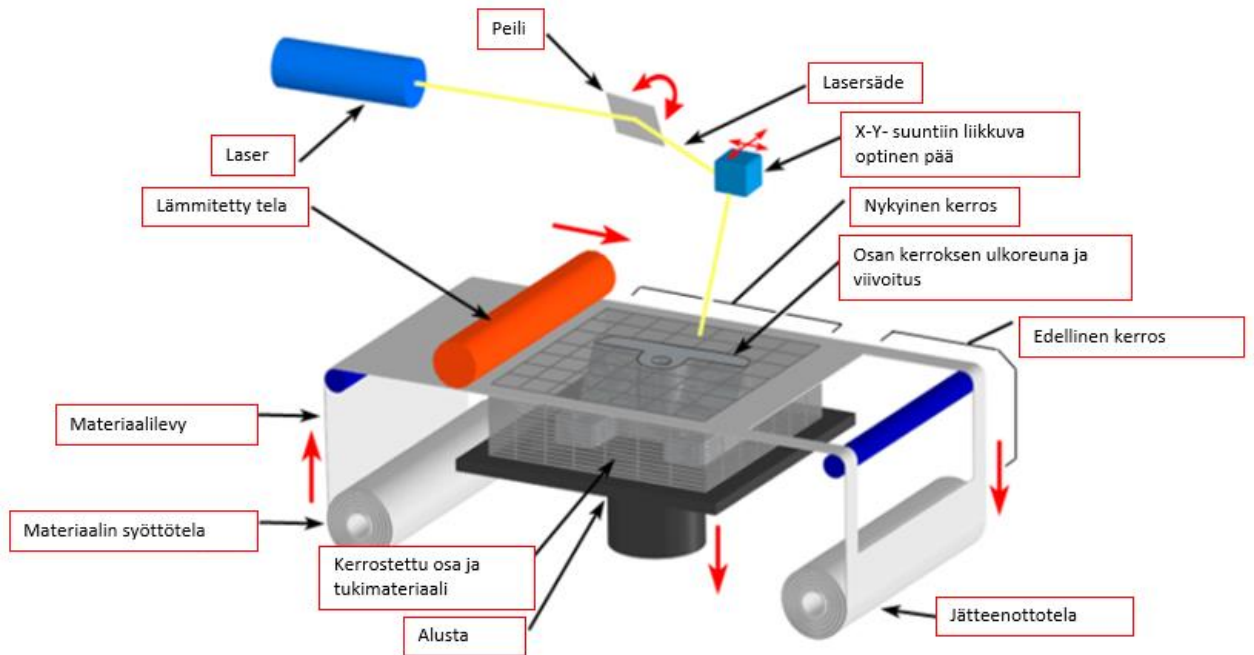
Kuva 6 Materiaalin suihkutus. [11, muokattu]

Jauhepetisulatus (powder bed fusion) käyttää lämpölähteenään esimerkiksi lasersädettä. Menetelmässä pediksi levitettyä jauhetta sulatetaan lasersäteen avulla, jotta partikkelit saataisiin kokonaan sulautumaan yhteen. Tämän jälkeen kaavaimella levitetään uusi kerros jauhetta. [3] Kuva 7 havainnollistaa yhtä mahdollisuutta jauhepetisulatuksen toiminnasta, ja siitä näkyy laitteiston eri osat. [11]



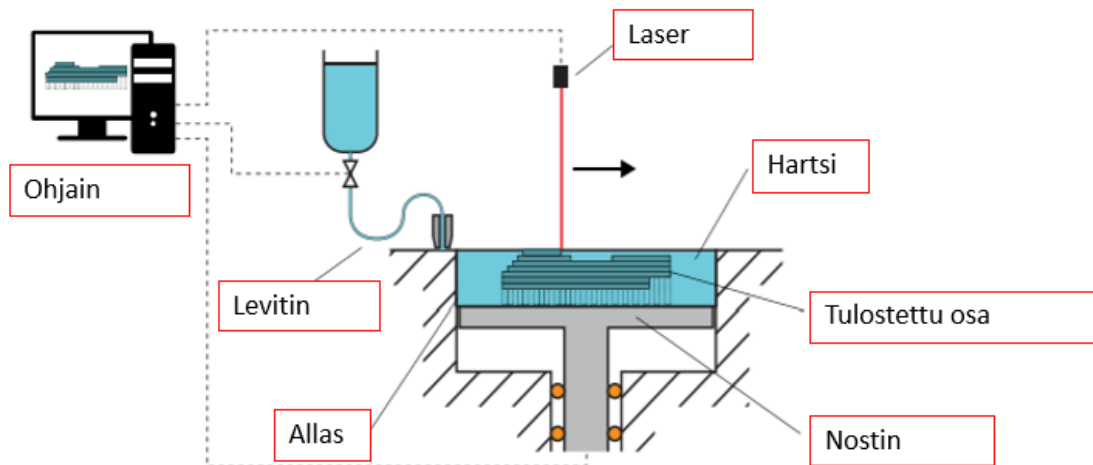
Kuva 7 Esimerkki jauhepetisulatuksessa käytettävästä laitteistosta. Mahdollisille kokoonpanoille on useita eri vaihtoehtoja. [11, muokattu]

Kerroslaminoinnissa (Sheet Lamination) materiaaleja leikataan ja yhdistetään eri tekniikoiden avulla. Menetelmä hyödyntää esimerkiksi lasersädettä erottaessaan kerroksia toisistaan ja ultraääntä yhdistäessään niitä. [3] Kuvassa 8 on esitetty yksi esimerkki kerroslaminoinnin toimintaperiaatteesta. Nuolet osoittavat liikkeen suunnan. [11]



Kuva 8 Kerroslaminointi ja siinä käytettävä laitteisto. [11, muokattu]

Valokovetus altaassa (Vat Photopolymerization) on menetelmä, jossa valokovettuvia hartseja kovetetaan aiheuttamalla kemiallinen reaktio laservalon avulla. Tapahtuva kemiallinen reaktio on fotopolymeerointi. [3] Valokovetusprosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, jotka ovat esiprosessointi, uudelleenpäällystäminen sekä fotopolymeerointi. Esiprosessointi on oleellinen osa prosessikokonaisuutta, sillä siinä koneelle syötetään halutun objektin geometria. Valokovetusprosessin lähtöaineena käytetään valmiita kaupallisia hartseja, joista työstetään lopullinen objekti. Kuvassa 9 on esitetty tyypillisen keraamien valokovetuksessa käytettävän systeemin rakenne. [12] Materiaalimahdollisuuksia on monia, ja keraamin tulostaminen on vain yksi esimerkki siitä, mitä kaikkea menetelmän avulla voidaan tulostaa.



Kuva 9 Valokovetusprosessin laitteisto keraameja kovetettaessa. Tässä laitteistossa lasersäde toimii valonlähteenä lämmityksen sijaan. [12, muokattu]

### **3. Lisäävä valmistus ja siihen liittyvät tutkimukset**

Eri erotustekniikan osa-alueilla lisäävän valmistuksen hyödyntämistä on tutkittu vaihtelevin määrin. Toisista sovelluksista, kuten esimerkiksi membraanisysteemeistä, tutkimuksia on tehty jo huomattava määrä. Usein tutkimukset kohdistuvat johonkin tiettyyn sovellukseen tietyissä olosuhteissa, jolloin yhden tutkimuksen perusteella ei voida tehdä lopullisia johtopäätöksiä lisäävän valmistuksen soveltuvuudesta kyseiseen käyttötarkoitukseen. Yksittäiset tutkimukset pystyvät kuitenkin osoittamaan potentiaalin ja kehityskelpoisuuden, joka useissa tutkimuksissa onkin tullut ilmi. Lisäävän valmistuksen käyttöä tutkitaankin jo laajalti monissa erotustekniikan sovelluksissa, ja sen avulla pyritään löytämään ratkaisuja useisiin globaaleihin ongelmiin.

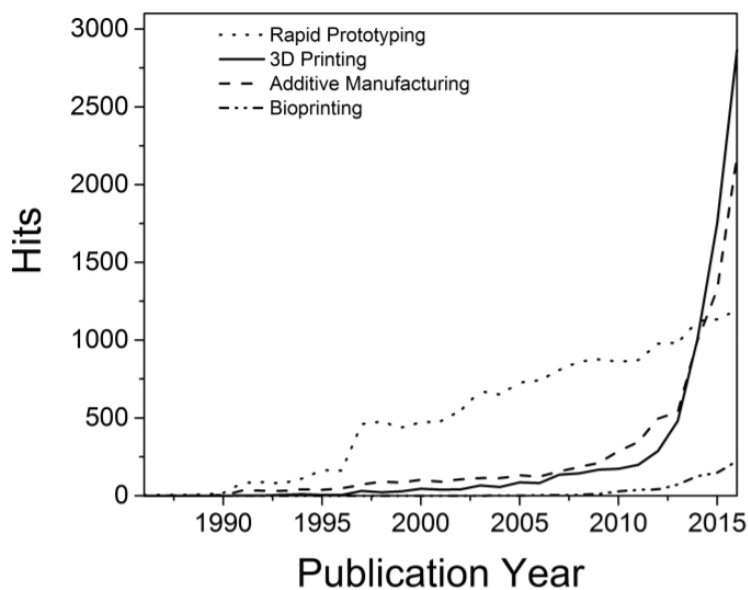
#### **3.1 Kiinnostus tutkimukseen**

3D-tulostus on valmistusmenetelmänä suhteellinen uusi, ja läheskään kaikilla tieteenaloilla sitä ei hyödynnetä. Syitä tähän voi olla esimerkiksi se, ettei menetelmän käytölle nähdä tarvetta alalla tai sitä ei osata soveltaa sinne. Tällä hetkellä tiedonpuute sekä konkreettisten esimerkkien vähäinen määrä vaikuttaa paljon siihen, että menetelmä on niin vähän tutkittu ja käytetty juuri esimerkiksi erotustekniikan alalla. Tutkimuksien lisääntyessä menetelmään liittyvät rajoitteet saattavat vähentyä, jolloin siitä tulee entistä yleisempi ja laajemmilla sovellusaloilla käytetty metodi.

Kiinnostus lisäävään valmistukseen ja siihen liittyviin tutkimuksiin on noussut erittäin voimakkaasti viime vuosien aikana. Kuvassa 10 on esitetty, kuinka 3D-tulostukseen liittyvien julkaistujen tutkimusten määrä on lisääntynyt vuosien aikana. 2010-luvun aikana tutkimusten määrä on lähtenyt huimaan nousuun, jolloin mahdollisesti myös menetelmien eri käyttökohteet, sovellukset ja teknologiat kehittyvät ja laajenevat. 3D-tulostusta on myös selkeästi alettu ajattelemaan potentiaalisena valmistusmenetelmänä itse lopputuotteelle, sen sijaan että sitä käytettäisiin vain prototyyppien tekemiseen. [13]



Tämänhetkisillä monimateriaalisilla sulatetun laskeuman mallinnustulostimilla (MM-FDM) voidaan jo tuottaa kappaleita, joiden alueiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Kappaleen eri kohdissa voi olla esimerkiksi erilainen huokoisuus tai vahvuus. Erotustekniikan alueella huomattavaa kiinnostusta löytyy myös siihen, että selektiivisten tai kontrolloitujen huokoisuuksien mahdollistavien materiaalien tulostus tulisi jonain päivänä mahdolliseksi. Tähän sisältyisi myös passiiviset ja aktiiviset integroidut membraanit. [14]



Kuva 10 3D-tulostukseen liittyvien tutkimusten määrä eri vuosina. [13]

## 4. 3D-tulostuksen hyödyntäminen erotustekniikan sovelluksissa

### 4.1 Välilevyt

Välilevyt ovat tärkeässä asemassa erotustekniikassa. Ne ohjaavat syötetyn seoksen sekoittumista ja kierrätystä prosessissa. Erotuksen kannalta on tärkeää, että sekoittuminen on tehokasta, sillä tällä on suora vaikutus esimerkiksi rajakerroksen paksuuteen. Kun rajakerroksesta saadaan mahdollisimman ohut, polarisaatiovaikutus vähenee aineensiirron parantuessa. Hyvän välilevyn tulee täyttää tietyt vaatimukset. Ensinnäkin, sen tulee edistää virtausta ja tarjota mekaanista tukea. Lisäksi välilevyn tulee olla kosketuksissa membraanin kanssa mahdollisimman vähän, jotta varjoefektiltä voidaan välttyä. Sen tulisi myös estää vahinkojen syntyminen membraanin hylkimiskerrokseen. [5]

Välilevyillä on suuri vaikutus membraanimoduulien hydrodynaamisiin olosuhteisiin. Tämän takia tutkijat ovat alkaneet selvittämään mitkä kaikki tekijät välilevyn rakenteessa vaikuttavat massansiirtoon. Myös paineen alenemaa kanavassa on tutkittu. Näiden molempien tekijöiden sekä välilevyn geometrinen ominaisuuksien tuntemisen avulla pystytään arvioimaan välilevyn suorituskykyä. [5]

Aikaisemmin tutkijoilla on ollut haasteita tutkia välilevyjen geometrisen rakenteen vaikutusta sen suorituskykyyn, sillä perinteisellä valmistuksella tarkkojen ja haastavien rakenteiden luominen ei ole mahdollista. 3D-tulostus tarjoaa kuitenkin mahdollisuuden uudenlaisten välilevyjen valmistamiseen ilman rajoitteita. Ensimmäiset 3D-tulostetut välilevyt valmistettiin vuonna 2004, hyödyntäen jauhepetisulatusta. [5]

Lee et al. ovat tutkineet esimerkiksi sitä, miten 3D-tulostetut monikerroksiset, kierreharjalliset ja kierretyn nauhan omaavat välilevyt toimivat verrattuna sellaisiin välilevyihin, joita ei ole kudottu. Tutkimuksen perusteella pystyttiin toteamaan, että nämä kudotut välilevyt, joissa oli useita kerroksia, joista keskimmaisessä oli kierrettyjä teippisäikeitä, käyttivät vain 40% siitä energiasta, jonka ei-kudotut välilevyt käyttävät. Myös Sherwoodin luvun tällä samalla välilevyllä havaittiin olevan 30% korkeampi kuin ei-kudotulla välilevyllä. Suurin rajoite 3D-tulostuksen hyödyntämiseen välilevyjen valmistukseen on se, että menetelmä ei pysty valmistamaan huokosrakenteita, joiden kokoluokka on nanometreissä. [5]

Vaikka tutkimuksessa saatiin hyvin lupaavia tuloksia, paljon kehitystä on kuitenkin tapahduttava ennen lisäävän valmistuksen käyttöä suuremmassa tuotannossa. Tällä hetkellä materiaalit ovat hyvin kalliita, mikä voisi aiheuttaa taloudellisia rajoitteita valmistettaessa välilevyjä 3D-tulostuksella. Etenkään yritykset eivät usein ole valmiita vaihtamaan tuotantomenetelmiään nykyisten kanssa samanhintaisiin tai kalliimpiin vaihtoehtoihin. [5]

Mikrofiltraatio, ultrafiltraatio ja käänteisosmoosi ovat erotusmenetelmiä, jotka ovat kaikki alttiita likaantumiselle. 3D-tulostuksella on lähdetty muokkaamaan välilevyjen geometriaa, koska on tutkittu, että biologinen likaantuminen on membraanien sijaan välilevyihin liittyvää. Sreedhar et al. tulostivat tutkimuksessaan ensimmäistä kertaa 3D-tulostuksella (muovien jauhepetisulatus) TPMS- muotoihin perustuvia välilevyjä. Tulostusmateriaalina käytettiin PA220 Black jauhetta, joka on polyamidia. Näitä välilevyjä testattiin ultrafiltraatio- ja käänteisosmoosiprosesseissa osoittaen niiden käyttökelpoisuus prosesseissa, joissa ajavana voimana on paine. [15]

TPMS on lyhenne sanoista triply periodic minimal surface. Tällä tarkoitetaan siis sellaista mallia, joka voidaan suunnitella kolmessa ulottuvuudessa ja keskimääräinen kaarevuus on nolla jokaisessa pinnan kohdassa. Tällaisen pinnan muodon tulisi esimerkiksi vähentää painehäviötä kanavassa verrattuna kaupallisiin välilevyihin. Tutkimuksissa havaittiin, että TPMS-suunnitellut 3D-tulostetut välilevyt eivät keränneet biokasvustoa kohtiin, joissa ne eivät olleet kosketuksissa membraanin kanssa. Tämän voitiin päätellä johtuvan TPMS- suunnitellun välilevyn turbulenssia parantavasta vaikutuksesta. 3D-tulostus pystyy noudattamaan tarkkoja TPMS- muotoja, vaikkakin tulostetun membraanin paksuus oli n. 2% korkeampi kuin tietokone malliin syötetty paksuus. [15]

Tämä sovellus vaatii vielä jonkin verran kehittämistä ennen kaupallista hyödyntämistä. Lisäksi on tutkittava, mikä olisi paras mahdollinen geometria välilevylle. Tuotanto 3D-tulostuksella on edelleen liian kallista teollisuudelle. Se kuitenkin vähentäisi etenkin käänteisosmoosiprosessissa esikäsittelyyn tarvittavien kemikaalien määrää. Tällöin prosessin ympäristövaikutuksia saataisiin parannettua huomattavasti. [15] Ympäristöhyödyn lisäksi kemikaalien käytön vähentäminen toisi myös taloudellisen edun, sillä välttyttäisiin kemikaalien ostolta ja erilaisilta puhdistuskustannuksilta. Myös turvallisuus paranee vaarallisten kemikaalien käytön vähentyessä.

Tutkimuksissa yhteisenä teemana voidaan havaita nykyisten laitteiden optimointi sekä ominaisuuksia parantavat uudet geometriat. Koeolosuhteiden mittakaavassa jokainen tarkasteltu tutkimus osoitti lisäävällä valmistuksella tuotetun komponentin tarjoavan jotain aikaisempaa parempaa kyseiseen erotusprosessiin. On siis tärkeä pohtia teoreettisesti kaikkia niitä ilmiöitä, joita erotusprosessin aikana tapahtuu. Tällöin asiaan voidaan vaikuttaa juuri siihen kohdistetulla ratkaisulla, esimerkiksi turbulenssin luominen likaantumisen vähentämiseksi.

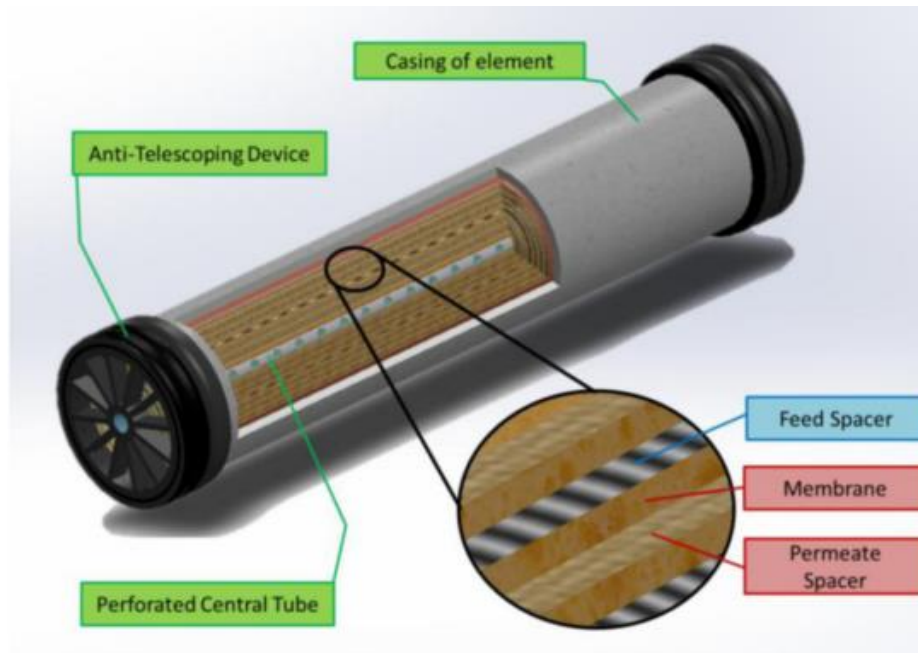
## 4.2 Membraanit

Membraaneilla on erotus- ja puhdistustekniikoissa useita eri käyttötarkoituksia. Ioninvaihtomembraaneja käytetään mm. vedenpuhdistuksessa, polttoainekennoissa, raskasmetallien poistamisessa sekä suolan poistossa. 3D-tulostuksella perinteisen membraanin kaksiulotteisen rakenteen sijaan pystytään luomaan erilaisia kuvioita membraanin pinnalle, jolloin siitä tulee kolmiulotteinen. Näiden rakenteiden on erityisesti havaittu vähentävän likaantumista ja parantamaan ioninsiirtoa. [16]

Rakenteeltaan yksinkertaisten membraanien valmistus sujuu hyvin myös perinteisillä valmistusmetodeilla. Jos komponentin geometria on monimutkainen, se tuo haasteita ja rajoitteita valmistukseen. Membraaneista erityisesti spiraali-, kuitu- ja kehysmoduulit ovat osoittautuneet haastaviksi perinteisillä valmistusmetodeilla tehtäviksi. Näistä komponenteista on vaikea saada suorituskyvyltään oikeanlaisia, johtuen juuri valmistusmenetelmien rajoittavuudesta ja komponenttien monimutkaisesta rakenteesta. [5]

3D-tulostuksen käyttö ja soveltaminen membraanitekniikassa on aloitettu vasta viime vuosina. Sen avulla pystytään vaikuttamaan membraanin erotusominaisuuksiin, jotka voidaan ennen tulostusta tarkasti määrittää. Lisävä valmistus mahdollistaa eri tyyppisten, muotoisten ja tyylisten membraanien tuottamisen. Tällä metodilla valmistuen membraaneista saadaan aikaisempaa tarkempia ja yksityiskohtaisempia. [1]

Lisäväällä valmistuksella on vielä jonkin verran rajoitteita eri osien valmistukseen. Kuvassa 11 on esitetty, kuinka haastavaa eri membraanimoduulien komponenttien tuottaminen lisäväällä valmistuksella on tällä hetkellä. Kuvan värikoodien mukaisesti nähdään, että AM-tekniikalla helposti saadaan valmistettua mm. keskiosan reiällinen putki ja elementin pinta. Membraanien valmistaminen tuottaa vielä jonkin verran ongelmia käytössä olevan tekniikan puolesta. [5] Siksi onkin järkevintä tulostaa vain niitä osia, jotka on haastava tuottaa perinteisillä valmistusmetodeilla. Esimerkiksi tavallista membraania ei ole järkevää 3D-tulostaa, ja sen valmistaminen perinteisten menetelmien avulla onnistuu hyvin. 3D-tulostusta kannattaa ajatella ratkaisuksi ongelmiin, joita perinteisessä valmistuksessa vielä on. Näitä ovat nimenomaan pienet, tarkkuutta vaativat osat.



Kuva 11 Membraanimoduulin eri komponenttien valmistuksen haasteellisuus tämänhetkisellä AM-teknologiolla. Punaisella taustalla olevat osat on vaikea valmistaa, sinisellä keskivaikea ja vihreällä helppo. [5]

Lisäväällä valmistuksella on tällä hetkellä jo monia sovelluksia, joihin perinteinen valmistus ei kykene. Membraanimoduuleihin 3D-tulostuksella pystytään luomaan kuiturakenteita, jotka eivät muuten ole mahdollisia. Näitä ovat mm. ontto-, putki- ja levykuidut. [5]

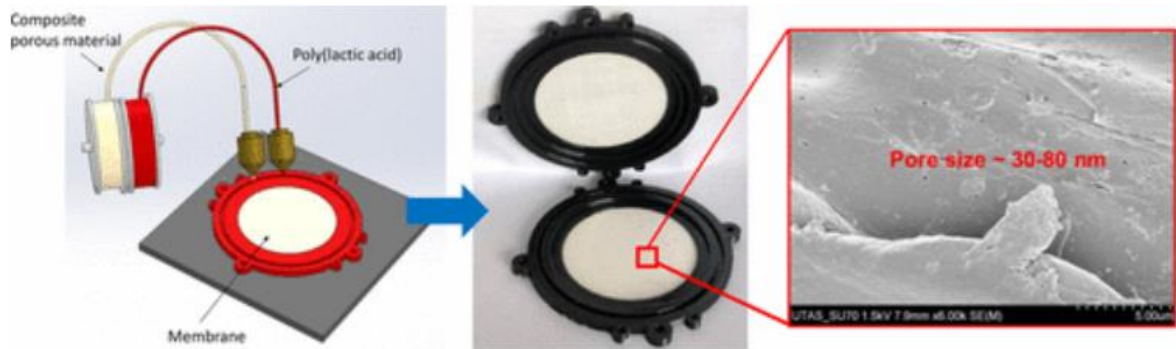
Suurinta osaa tuotantomenetelmistä pyritään saamaan vähemmän ympäristöä kuormittaviksi ja taloudellisesti kannattavammiksi. Tällöin usein halutaan parantaa tuotannon energiatehokkuutta. 3D-tulostuksen avulla tämä olisi mahdollista myös membraaneja hyödyntävissä erotusprosesseissa. Esimerkiksi vedenpuhdistus hyödyntää ioninvaihtomembraaneja erottaessaan raskaita metalleja. Erotus tehostuu pinta-alan kasvaessa ja ionien siirtyminen paranee, kun pinnasta tehdään kolmiulotteinen. Nykyinen muotoiltujen membraanien valmistusprosessi on sekä aikaa vievä että kallis. Lisäksi tuloksena saadaan ainoastaan yhtä ja samaa kuviota oleva ulkokerros. Käytännössä 3D-tulostus pystyy luomaan nopeammin erilaisia kolmiulotteisia muotoja. Menetelmä voisi siis lisätutkimuksen- ja kehityksen jälkeen parantaa nykyisiä membraaneja huomattavasti. [16]

Tällä hetkellä resoluutio on lisäävän valmistuksen laitteissa mikrometrien kokoluokassa. Esimerkiksi välilevyjä valmistettaessa tämä on usein varsin riittävä. Membraanit sen sijaan usein tarvitsevat nanometrien resoluution, johon 3D-tulostus ei vielä kunnolla pysty. [5] 3D-tulostusta voidaan hyödyntää siis molemmilla osa-alueilla, mutta resoluution parantaminen vaatii vielä lisää tutkimusta. 3D-tulostuksen metodien kehittyminen itsessään voi olla tarpeellista ennen sen soveltamista nanoluokan membraanien valmistukseen.

Tyypillisesti vedensuodatusmembraanin tuottaminen vaatii useita prosessiaskelia. Valmistuksessa joudutaan myös käyttämään runsaasti vettä, vahvoja happoja sekä voimakkaita kemikaaleja. Perinteisessä valmistuksessa polymeeristä koostuvasta membraanista tehdään huokoinen filteri happokäsittelyn avulla. Singaporelainen yritys Nano Sun pystyy välttämään tämän vaiheen kokonaan hyödyntämällä lisäävää valmistusta ja nanokuituja membraanien valmistuksessa. Nano Sunin 3D-tulostusta hyödyntävä prosessi sisältää vain kaksi prosessiaskelta, eikä se käytä runsaasti vettä tai voimakkaita kemikaaleja. Tämä tekee prosessista hyvin ympäristöystävällisen. [17]

Nano Sun hyödyntää laajasti 3D-tulostusta valmistaessaan membraaneja vedenpuhdistusta varten. Yrityksellä on käytössään heidän oma, patentoitu 3D-tulostin, joka pääsee nanometrien kokoluokkaan. Tulostus toteutetaan tulostamalla nanokuitua, joka kootaan tukimateriaalin päälle. Tämä puristetaan ohueksi membraanilevyksi. Ohuet kuidut luovat suuren pinta-alan, johon epäpuhtaudet tarttuvat. [17]

Kalsoom et al. tulostivat tutkimuksessaan MM-FDM 3D-tulostuksella ensimmäistä kertaa passiivisen näytteenottolaitteen, jossa on integroituna huokoinen ympyränmuotoinen membraani. Tällä tulostetulla membraanilla poistettiin vesinäytteistä rikkakasvien torjunta-ainetta atrasiinia. Näytteenottolaite suunniteltiin siten, että sen kokoonpano on yksinkertainen, sen tiivistys on riittävä ja siinä on integroitu huokoinen kalvo. Jokaisen laitteen tulostusaika oli noin 2,5 tuntia. Kuvassa 12 on esitetty näytteenottolaitteen rakenne. [14]



Kuva 12 3D-tulostettu passiivinen näytteenottolaite, johon on integroitu pyöreä membraani. [14]

Tulostettu huokoinen membraani koostui pääosin kahdesta eri komponentista, vesiliukoisesta PVA:sta sekä kumielastomeerisesta polymeerista. Näistä ensimmäinen pystyttiin liuottamaan veteen tulostuksen jälkeen, jolloin se ei jäänyt lopulliseen komponenttiin. Verrattuna jäykkään ja sileäpintaiseen pesemättömään membraaniin, tulostettu membraani oli sekä hyvin joustava että karheapintainen. [14]

3D-tulostettu membraani eroaa hieman kaupallisista membraaneista. Tulostetuilla membraaneilla päästiin lähes samoihin erotustuloksiin kuin kaupallisilla perinteisillä membraaneilla. Tämä voi johtua mm. siitä, että kaupallinen membraani on hieman ohuempi. Ero ei kuitenkaan ollut merkittävän suuri, ja 3D-tulostimien resoluutiota pyritään parantamaan koko ajan. Lisäksi pidentyneestä pesuajasta PVA:n poistamiseksi johtuen tulostetun membraanin huokoskoko oli hieman suurempi kuin materiaalille oli ilmoitettu. [14] Huokoskoon kasvu voi heikentää puhdistustulosta, sillä tällöin useimmat nanopartikkelit läpäisevät membraanin. Tarve pesemiselle pidentää myös kokonaisvalmistusaikaa.

Tutkimustuloksena saatiin 10 päivän kromatogrammissa 77% aleneminen atrasiinipiikissä verrattuna 2 päivän kromatogrammiin. Voidaan siis todeta, että valmistettu membraani toimi sille tarkoitetussa tehtävässä. Vaikka membraani puhdistikin atrasiinia tarkoituksenmukaisesti, havaittiin materiaalien valinnassa myös ongelmia. Kromatogrammeista havaittiin lauriinihappoa ja palmitiinihappoa, joita membraanin valmistusmateriaalien tiedetään sisältävän. Vaikka kyseiset aineet eivät häirinneet atrasiinin havaitsemista, voidaan sen todeta huonontavan vedenpuhdistuksen laatua. [14]

Tämä laite voidaan tulostaa suhteellisen edullisilla tulostimilla, jolloin esimerkiksi useat laboratoriot voisivat hyödyntää menetelmää prosesseissaan. Tulostuksessa kannattaa käyttää materiaalin pursotukseen perustuvaa tulostinta, koska silloin voidaan helpoiten saavuttaa taloudellisesti edullinen ja asiakkaan tarpeet parhaiten kohtaava objekti. Tutkimuksessa osoitettiin 3D-tulostuksen hyödyntämispotentiaali ympäristöön liittyvissä sovelluksissa. [14]

Etenkin Kalsoom et al. [14] tekemässä tutkimuksessa nousi esille kemikaalien ja veden läsnäolon tuomat haasteet, jotka on otettava huomioon suunniteltaessa erotus- ja puhdistustekniikassa käytettäviä 3D-tulostusta hyödyntäviä sovelluksia. Kemikaalien liukeneminen membraanista voi osoittautua hyvinkin haasteelliseksi tulevaisuudessa. Monessa tilanteessa erilaiset päällysteet voivat korjata alkuperäisen materiaalin tuomat haitat. Jotkin komponentit, kuten esimerkiksi huokoiset membraanit, voi kuitenkin olla haastava tai mahdoton päällystää.

Tutkimuksen pohjalta voitaisiin pohtia erilaisia vaihtoehtoja membraanin tulostusmateriaalille. Materiaalien valinnassa on syytä ottaa huomioon kemialliset reaktiot, joita tulostetun objektin käyttöolosuhteissa tapahtuu. Jos materiaalista liukenee veteen joitakin yhdisteitä tai se reagoi jonkin prosessissa läsnä olevan aineen kanssa, materiaali ei todennäköisesti ole käyttötarkoitukseen soveltuva. Joissakin tilanteissa voi olla mahdollista, ettei 3D-tulostus vielä tarjoa kaikkiin käyttökohteisiin sopivia materiaaleja. 3D-tulostukseen liittyvien tutkimuksien määrä kuitenkin lisääntyy koko ajan, ja kehityksen myötä menetelmän käyttökohteet todennäköisesti laajenevat entisestään tulostettavien materiaalien määrän lisääntyessä ja valmistusmenetelmien kehittyessä.

Lisäävää valmistusta ei pidetä kustannustehokkaana valmistusmenetelmänä verrattuna perinteisiin metodeihin esimerkiksi nopeutensa puolesta. Toisaalta lisäävän valmistuksen edut eivät tule esille perustuotannossa, ja sen kilpailuetu on nimenomaan erikoisvalmistuksessa. Näitä komponentteja valmistetaankin kerralla vähemmän. Tärkeimpinä asioina 3D-tulostuksen käytön lisäämiseksi voidaan pitää tulostusmateriaalien laajenemista sekä itse AM-tekniologioiden kehittymistä eteenpäin. Tärkeää olisi saada tulostimien resoluutiota paremmaksi. Tällöin myös nanomittaluokassa toteutettavien prosessien membraanit voitaisiin tulostaa lisäävällä valmistuksella. Tulostusmateriaalien joukkoon olisi syytä saada mm. polyeetterisulfoni. Tämänhetkisenä hyötynä 3D-tulostuksella membraanitekniikassa on erikoisvalmistus. [18]



### 4.3 Turbulenssipromoottorit

Usein likaantumista kontrolloidaan turbulenssivirtaa hyödyntämällä. Tämän tuottamiseen vaaditaan kuitenkin energiaa, jolloin koko prosessin energiankulutus kasvaa. Tällä on negatiivinen vaikutus sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta, joten mekaanisesti asetettavat turbulenssipromoottorit voisivat olla potentiaalinen vaihtoehto likaantumisen vähentämiseksi. Käsitteenä likaantuminen on hyvin laaja ja pitää sisällään useita eri ilmiöitä. Näitä ovat esimerkiksi huokoisten supistuminen ja tukkeutuminen, adsorptio sekä kakun ja biofilmien muodostuminen membraanin pinnalle. [19]

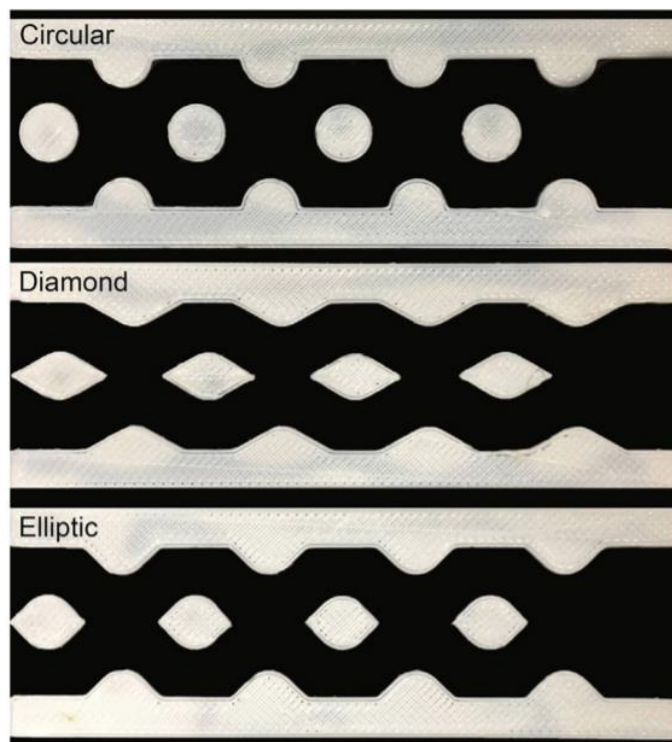
Membraaneja hyödyntävissä erotusmenetelmissä virran ei kannata olla laminaarinen, koska tällöin likaavat aineet pystyvät laskeutumaan ja kerrostumaan helpommin. Tämän vuoksi virtauksesta pyritään tekemään turbulentiä. Aikaansaatu turbulenssi vähentää laminaarisen kerroksen paksuutta, aikaansaa kohtisuoraa sekoittumista membraanin pintaan nähden sekä suurentaa leikkausnopeutta membraanin pinnalla. [19] Likaantumisen vähentämiseksi turbulenssin aikaansaaminen on siis yksi kannattavimmista keinoista, ja tämä on energiankäytön kannalta edullisinta tehdä turbulenssipromoottorien avulla.

Turbulenssipromoottorit ovat geometrioiltaan vaihtelevan mallisia kappaleita, jotka asetetaan lähelle membraanin pintaa. Niiden toiminta perustuu siihen, että ne luovat sekundäärisiä virtauskenttiä ja siten lisäävät virtauksen leikkausjännitystä. [20] Käytännössä ne siis aiheuttavat pyörteitä, poikkeuttavat virran suuntaa sekä parantavat partikkelien takaisinkuljetusta [19]. Turbulenssipromoottorit pystyvät vähentämään membraanin päälle muodostuvan kakun määrää. Tsai et al. tutkivat promoottorien geometrian vaikutusta virtaukseen. Tutkimusta varten tulostettiin lisäävän valmistuksen avulla pyöreitä, timantin mallisia sekä ellipsejä turbulenssipromoottoreita. [20]

Turbulenssipromoottoreilla on suuri potentiaali suodatuksen tehostamiseen sekä membraanin likaantumisen vähentämiseen ristivirtausmikrosuodatuksessa. Etenkin suolan poistossa käytettävien membraanien likaantuminen on globaali ongelma. Prosessissa hyödynnetään usein käänteisosmoosia, joka on pitkällä aikavälillä altis membraanin likaantumiselle ja siten nousevalle energiankulutukselle. Puhtaan veden tuottaminen ihmisille on elintärkeää mutta tietyillä alueilla haasteellista. Tämän takia on erittäin tärkeää etsiä ratkaisuja, joiden avulla veden puhdistamisesta saadaan yhä taloudellisesti kannattavampaa ja toimivampaa. Kakkukerrokseen kertyy erilaisia bakteereja sekä polymeerisiä aineita. Tällaiset tekijät voivat vaikuttaa puhdistuksen tulokseen hyvinkin haitallisesti. [20]

Monissa tilanteissa, kuten esimerkiksi membraanien kohdalla, 3D-tulostuksen rajoitteet haittaavat vielä hieman valmistusta. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkansa turbulenssipromoottorien kohdalla, vaan 3D-tulostuksen ominaisuudet ovat sille edulliset.

Turbulenssipromoottorit ovat pieniä ja niillä ei ole samanlaisia tarkkuutta vaativia ominaisuuksia kuin vaikkapa membraanien huokosilla, joten ne voidaan tulostaa nopeasti lisäävän valmistuksen avulla. [20] Kuvassa 13 on esitetty sulatetun laskeuman mallinnuksen (FDM) avulla tulostettujen turbulenssipromoottorien geometriat. Promoottorien valmistuksessa käytettiin kestäväää ja vahvaa polyesteri-elastomeeria. Se on käyttökelpoista erotustekniikan sovelluksissa, koska se kestää kemikaaleja ja on resistanssi rypistymiselle.



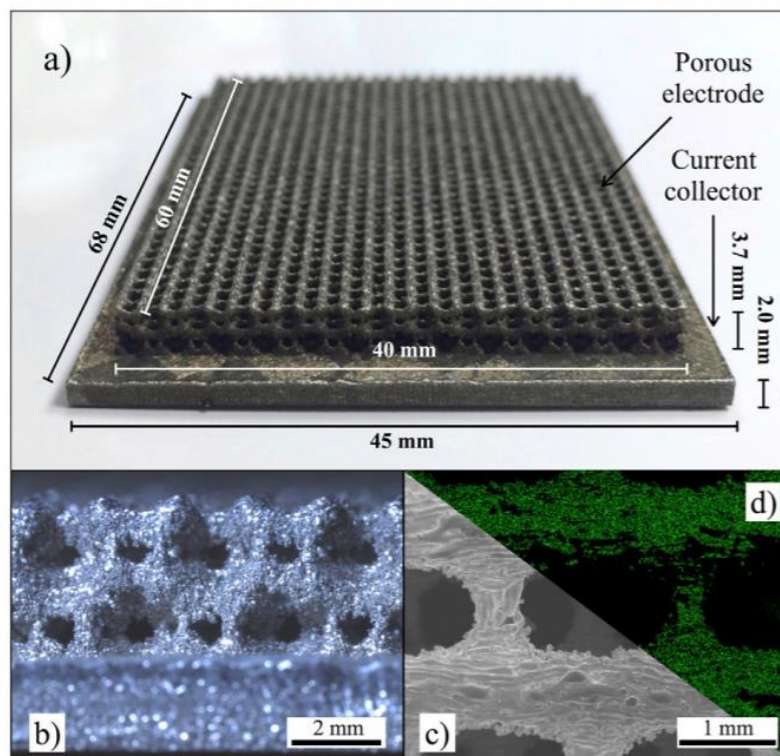
Kuva 13 Tutkimuksessa tulostettiin pyöreitä, timantin mallisia sekä ellipsejä turbulenssipromoottoreita. [20]

Parhaimmat tulokset Tsai et al. saivat ellipseillä turbulenssipromoottoreilla. Sitä käytettäessä membraanin likaantuminen oli vähäisintä ja suodatusnopeus korkein. Tunnetuissa olosuhteissa ellipsin turbulenssipromoottorin havaittiin parantavan suodatusvirtausnopeutta 30-64%. Vastaavissa olosuhteissa timantin mallinen promoottori sai aikaan vain 7-16% parannuksen. Tulokset ovat siis verrattuna normaaleihin, ilman promoottoreita tehtävään mikrofiltraatioon. [20]

#### 4.4 Elektrodit

Arenas, de León et Walsh hyödynsivät 3D-tulostusta tutkimuksessaan huokoisten elektrodien valmistukseen. Valmistusmateriaalina käytettiin ruostumatonta terästä, josta valmistettu objekti päällystettiin nikkelillä. Tulostettu rakenne oli niin monimutkainen, että sitä ei voida valmistaa tavanomaisilla valmistusmetodeilla, kuten CNC-työstöllä. Elektrodi valmistettiin M2 Multilaser- tulostimella ja nikkelipinnoite lisättiin EX725M- jauhesyötöllä. [21]

Tutkimuksessa havaittiin myös se, että tulostetun materiaalin pinta oli melko karhea ja paikoittain heterogeeninen. Karheus on pinnalle edullinen piirre, sillä se laajentaa elektrodin pinta-alaa ja parantaa massansiirtoa. Massansiirto paranee karhean pinnan luomien mikroturbulenssien ansiosta. Kuvassa 14 on esitetty tulostetun elektrodin huokoinen rakenne. [21] Yleisesti käytettäessä metallia 3D-tulostuksen syöttömateriaalina, saadaan kappaleelle tasainen pinta.



Kuva 14 Tulostetun ruostumatommasta teräksestä ja nikkelistä valmistetun huokoisen elektrodin rakenne. Kohta a) esittää huokoisen elektrodin makrorakenteen ja b) elektrodin optisen mikroskopian sivusta katsottuna. Kuvan osassa c) nähdään yksittäisen huokosen mikrorakenne SEM-kuvana ja d) on nikkelin EDS-kartoitus samalle huokoselle. [21]

3D-tulostus voisi potentiaalisesti parantaa tämänhetkisten elektrodien ominaisuuksia, sillä sen avulla pystytään vaikuttamaan moniin elektrodin tärkeisiin ominaisuuksiin. 3D-tulostuksella pystyttäisiin helposti tuottamaan elektrodeja, joilla olisi erilainen mikrorakenne, karheus ja elektrokatalyyysi. Tutkimuksessa havaittiin, että tulostetut elektrodit ovat kilpailukykyisiä perinteisten elektrodien kanssa, joissain tilanteissa jopa parempia. [21]

3D-tulostus antaisikin hyvät mahdollisuudet geometrioiltaan haasteellisten elektrodien hyödyntämiseen erikoistuneissa elektrokemiallisissa virtausreaktoreissa [21]. Tämänkaltaiset sovellukset voivat parantaa erotuskykyä etenkin spesifeissä sovelluksissa ja pienentää energiankulutusta.

Aktiivihiiლისუოდattimia hyödynnetään paljon vedenpuhdistuksessa, sillä sen huokoskoko on hyvin suuri. Areir et al. tulostivat lisäävällä valmistuksella aktiivihiiლისუოდattin, joka valmistettiin joustavaksi kangasrakenteeksi. 3D-tulostuksen käyttö mahdollisti mm. kerroksen paksuuden ja käytetyn materiaalin määrän optimoinnin. Tutkimuksessa tehtiinkin useita eri aktiivihiiლისუოდattimiteitä, jotta voitaisiin löytää parhaat ominaisuudet suodattimen materiaalille. Ongelmia aiheuttivat esimerkiksi happokonsentraatio ja hiilen partikkelikoko. Tutkimuksessa pohdittiin myös erilaisen kokoamisprosessin vaikutusta elektrodiin. Tämänhetkiset, perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetut aktiivihiiლისუოდattimet toimivat hyvin perusvedenpuhdistuksessa, mutta lisäävä valmistus voisi edelleen luoda suodattimelle spesifejä ja tarkoin kohdennettuja ominaisuuksia. Energian varastointi olisi yksi potentiaalinen sovellus suodattimelle, jonka 3D-tulostus mahdollistaisi. Hiili aktivoidaan happokäsittelyn tai paineistetun vesikaasun avulla. [22]

Suodattimen suorituskykyyn ja ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa sen rakenteen avulla. Erotus- ja puhdistuskykyä parantaa suuri vaikuttava pinta-ala, johon vaikuttaa mm. huokosten ja suodattimen koko sekä huokosten jakautuminen suodattimessa. Tärkein parannuskohde elektrodeissa on tällä hetkellä monien tutkijoiden mielestä sen ominaisuus varastoida energiaa. Monet perinteiset valmistustekniikat, kuten esimerkiksi seulonta (screen printing) ja teräpäällystäminen (doctor blade coating), saattavat sisältää esikäsittelyvaiheen. 3D-tulostuksen avulla esikäsittelystä päästään usein eroon, joten myös valmistusvaiheita saataisiin karsittua pois. 3D-tulostuksessa hyödynnettiin kaksipäistä suutinta, ja valmistuksen tarkoituksena oli nimenomaan saada parannettua kondensaattorin kykyä varastoida energiaa. [22]

#### **4.5 Raskasmetallien poistaminen vedestä**

Myrkyllisten raskasmetallien poistaminen vedestä on yksi tämän hetken suurimmista ongelmista vedenpuhdistusteknologiassa. 3D-tulostettuja osia käytetään usein myös laajentamaan jonkin jo olemassa olevan laitteen ominaisuuksia. Ji et al. tulostivat lisäävällä valmistuksella erottamista tehostavan substraatin adsorbenttiin. Tarkoituksena oli tehostaa raskasmetallien erottumista vedestä. Tulostimena käytettiin kaupallista Zortrax M200 tulostinta [23]

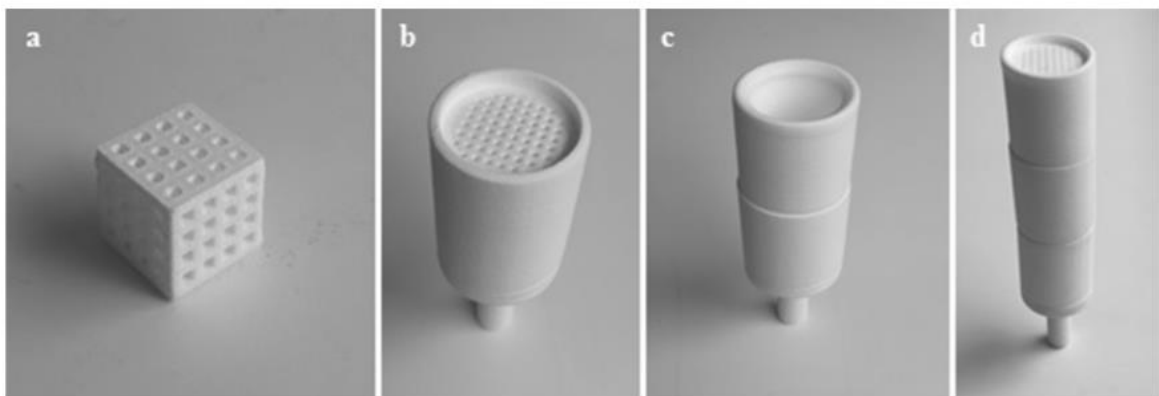
Orgaaniset polymeerit ovat ideaalisia heterogeenisiä matriiseja saasteiden poistamiseen vedestä. Tämä johtuu niiden kemikaalisen koostumuksen valintamahdollisuuksista, joka tekee materiaalista helposti muokattavan. 3D-tulostus mahdollistaa vielä pinnan muokkaamisen ja optimoinnin spesifejä sovelluksia varten. Tulostusmateriaalina käytettiin akryylinitriilibutadieenistyreeniä, joka mahdollistaa suuren reaktiivisen pinta-alan, jolloin metallien adsorboituminen on tehokasta. Tutkimuksessa havaittiin, että koko tulostetun materiaalin pinta sitoi aktiivisesti raskasmetalleja vesiliuoksesta. [23]

12 tunnin tasapainotuksen jälkeen Ji e al. raportoivat metallinpoistotehokkuudet kolmelle tutkitulle metallille. Suurin poistotehokkuus oli kupari-ioneille (67,1%). Hieman pienemmät erotustehokkuudet saatiin nikkeli-ioneille (44,2%) ja koboltti-ioneille (40,5%). Koboltin havaittiin jakautuneen tarkastellulle pinnalle tasaisesti, jolloin voidaan todeta, että koko pinta sitoo aktiivisesti metalleja. Tämä edelleen puoltaa käytetyn POM-muunnellun materiaalin soveltumista raskasmetallien erottamiseen vesiliuoksista. [23]

#### **4.6 3D-tulostettu keräin kullan talteenottoon**

Elektroninen jäte sisältää paljon arvokkaita metalleja, kuten esimerkiksi kultaa. Maailmanlaajuisesti kullan tuotannosta 10% käytetään osana elektronisia laitteita. Euroopassa elektronisen jätteen määrä kasvaa huimaa vauhtia, joten kullan tehokkaalle talteenotolle on tarvetta. Tämänhetkiset menetelmät kullan talteenottoon sisältävät lähinnä fyysisiä ja monivaiheisia prosesseja. Myös pyrometallurgisia ja hydrometallurgisia käsittelyjä sekä näiden yhdistelmiä hyödynnetään kullan talteenotossa. Menetelmiin kuuluu materiaalin esikäsittelyä ja mahdollisia ympäristöriskejä. [24]

Tällä hetkellä tyypilliset keräinmateriaalit sisältävät pieniä partikkeleita, jonka takia ne vaativat erillisen suodatussysteemin, joka joko puhdistaa liuosvirran jäljellä olevista partikkeleista tai kerää prosessissa käytetyn adsorbenttin. Usein siis adsorbenttin uudelleenkäyttö on haastavaa tai jopa mahdotonta. Hyödyntämällä 3D-tulostusta tämän ongelman välttäminen on mahdollista, sillä itse keräinmateriaalia on käytetty verkon tai kolonnin tulostamiseen. Liuos, josta erotus tapahtuu, virtaa tämän erottavaa materiaalia sisältävän objektin läpi tai objekti kastetaan siihen. Kuvassa 15 on lisäävällä valmistuksella tehty keräin, joka on tulostettu muovien jauhepetisulatuksella. [24]



Kuva 15 Kuvan osassa a) on 3D-tulostettu testauksissa käytetty verkko ja b) on keräinyksikön rakenne. Kohdassa c) on esitetty erotuksessa käytettävä lopullinen kolonni, jonka avulla kulta voidaan erottaa. Kohta d) on pidennetty kolonni kolmella keräinyksiköllä. [24]

Lehtinen et al. tutkivat 3D-tulostuksen tuomia mahdollisuuksia kullan erottamiseen elektroniikkajätteestä. Tutkimuksessa tulostettiin keräin nylon-12-jauheesta, joka on hyvin selektiivinen kullalle. Materiaali on myös edullinen, joten sen käyttö ei tuo lisäkustannuksia prosessille. Keräimen valmistus 3D-tulostuksella antaa myös laajat mahdollisuudet keräimen koon ja muodon valintaan. Näiden avulla voidaan vaikuttaa myös prosessin virtausparametreihin. Kun kulta on poistettu, lisäävän valmistuksen avulla tehty keräin voidaan käyttää aina uudelleen. [24] Tämä mahdollisuus parantaa prosessin ympäristöystävällisyyttä ja vähentää kustannuksia, sillä uuden osan hankinnalta vältytään.

Lisäävän valmistuksen avulla voidaan vaikuttaa monella eri tapaa lopputuotteen ominaisuuksiin. Valmistuksessa käytetyn lasersäteen voimakkuudella on vaikutusta keräimen fyysisiin ominaisuuksiin, jotka lopulta vaikuttavat koko prosessin erotusominaisuuksiin. Jos laserin voimakkuus on muovien jauhepetisulatuksessa matala, tulostetun objektin pinta-ala ja huokoisuus ovat suuret. [24]

Koeolosuhteissa tulostettu keräin adsorboi kullasta 96,4%. Lisäksi liuoksesta adsorboitui 4,6% platinaa, muita metalleja ei adsorboitunut merkittäviä määriä. [24] Materiaalin voidaan siis todeta olevan hyvin selektiivinen kultaa kohtaan, joka on erittäin hyvä piirre tähän käyttötarkoitukseen. Se, ettei muita metalleja adsorboidu, vähentää lopussa tarvittavien käsittelyjen ja erotusprosessien määrää.

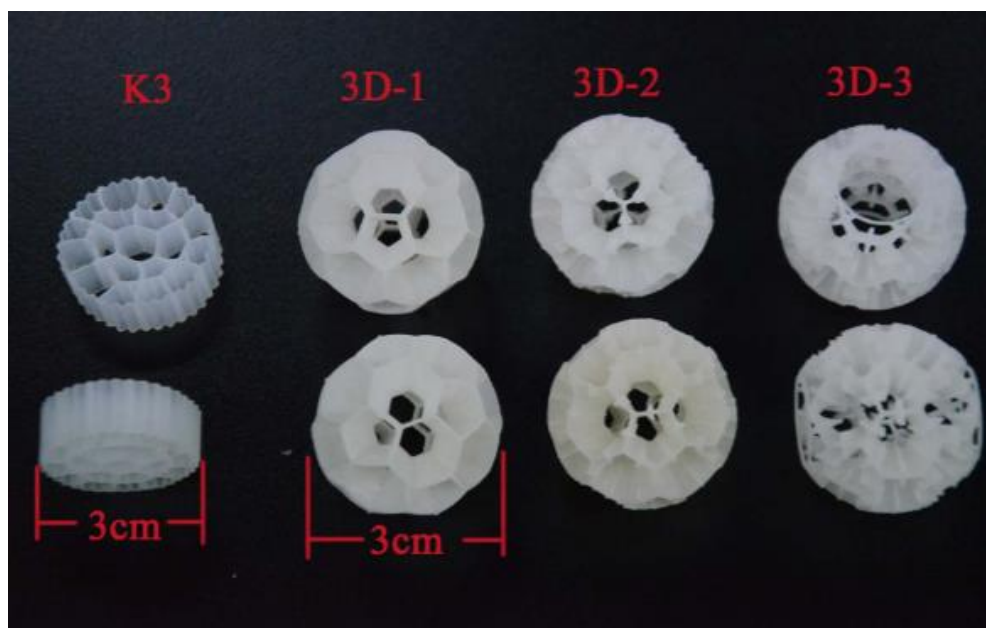
Samasta N12-jauheesta valmistettua keräintä kokeiltiin käyttää myös oikeaan elektroniseen jätteeseen. Tällöin kullasta adsorboitui 77,8%. Tässäkin tilanteessa talteensaantiprosenttia voidaan pitää suhteellisen korkeana, kuten myös selektiivisyyttä. Ainoa muu metalli-ioni, jota adsorboitui, oli tina (1,6%). 3D-tulostuksen suuri etu tässä sovelluksessa on se, että se vähentää merkittävästi prosessiaskelien määrää. [24] Erityisen lupaavia tutkimustuloksista tekee se, että menetelmää testattiin myös käytännössä oikeaan jätteeseen. Tämä osoittaa menetelmän potentiaalin ja käyttökelpoisuuden elektroniikkajätteiden käsittelyyn, jonka määrän kasvaminen on hyvin ajankohtainen ja merkittävä ongelma.

#### **4.7 Biofilmireaktorit**

Vedenpuhdistamot hyödyntävät prosesseissaan usein biofilmireaktoreita, jotka valmistetaan joko polyeteenistä tai polypropyleenistä. Biofilmireaktorin tarkoituksena on poistaa vedestä orgaaninen materiaali tai fosfori. Se voi myös toimia paikkana nitrifikaatiolle tai denitrifikaatiolle. [25]

Biokantaja (Bio-carrier) on muovista valmistettu kotelo, jolla on monimutkainen rakenne. 3D-tulostus mahdollistaa tämän rakenteen ja ominaisuuksien muuttamisen aivan uudella tavalla. Ensin malli luodaan tietokoneella, jonka jälkeen biokantajan koko ja muoto voidaan suunnitella ja kontrolloida. Ideana on se, että massansiirto olisi mahdollisimman hyvä ja vaikuttava spesifinen pinta-ala mahdollisimman laaja. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että 3D-tulostettu biokantaja on karkeampi ja hydrofiilisempi kuin perinteisin metodein valmistettu. [25] Nämä molemmat ominaisuudet saavat erotuksesta tehokkaamman.

Kuvassa 16 on esitetty rakenteeltaan hieman poikkeavia 3D-tulostettuja biokantajia, jotka Dong et al. tulostivat tutkiessaan lisäävän valmistuksen soveltumista vedenpuhdistuksessa käytettäviin biokantajiin. Tulostinmateriaalina käytettiin nylonia ja 3D-tulostuksen teknologioista hyödynnettiin muovien jauhepetisulatusta. Yhteistä tulostetuilla biokantajilla on se, että ne ovat sisältä onttoja ja niillä on suuri vaikuttava pinta-ala. Biokantajien rakenne sai vaikutteita fullereenin molekyyliarakenteesta. Niiden huokoisuus oli yli 90%. Nämä ominaisuudet parantavat hapen ja kerättävän substraatin siirtymistä itse biofilmille. [25] 3D-tulostus mahdollistaa hyvin rakenteen optimoinnin erotuksen tehostamiseksi.



Kuva 16 Tutkimuksessa käytettiin hieman geometrioiltaan toisistaan poikkeavia biokantajia. [25]

3D-tulostettu biokantaja tarjoaa joitakin etuja verrattuna perinteiseen. Sen rakenne esimerkiksi tarjoaa suotuisan mikroympäristön bakteerikasvulle, joka on hyödyllistä jätevedenkäsittelylle. Sen mahdolliset muut hyödyt tulisi selvittää lisätutkimuksen avulla. [25]



## 4.8 Tislaus

Tislausta käytetään puhdistamaan yhdisteitä, ja se on yksi kemianteollisuuden yleisimpiä erotusmenetelmiä. Sillä voidaan erottaa kaksi nestettä toisistaan niiden erilaisten kiehumispisteiden avulla. Tislausyksiköt, kuten kolonnit, ovat huomattava osa prosessin kustannuksia. 3D-tulostusta hyödyntämällä voitaisiin potentiaalisesti saada näitä kuluja hieman alhaisemmiksi. [26] Käytännössä hintaa saadaan alhaisemmaksi esimerkiksi kokoonpanoja tulostamalla, rakenteiden optimoinnilla mm. CFD-laskennan avulla sekä virtausteknisellä suunnittelulla.

Mardani, Ojala, Uusi-Kyyny et. Alopaeus kehittivät tutkimuksessaan modulaarisen kolonnin hyödyntäen lisäävää valmistusta. Valmistus tehtiin stereolitografian avulla, ja materiaalina toimi HTM140IV. Tutkimuksessa testattiin pakkaamatonta kolonnia sekä pakattuja kolonneja, joissa oli 3D-tulostuksella valmistetut metalli- tai polymeeritäytteet. Modulaarinen rakenne mahdollisti kolonnin suorituskyvyn optimoinnin sen käyttötarkoitukseksi suotuisaksi. Kolonnia käytettiin heksaania ja sykloheksaania sisältävän liuoksen tislauksessa, toimien sekä jatkuvassa että refluksitilassa. Kolonnit kykenivät toimimaan vakio-olosuhteissa jopa 9 tuntia. [26]

Kemianteollisuutta käsiteltäessä on otettava huomioon muutamia erityispiirteitä. Tulostuksessa käytetään monesti polymeerejä, jotka ovat alttiita kemikaalien vaikutukselle. Tutkimuksessa havaittiin, että pitkän ajan (8 h) aikana polymeeriosa alkoi kulua ja halkeilla. Mardani et al. esittivät tämän johtuvan mahdollisesti orgaanisten liuottimien läsnäolosta. Tulostuksen käytössä on siis pohdittava, liuottavatko prosessin kemikaalit polymeerikomponenttia. Prosessissa käytettävät tulostetut komponentit voitaisiin päällystää jollakin metallilla, jolloin itse polymeeri ei joudu kosketuksiin kemikaalien kanssa. Jos menetelmää tutkittaisiin ja kehitettäisiin lisää, sillä voisi olla hyvät mahdollisuudet myös kolonnien valmistuksessa. Lisäävä valmistus potentiaalisesti helpottaisi valmistetun kolonnin muokattavuutta tilanteen vaatimusten mukaisesti. Tällöin esimerkiksi kolonnin pituutta voitaisiin kasvattaa suhteellisen vaivattomasti. [26]

Eri sovellusten yhteydessä päädytään usein samankaltaisiin päätelmiin: lisäävä valmistus tekisi prosessista helpommin muokattavan olosuhteiden mukaiseksi, osat olisivat paremmin optimoitavissa sekä ne voitaisiin valmistaa spesifiä käyttötarkoitusta varten. Myös Mardani et al. esittivät lisäävän valmistuksen hyötypuolena sen, että tarvittavat osat voitaisiin tehdä tilaustyönä sen sijaan että prosesseihin etsittäisiin vain parhaiten sopivat markkinoilla olevasta valikoimasta. [26] Voitaisiin siis ajatella, että 3D-tulostusta hyödyntämällä prosessien

erotustehokkuutta saataisiin parannettua käyttämällä optimoituja osia, jolloin parempi erotustulos saataisiin aikaan ilman kokonaan uutta keksintöä. 3D-tulostusta voitaisiin siis pitää yhtenä vaihtoehtona myös kiristyvien ympäristövaatimusten kohtaamiseksi erilaisissa prosesseissa, kun aineiden puhdistusastetta saataisiin korkeammaksi korvaamalla vanha osa uudella, lisäävän valmistuksen avulla tehdyllä spesifillä osalla.

#### **4.9 Kromatografia**

3D-tulostus on erotustekniikassa yleisestikin suhteellisen vähän käytetty menetelmä. Kromatografiassa sitä käytetään vielä erityisen vähän. Yksi syy tähän voi olla se, että myös mikroluokan tarkat piirteet voi olla haastavaa saada oikeanlaisiksi tulostamalla. Suurin ongelma on kuitenkin käytettävien tulostusmateriaalien soveltuvuus kromatografisiin menetelmiin. Materiaaleja on jo monia, mutta mikään niistä ei ole kehitetty kuljettamaan tiettyjä toiminnallisia ryhmiä. Käytetyssä materiaalissa voi myös olla useita eri komponentteja. Tämä tekee materiaalin käyttäytymisen ennustamisesta erotuksessa hyvin haastavaa. [27]

Simon et Dimartino tutkivat lisäävällä valmistuksella tehtyä yhtenäistä adsorbenttia, jolla on anioninvaihto-ominaisuuksia. Tulostusmateriaaliksi valittiin bifunktionaalinen monomeeri, jossa on akrylaattiryhmä ja positiivisesti varautunut kvaternaarin amiini. Silloitusaineena käytettiin biologisesti yhteensopivaa polyeteeniglykolidiakrylaattia. Materiaaliin lisättiin vielä polyeteeniglykolia muodostamaan huokosia. Käytetty tulostustekniikka oli digitaalinen valokäsittely. Verrattuna perinteiseen valmistukseen, 3D-tulostuksen käyttö tarjosi uudenlaisia mahdollisuuksia. Esimerkiksi partikkelien muotoja ja pedin kokoonpanoa pystyttiin tutkimaan aikaisempaa paremmin. Pedin uudenlaiset morfologiat voisivat parantaa painehäviötä ja levyn korkeusominaisuuksia. On myös mahdollista, että tällä hetkellä käytettävät pallonmuotoiset partikkelit eivät ole paras vaihtoehto kromatografisiin menetelmiin. [27] Lisävä valmistus mahdollistaa materiaalin optimoinnin valmistusmenetelmän sallimissa rajoissa. Simon et Dimartino [27] pystyivät suunnittelemaan tarkoitukseensa optimaalisen valmistusmateriaalin ja tulostamaan sen. Aihe ei ole vielä laajasti tutkittu, mutta tutkimus osoitti hyvin myös erilaisten seosten soveltuvuuden tulostusmateriaaliksi.

Tutkimuksessa lisäävän valmistuksen avulla tuotetuilla anioninvaihtoadsorbenteilla saatiin joko vastaavat tai paremmat adsorptio-ominaisuudet kuin tämänhetkisillä kaupallisilla kvaternaarisilla amiiniadsorbenteilla. Tutkimuksessa osoitettiin sekä 3D-tulostuksen käyttökelpoisuus kromatografiassa että sen tulevaisuuden potentiaali parantaa kromatografista erotusta. Jos 3D-tulostimen asetusten ja materiaalin kokoonpanon muokkaamisen lisäksi

muutettaisiin esimerkiksi tulostuksen resoluutiota, materiaalin koostumusta ja kovetetun materiaalin huokoista rakennetta, voitaisiin erotuksesta saada hyvinkin tehokasta. Myös prosessivaiheiden määrä voisi vähentyä ja erotus voitaisiin saada tehtyä lyhyemmässä ajassa. Tämä tutkimus on ensimmäinen juuri tästä aiheesta tehty tutkimus ja se on tehty vuonna 2018, joten lisä- ja jatkotutkimusta todennäköisesti vaaditaan ennen menetelmän kunnollista käyttöönottoa kromatografisissa sovelluksissa. [27]

#### 4.10 Tarkastellut sovellukset

Taulukossa I on esitetty edellä tarkasteltujen tutkimusten käsittelemien sovellusten selkeimpiä etuja ja haittoja sekä tulevaisuuden näkymiä 3D-tulostuksen kannalta.

Taulukko I Tarkasteltujen tutkimusten pohjalta havaitut hyödyt ja haitat lisäävän valmistuksen käytölle tutkituissa erotustekniikan sovelluksissa. Myös kunkin sovelluksen tulevaisuuden mahdollisuuksia on arvioitu 3D-tulostuksen näkökulmasta.

Sovellus	Hyödyt	Haitat	Tulevaisuus
<b>Välilevyt</b>	-Säikeet ja tarkka geometria	-Etenkin materiaaleista johtuva korkea hinta	-Hyvä, erityisesti energiatehokkuuden kasvattamiseen
<b>Membraanit</b>	-Haastavat kuiturakenteet	-Alhainen resoluutio	-Optimointi - -Kemikaalikäsittelyn vähentäminen -Pinnan kuviot
<b>Turbulenssipromoottorit</b>	-Likaantumisen vähentäminen ilman energiakäyttöä	-	-Hyvä myös taloudellisesta näkökulmasta -Suodatuksen tehostaminen
<b>Elektrodit</b>	-Monimutkaiset rakenteet -Kohdennetut ominaisuudet -Esikäsittelyn tarve vähenee	-Tutkimustasolla, vaatii kehittämistä	-Erikoistuotanto -Vaihtelevat karheus, mikrorakenne ja elektrokatalyyysi
<b>Raskasmetallien erotus</b>	-Käytetyn substraatin suuri reaktiivinen pinta-ala	-Vähän tutkittu	-Lisää muokattavuutta ja spesifisyyttä -Parantaa erotustehokkuutta

<b>Keräin</b>	-Prosessiaskelien määrän väheneminen	-Tutkimustasolla	- Elektroniikkajätteen kullan tehokkaampi talteenotto
<b>Biokantajat</b>	-Massansiirto paranee optimoinnin myötä	-Monet ominaisuudet selvittämättä, vaatii jatkotutkimusta	-Vasta vähän tutkittu, hyvät mahdollisuudet rakenteiden optimointiin -Jäteveden käsittelyn tehostaminen
<b>Tislaus</b>	-Modulaarisen rakenteen valmistaminen	-Tulostinmateriaalin kuluminen käytössä	-Kehityksen avulla tislausyksiköistä voidaan saada halvempia
<b>Kromatografia</b>	-Pedin kokoonpanon ja partikkelien muodon tutkiminen	-Soveltuvien materiaalien puute -Mikroluokan tarkat piirteet haastavia -Vähän tutkittu	-Potentiaalisesti painehäviön parantaminen ja erotuksen tehostaminen -Prosessiaskelien väheneminen

## 5. Käytettävät materiaalit

Tällä hetkellä monia eri materiaaleja voidaan tulostaa 3D-tulostuksen avulla. Näihin materiaaleihin kuuluvat mm. tavalliset kestopuovut, erilaiset metallit sekä keraamit. Myös grafeenipohjaisia materiaaleja voidaan hyödyntää. [2] 3D-tulostuksessa käytetään monikäyttöisiä materiaaleja, jotka voidaan sulattaa ja kovettaa uudelleen. Tämä mahdollistaa sen, että materiaaleista saadaan mahdollisimman tarkka geometrisesti oikeanlainen objekti. [18]

Aluksi muovit olivat yleisin materiaali 3D-tulostuksessa muokattavuutensa ja hintansa vuoksi. Suuri osa teknologian sovelluksista vaatii kuitenkin muitakin materiaaleja. Metalleista eri käyttötarkoituksiin hyödynnetään mm. alumiinia, titaania, kuparia, hopeaa ja ruostumatonta terästä. [4] Nykyään keraameja hyödynnetään usein 3D-tulostuksessa. Tämä johtuu niiden erinomaisesta mekaanisesta vahvuudesta sekä siitä, että se kestää hyvin kemikaaleja ja lämpöä. Myös metalleilla, kuten zirkoniumilla ja ruostumattomalla teräksellä on vastaavat ominaisuudet. [28]

Materiaalien valinnassa tulee ottaa huomioon olosuhteet, joissa tulostettua komponenttia tullaan käyttämään. Muovien käyttö syöttömateriaalina on yksinkertaisinta työskentelyn kannalta. Metallien käyttö on kuitenkin kasvussa niiden ominaisuuksien vuoksi, jotka ovat suurempi resistanssi ja vahvuus muoveihin verrattuna. Myös tulostetun komponentin kyky vastustaa tiettyjä mekaanisia, kemiallisia ja lämpötilallisia ominaisuuksia on usein tärkeää materiaalin valinnan kannalta. [4] Kuten tarkastelluista tutkimuksista käy ilmi, tulostettavan komponentin käyttökohde ja rakenne vaikuttavat materiaalin valintaan. Myös spesifisti tiettyyn tarkoitukseen käytettävien materiaaliseosten valmistaminen ja kehittäminen on mahdollista, ja monissa tutkimuksissa yhdisteltiin eri aineita ja seoksia parhaan mahdollisen lopputuloksen aikaansaamiseksi.

## **6. 3D-tulostus verrattuna perinteisiin valmistusmetodeihin**

Perinteisessä valmistuksessa objektit luodaan yleensä joko muovaamalla materiaalia tai poistamalla sitä raakaobjektista. Tyypillinen perinteinen valmistusprosessi sisältää rakentamisen, muovaamisen ja työstämisen. [29] 3D-tulostuksella on useita etuja verrattuna perinteisiin valmistusmetodeihin. Samaa tulostinta pystytään hyödyntämään eri tehtäviin vaihtamalla prosessin muuttujia [4].

Myös vanhojen viallisten ja tarpeettomien osien käyttö on mahdollista, sillä vanhan materiaalin voi hyödyntää uudelleen prosessin lähtöaineena [6]. Tämä mahdollisuus lisää prosessin ympäristöystävällisyyttä ja alentaa kustannuksia, kun uuden materiaalin ostamiselta vältytään. Ympäristöystävällisyys on nykypäivänä erittäin tärkeä osa-alue suunniteltaessa tuotantoa. 3D-tulostuksessa on vähemmän prosessiaskelia kuin perinteisissä valmistusmetodeissa, jolloin myös toimitusketju lyhenee. Sen lisäksi että 3D-tulostuksen spesifisyys ja optimaalisuus tuottaa geometrisesti tarkkoja ja tehokkaita komponentteja, se vähentää syntyvää jätettä. Tämä näkyy myös taloudellisesti, kun materiaalia ei mene hukkaan, vaan sitä käytetään ainoastaan komponenttiin tarvittava määrä. [30]

Atkinson esitti myös Nano Sunista kertovassa artikkelissaan näkökulmia lisäävän valmistuksen tuomista epäsuorista kustannussäästöistä. Pitkällä tähtäimellä vedenkäsittelylaitokset voidaan rakentaa pienemmissä mittakaavoissa, jolloin säästöjä kertyy myös työvoiman määrässä sekä ostettavan maa-alueen ja tuotantolaitoksen koossa. [17] Nämä ovat hyviä huomioita tulevaisuutta ajatellen, ja voivat auttaa kokonaan uusien yritysten astumista alalle. Yritykset

eivät välttämättä ole valmiita niin radikaaleihin muutoksiin, jos niillä on käytössään jo toimivat tuotantolaitokset ja valmistusmenetelmät.

3D-tulostuksen ansiosta komponentti saadaan halutun malliseksi usein ilman erillistä työstämistä. Valmistettu komponentti on myös perinteistä komponenttia optimaalisempi [30]. Perinteisellä valmistuksella tuotetuissa kokoonpanoissa on usein monia eri osia. Lisäävän valmistuksen avulla tuotettaessa voi olla mahdollista tulostaa sama kokoonpano kertatulosteena, jolloin vältytään usean osan erikseen valmistamiselta. [11] Geometrisesta rakenteesta voidaan tehdä lisäävän valmistuksen avulla perinteistä huomattavasti monimutkaisempi. Tulostuksessa käytettävien materiaalien rajallisuus aiheuttaa kuitenkin vielä jonkin verran esteitä. [4]

Teollisuudessa käytetään nimenomaan paljon metalleja, joiden lisäävä valmistus on melko hidasta. Tällöin suuri tuotanto voi tulla kalliiksi [30]. Tämän takia 3D-tulostus usein häviää muille valmistusmenetelmille, sillä teollisuudessa aika on merkittävä tekijä [6]. Toisaalta on myös syytä huomioida, että 3D-tulostetun osan avulla voidaan saada aikaan säästöjä. Tämä tulee esille tilanteissa, joissa lisäävällä valmistuksella tehty osa on optimaalisempi prosessiin kuin perinteisen valmistuksen avulla tehty osa. Tällöin 3D-tulostettu komponentti parantaa prosessin hyötysuhdetta, jolloin se ei loppujen lopuksi tule kalliimmaksi koko prosessia tarkasteltaessa. Kalliimpi optimoitu osa voi siis hyvinkin tuoda prosessille merkittäviä säästöjä ja siten olla myös taloudellisesti kannattavampi valinta. Tällaisessa tilanteessa myöskään pitkä tulostusaika ei olisi ongelma, sillä osan tuomat säästöt tulisivat näkyviin sen ollessa käytössä prosessissa.

Monissa sovelluksissa olisi myös tarve tuottaa objekti käyttäen useita materiaaleja kerrallaan. Tämä on 3D-tulostuksessa tällä hetkellä melko haastavaa, johtuen eri aineiden erilaisista kemiallisista ominaisuuksista [4]. Tämä tekee erityisesti kahden kemiallisilta ominaisuuksiltaan täysin erilaisen materiaalin yhdessä hyödyntämisen hyvin haastavaksi. Suurinta osaa metallikomponenteista, joita eri prosesseissa hyödynnetään, ei lähtökohtaisesti kannata tai edes voi 3D-tulostaa. Ne ovat ominaisuuksiltaan mm. liian paksuja. Siksi tulostettaessa metalleja lisäävällä valmistuksella kappaleen tulee olla sellainen, että se on suunniteltu juuri valmistusprosessi huomioon ottaen. Tällä hetkellä käytettäviä osia voidaan suunnitella uudelleen lisäävän valmistuksen näkökulmasta, jolloin huomioon otetaan sekä valmistusprosessi että lopullinen komponentti. Tällöin pystytään alentamaan valmistusaikaa ja kustannuksia. [31]

On kuitenkin useita tilanteita, joissa metallien 3D-tulostus on kannattavaa. 3D-tulostuksella voidaan saada aikaan perinteistä kevyempiä osia, kun materiaalia voidaan tulostaa vain tarpeen vaatima määrä. Myös tuotteen lämpötila- ja virtausprofiilin optimointi on mahdollista lisäävän valmistuksen avulla tulostetulla osalla. Erityisesti on tärkeää huomioida kokoonpanojen valmistamisen mahdollisuus metallien 3D-tulostuksella. Tämä ensinnäkin vähentää valmistettavien osien määrää, kun useampia osia tai koko tuote on mahdollista tulostaa kerralla. Tällöin myös jälkityöstön tarve vähenee. Säästöjä syntyy etenkin tuotteen painon pudotessa ja suorituskyvyn parantuessa. [32]

Tutkimuksen lisääntyessä 3D-tulostuksen rajoitteisiin löydetään yhä enemmän ratkaisuja. Tulostusaikaa on esimerkiksi pystytty lyhentämään lisäämällä useita tulostuspäitä, kasvattamalla tuotantonopeutta sekä heikentämällä resoluutiota. 3D-tulostuksen yhteydessä resoluutiolla viitataan yksittäisen kerroksen paksuuteen. [6]

Perinteisistä valmistusmetodeista vakuumivaahdotus ja pursotus muistuttavat toimintaperiaatteeltaan lisäävää valmistusta. Nämä ovatkin toimivia tuotantomenetelmiä valmistettaessa toistuvaa kuviota. Jos kuviosta sen sijaan halutaan vaihteleva tai kolmiulotteinen, 3D-tulostuksen käyttö on kannattavampaa. [5]

## **7. Turvallisuus**

3D-tulostuksessa, kuten muissakin valmistusmenetelmissä, on omat vaaratekijänsä. Tulostuksen yhteydessä joistakin materiaaleista voi haihtua vaarallisia orgaanisia yhdisteitä sekä hienoja partikkeleita, joista voi olla haittaa tulostuksen operaattorille [33]. Kaikkiin turvallisuusriskeihin on kuitenkin helpompi varautua, kun ne tiedetään. Tällöin voidaan esimerkiksi varmistaa, että operaattori käyttää hengityssuojainta tai tehtävän tekijää vaihdellaan, jolloin altistumisaika on lyhyempi.

Itse tulostimissa on useita liikkuvia osia, ja niitä käytetään korkeissa jännitteissä. Osa tulostimen pinnoista on myös hyvin kuumia [33]. Nämä aiheuttavat potentiaalisia vaaratilanteita, jotka kuitenkin riippuvat pitkälti käyttäjästä. Jos käyttäjät on koulutettu oikein ja käytössä on sopivia suojavälineitä, ei näidenkään pitäisi aiheuttaa suoranaisia haittoja tai vaaroja.

Sisäilman laatu saattaa kärsiä tulostuksessa vapautuneiden orgaanisten yhdisteiden sekä nanopartikkelien vuoksi. Tämän vuoksi on tärkeää, että tilassa, jossa tulostinta käytetään, on

hyvä ilmanvaihto. [33] Jos tulostin halutaan sijoittaa esimerkiksi laboratorioon, hyvä ilmanvaihto olisi todennäköisesti helposti järjestettävissä. Jos tulostimia halutaan sijoittaa useita samaan tilaan, mahdollisuus hyvään ilmanvaihtoon on hyvä ottaa huomioon tilaa suunniteltaessa.

## **8. Menetelmän vähäinen käyttö erotustekniikoissa**

3D-tulostus on vielä yleisestikin suhteellisen nuori valmistusmenetelmä. Sen kehittyminen nykyiselle tasolle on vaatinut paljon tutkimusta ja kehitystä yksinkertaisissakin sovelluksissa. Ihmisillä saattaa olla hyvinkin vaihtelevat mielikuvat 3D-tulostuksesta: toiset saattavat kuvitella sen pystyvän lähes mihin tahansa ja toiset ajattelevat sen olevan tapa valmistaa pelkkiä muoviesineitä tai prototyypppejä.

Erotustekniikka tuo etenkin käytettävien materiaalien ominaisuuksille tarkat kriteerit. Prosesseissa on usein läsnä sekä vahvoja kemikaaleja että vettä. Materiaalin tulee silloin olla sellainen, ettei se liukene tai reagoi näiden aineiden kanssa. Toisaalta lisäävän valmistuksen avulla voidaan myös päällystää esineitä vaikkapa metallipinnoitteella, jolloin itse osa on suojattuna. Usein osan on kestävä myös vaihtelevia lämpötiloja ja paineita. Erotusprosesseissa monet osat, kuten membraanit, vaativat spesifisen rakenteen. Vaikka 3D-tulostuksella voidaan luoda tarkkoja geometrioita, voi juuri huokosten oikeanlaisen rakenteen luominen olla haastavaa.

Erotustekniikkaa voidaan pitää hieman vanhanaikaisena ja perinteisenä tieteenalana. Tämän takia aikaisemmin käytettyjen menetelmien korvaaminen voi osoittautua haastavaksi. Tilanteeseen voisi auttaa esimerkiksi ihmisten kouluttaminen ja menetelmän edelleen kehittäminen erotustekniikan sovelluksissa ja siten potentiaalinen osoittaminen käytännössä. 3D-tulostuksen hyödyntämiskyky erotus- ja puhdistustekniikoihin on hyvin sovelluskohtaista. Toisissa sovelluksissa tutkimuksia on tehty enemmän ja kauemmin kuin toisissa, joten kaikki tulokset eivät välttämättä vielä ole vertailukelpoisia keskenään. Lisävä valmistus voi siis potentiaalisesti parantaa toista menetelmää ja olla täysin käyttökelpoton toisessa.



## 9. 3D-tulostus yritysten keskuudessa

Lisäävän valmistuksen saaminen yritysten käyttöön etenkin Suomessa on ollut suhteellisen hidasta. Uusien sukupolvien astuessa työelämään voidaan 3D-tulostukseen keskittyvien yritysten määrän kuitenkin olettaa kasvavan. Lisäksi nykyiset yritykset tarvitsevat lisää tietoa valmistusmenetelmän ominaisuuksista, niiden on vielä sen käyttöönoton jälkeen onnistuttava myymään menetelmä omille asiakkailleen. Yksi keino ongelman ratkaisemiseksi olisi alan asiantuntijoiden ja yritysten välinen tiivis yhteistyö ja yhteiset hankkeet, joita onkin tehty jo jonkin verran. Monet yritykset, kuten esimerkiksi Outotec ja VTT, tekevät aktiivisesti tutkimus- ja kehitystyötä yliopistojen kanssa. Tämän lisäksi tekniikan alan yritykset tekevät yhteistyötä 3D-tulostukseen erikoistuneiden yritysten kanssa.

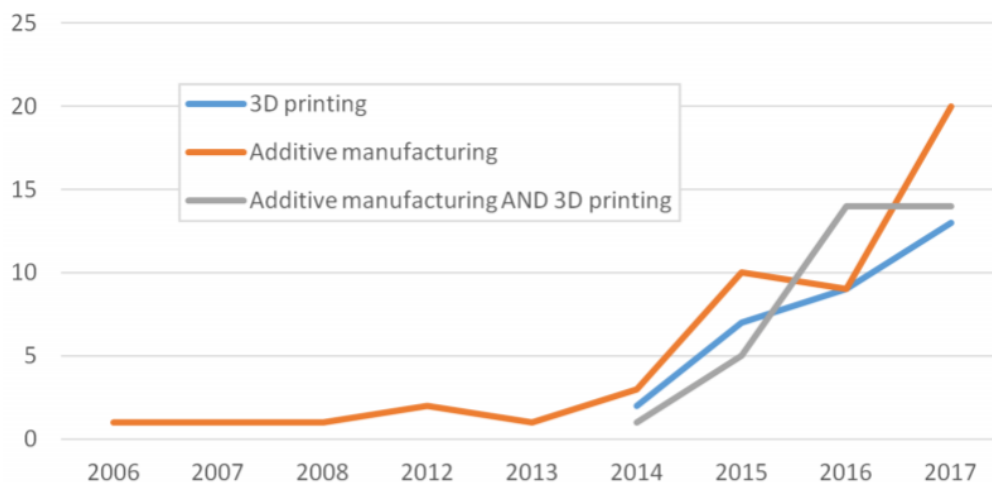
Esimerkiksi suomalainen yritys 3Dstep on ottanut tavoitteekseen tuoda yhteen alan osaajat ja yritykset. Se järjestää erilaisia koulutustilaisuuksia yrityksille, jotka haluavat itselleen ja työntekijöilleen lisää tietoa aiheesta. Koulutustilaisuuksissa voidaan kertoa yleistietoja lisäävästä valmistuksesta tai antaa syvällisempää koulutusta. [34] Tämänkaltaiset tekijät voivat luoda alun yritysten ja lisäävän valmistuksen hyödyntämisen välille, vaikkakin yrityksen itse on loppujen lopuksi pohdittava, kuinka suuressa mittakaavassa ja missä sovelluksissa se voisi menetelmää hyödyntää.

Yritykset eivät aina myöskään osaa etsiä ratkaisuja kauan erotustekniikan alalla olleisiin ongelmiin, kuten likaantumiseen. Yritysten onkin oltava innovatiivisia ja haluttava uusia ratkaisuja perinteisiin ongelmiin. Tämän takia myös tutkijoiden kannattaa aktiivisesti esitellä lisäävän valmistuksen tuomia hyötyjä erotus- ja puhdistusmenetelmiin. Usein yritykset keskittyvät tuotannon ylläpitämiseen ja sen kehitys jää vähemmälle. 3D-tulostuksella on kuitenkin paljon ratkaisuja, joista olisi hyötyä sekä ympäristölle että yrityksen taloudelle. Suomessa vallitsevan vahvan osaamisen ja uuden työelämään tulevan sukupolven kouluttamisen myötä 3D-tulostuksella on mahdollisuus parantaa suomen teollisuuden tasoa [35].

Öberg, Shams et Asnafi tarkastelivat artikkelissaan lisäävän valmistuksen käyttöönoton vaikutuksia yrityksen toimintamalleihin. Etenkin valmistajat näkevät usein prosessiaskelien vähenemisen ja tuotantoketjun lyhenemisen positiivisena asiana. Öberg et al. tarkastelevat asiaa tuotannon sijaan yritysten kumppanuussuhteiden ja avaintoimintojen suhteen. [36] Myös Ituarte et al. esittävät artikkelissaan, että kaikki yrityksen teknologiassa tapahtuvat muutokset vaikuttavat yritykseen myös hallinnollisesti ja toiminnallisesti [37]. Yritystä voidaankin tarkastella eräänlaisena systeeminä, jossa yhden osan muuttaminen hajottaa senhetkisen

tasapainon. Tämän takia onkin hyvä esittää erilaisia sopeutumismalleja yrityksille, mikä auttaisi niitä jatkamaan toimintaansa mahdollisimman samankaltaisena myös muutoksen jälkeen.

Vaikka lisäävällä valmistuksella ja 3D-tulostuksella viitataan samaan valmistusmenetelmään, käsitteisiin liittyy erilaisia mielikuvia. Kuvasta 17 kuitenkin havaitaan, että molempiin termeihin liittyvät haut ovat lähteet nousuun vuoden 2014 jälkeen. Hieman suuremman nousun voi kuitenkin havaita lisäävään valmistukseen liittyvien hakujen määrässä. Tämä voi viitata siihen, että menetelmää halutaan hyödyntää yhä enemmän juuri lopputuotannossa, jolloin usein puhutaan nimenomaan lisäävästä valmistuksesta. Kuten Öberg et al. artikkelissaan osoittivat, on kiinnostus lisäävään valmistukseen/3D-tulostukseen selkeästi kasvussa. [36]



Kuva 17 Lisäävän valmistuksen ja 3D-tulostuksen hakujen määrä vuosittain. [36]

Yrityspuolella on huomioitava tuotannon puolen lisäksi myös yrityksen kumppanuussuhteet. Tällä hetkellä yleisimpiä huolenaiheita lisäävän valmistuksen käyttöönoton yhteydessä ovat valmistukseen liittyvät mahdolliset haasteet, uusien taitojen vaatiminen sekä immateriaalioikeudet. Usein teollisuuden yrityksillä on paljon tärkeitä kumppanuussuhteita, ja näiden rakenne saattaisi muuttua uuden tekniikan käyttöönoton myötä. [36]

Kirjallisuudessa puhutaan jonkin verran myös muutoksista valtasuhteissa. Vaikka yritykset usein toimivatkin jo asiakkaiden tarpeiden mukaan, 3D-tulostuksen käyttöönotto saattaisi edelleen vahvistaa asiakkaan asemaa ja sen etua. [36] Tällä on sekä hyviä että huonoja puolia. Yritys pystyisi tehokkaammin vastaamaan asiakkaan asettamiin yhä korkeampiin vaatimuksiin. Tämä voi kuitenkin osoittautua haasteelliseksi, jos yrityksellä ei ole resursseja tähän tai asiakkaiden vaatimukset kasvavat liian korkeiksi.

On tärkeää muistaa, ettei muutoksen tarvitse tapahtua hetkessä. Yrityksillä on valmiina jo laajat laitteistot ja systeemit, joilla tuotanto toimii. Lisäävän valmistuksen käyttöönotto voi tapahtua vaiheittain tai vain joillakin tietyillä osa-alueilla. Tällöin myös yrityksen kumppanit ja työntekijät pystyvät sopeutumaan uudenlaisen tuotannon luomiin rakennemuutoksiin.

VTT näkee 3D-tulostuksen potentiaalisena kilpailukyvyn lisääjänä. Kuten yritysmaailmassa yleensäkin, on uusien innovaatioiden ja sovellusten tuotava kaupallista hyötyä. Monesti tilanne saattaa olla se, että 3D-tulostus ei ole tarpeeksi kehittynyttä yrityksen tarvitsemiin sovelluksiin. Yrityksillä on tietyt laatuksiteerit, jotka niiden tuotteiden ja palveluiden odotetaan kohtaavan. Jos jossakin 3D-tulostetussa komponentissa on vielä paljon kehitettävää, se ei sellaisenaan vielä tuo lisäarvoa yritykselle. Yksilöllisiä tuotteita pidetään tärkeinä, ja 3D-tulostuksen potentiaali nähdään etenkin niihin. [38]

3D-tulostuksen käytön lisäämiseksi erotus- ja puhdistustekniikoissa voidaan tehdä eri asioita eri tahoilla. Tutkijoiden työpanos kannattaa käyttää edelleen menetelmän eteenpäin kehittämiseen kyseisissä sovelluksissa. Tutkijoiden kannattaa selvittää, mihin ongelmiin yritykset haluavat ratkaisun ja mikä ominaisuus nostaisi heidän kilpailukykyään. Näitä kehittämällä saadaan aikaan ominaisuuksia, jotka mahdollistavat alan eteenpäin kehittymisen sekä taloudellisen hyödyn. Ideaalisesti ratkaisuista hyödytään samanaikaisesti sekä taloudellisesti että tehokkuuden kannalta. Myös ympäristöasiat ovat nykypäivänä erityisen tärkeitä.

VTT:llä on erilaisia teemoja, joiden kautta 3D-tulostuksen käytön kannattavuutta voidaan arvioida. Ensiksi kannattaa pohtia sitä, onko yrityksellä itsellään tai sen asiakkailla sellaisia tuotteita, joiden valmistus kannattaa toteuttaa 3D-tulostuksella siten, että se tuo niihin jonkinlaista lisäarvoa. Tällöin on syytä pohtia myös käytettävän lisäävän valmistuksen metodin kypsyyttä ja sitä, hankitaanko oma kone vai tuotetaanko alihankintana. [38]

Tuotekehitys on myös keskeisessä asemassa. Lisäävän valmistuksen käyttöönoton halutaan nopeuttavan tuotekehitystä ja mahdollistavan suuren vapausasteen suunnitteluun. Yrityksen näkökulmasta tällöin on tarpeellista pohtia myös liiketoimintamalleja, joita uudet yksilölliset tuotteet luovat. VTT auttaa asiakkaitaan näiden pääkohtien huomioinnissa, jolloin asiakas saa hyvät mahdollisuudet laajan kokonaiskuvan hahmottamiseen. Tällaisen toiminnan kautta lisäävän valmistuksen käyttöönotto voi olla monelle asiakkaalle helpompaa kuin se olisi ilman VTT:n tukea. [38]

Useilta muilta yrityksiltä tällä alalla ei löydy vastaavia toimintamalleja 3D-tulostuksen käyttöönoton edistämiseksi. Jos erotustekniikan alan suuret kaupalliset yritykset alkaisivat tietoisesti edistämään lisäävän valmistuksen käyttöä myös asiakkailleen, menetelmän asema saattaisi vakiintua myös erotustekniikan alalla. Onkin mahdollista, että menetelmä tulee kehittyttyään olemaan osana erotus- ja puhdistustekniikan suurempia yrityksiä, joilla on paremmat resurssit uuden tekniikan käyttöönottoon kuin pienemmillä yrityksillä. Tämän jälkeen myös pienemmät yritykset voivat seurata kehitystä perässä, jolloin lisäävällä valmistuksella on hyvät mahdollisuudet tulla osaksi erotustekniikan tuotannon rutiiniprosesseja.

Tutkimuskeskus VTT:n lisäksi Metso, joka on teknologiateollisuuden yritys, on ottanut viime aikoina 3D-tulostuksen käyttöönsä. Vuonna 2018 se toimitti ensimmäisen lisäävän valmistuksen avulla tuotetun venttiilinsä asiakkailleen. Tämä ei kuitenkaan tapahtunut hetkessä, vaan Metso on tutkinut 3D-tulostuksen mahdollisuuksia alalla jo vuosia. [39]

Alana kemianteollisuutta voidaan pitää hieman haasteellisena, sillä prosesseissa käytettyjen osien on kestävä monenlaisia ääriolosuhteita. Prosesseissa voi olla esimerkiksi vaihtelevat paineet ja lämpötilat sekä happamat liuokset. Nämä kaikki on otettava huomioon käytettävien komponenttien ja niiden materiaalien valinnassa. Metson voidaan katsoa onnistuneen 3D-tulostuksen hyödyntämisessä venttiileihinsä erittäin hyvin, sillä venttiilit ovat teollisuuden prosesseissa erityisen kovassa rasituksessa: venttiilien on kestävä niihin kohdistuvia vaihtelevia syklejä. Metso on saanut venttiileistään standardiensa mukaisia lisäämällä niihin metallikomponentteja, jotka osaltaan mahdollistavat tulostettujen venttiilien toiminnan systeemissä, jossa on sykli, jota vuoroin avataan ja suljetaan. Kuvassa 18 on Metson tulostamia venttiilejä. [39]

Yrityksenä Metso on myös pohtinut lisäävän valmistuksen tuomia etuja asiakkaidensa näkökulmasta. Erityisesti tuotteiden toimitusajat asiakkaalle lyhenevät. Asiakkaat saavat myös mahdollisuuden laitteisiin ja osiin, joiden valmistaminen perinteisillä metodeilla ei ole ollut edes mahdollista. [39] Tämä voi tuoda erityisen kilpailuedun Metsolle muihin yrityksiin nähden.



Kuva 18 Metson tulostamia venttiilikomponentteja. [39]

## 10. Lisäävän valmistuksen integrointi yrity maailmaan

Suomessa yleensäkin lisäävän valmistuksen käyttö lopputuotteen valmistamiseksi on vähäistä, etenkin jos määrää verrataan alan johtaviin maihin. Ituarte et al. mukaan 36% Suomalaisista vastaajista ilmoittivat käyttävänsä lisäävää valmistusta lopputuotantoon. Vastaava luku alan johtavilla mailla on 50%. Useat tekijät vaikuttavat siihen, kuinka hyvin yritys voi ottaa lisäävän valmistuksen käyttöön osaksi tuotantoaan. Merkittävimpiä menetelmän käyttöönottoon liittyviä hidasteita ovat esimerkiksi vaatimukset materiaalien suhteen sekä tuotannon määrä. Myös tuotantoketjun rakenteella ja erilaisilla yrityksen sisäisiin rakenteisiin liittyvillä tekijöillä, kuten kulttuurilla ja senhetkisillä valmistusmenetelmillä on vaikutusta. [37]

Edistyneisyydestään ja tärkeydestään huolimatta erotus- ja puhdistustekniikkaa ei voida pitää kovinkaan innovatiivisina ja puhuttuina aloina. Moniin ongelma-kohtiin haetaan ratkaisuja, mutta usein varsin perinteisin keinoin. Internetistä hakemalla yleisesti erotustekniikan tulevaisuuteen liittyviä tekstejä, lisäävää valmistusta ei niissä usein mainita. Tämä voi johtua monista eri tekijöistä, mutta on selvää, ettei 3D-tulostusta yleisesti ajatella ratkaisun tuojana alan keskeisiin ongelma-kohtiin.

Tämänhetkisessä yrity maailmassa innovatiivisuutta pidetään suurella arvolla. Erotustekniikasta ja innovaatioista ei kuitenkaan lähes koskaan puhuta yhdessä. Suuri osa kehityskohteista liittyy kemikaalien vähentämiseen ja ympäristöystävällisyyden lisäämiseen yleisesti. Lisäävää valmistusta tulisi tarjota kohdistetusti ratkaisuksi erotustekniikan ongelma-kohtiin. Oikein hyödynnettynä 3D-tulostuilla osilla voidaan esimerkiksi vähentää membraanin likaantumista ja ottaa aineita talteen perinteisiä osia tehokkaammin.

Tärkeää on keskittyä kehittämään 3D-tulostusta sovelluksissa, joihin perinteiset valmistusmenetelmät eivät ole tuoneet ratkaisua tähänkään mennessä. Tällaisiin sovelluksiin saatetaan ottaa uudenlaisia ratkaisuja helpommin vastaan sen lisäksi, että koko tieteenala hyötyisi kehityksestä. Aina ei myöskään tarvitse muuttaa koko prosessia, joskus 3D-tulostus tarjoaa parannuksen vain sen osaan, jolloin prosessiin kokonaisuutena ei edes aiheudu merkittäviä uudistuksia tai muutoksia etenkin yrityksen näkökulmasta.

Lisäävää valmistusta ei ole yleisestikään onnistuttu integroimaan tehokkaasti suomalaisten yritysten tuotantoon. Yksi keskeinen syy tähän on yritysten taloudelliset rajoitteet. Tällä hetkellä useilla yrityksillä ei myöskään ole konkreettista integrointisuunnitelmaa, jolloin se ei myöskään usein toteudu. Erilaisten EU-rahoitusten hakeminen voisi tuoda yrityksille tukea uuden teknologian käyttöön ja kehitykseen. [37]

Esimerkiksi auto- ja lentokoneteollisuuden erikoisosia valmistetaan lisäävän valmistuksen johtavissa maissa 3D-tulostusta hyödyntäen. Suomessa on tähän asti keskitytty prototyyppeihin ja irto-osiin. [37] Etenkin erotustekniikan tämänhetkinen tuotanto hyötyisi juuri tarkkuutta vaativista erikoisosista, sillä niiden valmistaminen perinteisillä menetelmillä on haastavaa ja joskus jopa mahdotonta. Voitaisiin siis päätellä, että erotus- ja puhdistustekniikan alalla on eräänlainen tuotantoaukko tilauskomponenteille, jonka 3D-tulostus voisi hyvinkin täyttää.

## **11. Digitalisaatio ja immateriaalioikeudet**

VTT:n mukaan 3D-tulostus on osa digitaalista vallankumousta [38]. 3D-tulostus voisi toimia tämän ajavana voimana erotustekniikassa, sillä ennen lisäävän valmistuksen käyttämistä objektin ominaisuudet tulee olla ennalta määrätty ja syötetty tietokoneelle. Erilaisten mallien ja hyväksi koettujen geometrinen ominaisuuksien jakaminen helpottuisi, jos suunnitelmat voisi vain lähettää tietokoneelta toiselle. Tämä voisi mm. edistää teollisuuden kehittymistä ja vähentää perinteisen prosessin muuttamisen tuomia kustannuksia.

Kun mallit ovat tietokoneella jaettavia, tuo tämä uuden näkökulman myös alalle liittyviin oikeuksiin. Immateriaalioikeudet saattavat joko rajoittaa tai tukea menetelmän käyttöä alalla. 3D-tulostukseen liittyy paljon erilaisia patenteja. Lähes mikä tahansa valmistusprosessin osatekijöistä voidaan patentoida, jolloin sen käytön leviäminen muille yrityksille saattaa vaikeutua. Patentin voi hankkia esimerkiksi tulostusmateriaalille, tietokoneavusteiselle suunnitelmalle (CAD, computer aided design) tai valmiille komponenteille. Tähän asti ei ole

havaittu, että patentit olisivat rajoittaneet millään tapaa 3D-tulostukseen käytettävien materiaalien kehitystä. [29]

3D-tulostuksen piireissä patenteilla suojautuminen on tärkeä osa yritysstrategiota, mutta yksityiskäyttäjien keskuudessa vallitsee avoin, tiedon jakamiseen perustuva yhteisö [29]. Etenkin Suomessa erotustekniikan ja lisäävän valmistuksen alan piirit ovat suhteellisen pienet, joten avoimuus ja tiedon jakaminen voisivat nopeuttaa menetelmän kehitystä ja käytön laajentumista alan sovelluksissa. Toisaalta yksittäinen yritys voisi saada etulyöntiaseman valmistamalla yksinoikeudella esimerkiksi vähiten likaantuvaa membraania. Tämä toisi yritykselle strategisen etulyöntiaseman, samalla parantaen sen asiakkaiden toimintaa. Usein on hyvin tilannekohtaista, hyötyykö yritys enemmän patentista vai siitä, että innovaatio on vapaassa käytössä.

Jos menetelmällä ei ole patenttia, muutkin yritykset voivat käyttää ja siten myös kehittää ja parantaa menetelmää tai sen ominaisuuksia. Tämä on yhteisen hyödyn mukaista ja voi joskus olla paras valinta myös yrityksen kannalta, etenkin jos menetelmä vaatii vielä lisää tutkimusta ja kehitystä. Tällä hetkellä tilanne on juuri tämä useissa puhdistus- ja erotustekniikan sovelluksissa: niiden potentiaali on havaittu mutta ne eivät ole täydellisiä. Mitä useampia tekijöitä saadaan kehittämään näitä sovelluksia, sitä nopeammin ne kehittyvät ja sitä laajemmin niitä pystytään käyttämään.

## **12. Johtopäätökset**

3D-tulostus mahdollistaa haastavien geometrioiden tuottamisen ilman perinteisen valmistuksen rajoitteita. Se voi parhaimmillaan parantaa prosessin ympäristöystävällisyyttä, vähentää prosessiaskelten määrää ja parantaa erotustehokkuutta. Analysoitujen tutkimusten tulosten pohjalta voidaan päätellä, että lisäävän valmistuksen laajempi hyödyntäminen olisi kannattavaa erotustekniikassa ja menetelmää ei hyödynnetä alalla sen potentiaalin mukaisesti.

Eri käyttökohteissa lisäävän valmistuksen hyödyntämisellä on erilaiset mahdollisuudet, ja on aina tilannekohtaisesti syytä pohtia, onko 3D-tulostuksen käyttö tarkastellussa kohteessa kannattavaa. 3D-tulostuksen käytöllä on edelleen monia rajoitteita, jotka on otettava huomioon ennen käytössä olevien menetelmien korvaamista. Kaikki materiaalit eivät esimerkiksi sovellu tulostusmateriaaliksi ominaisuuksiensa vuoksi, eikä etenkin kaikkien ominaisuuksiltaan poikkeavia aineita sisältävien seosten tulostus ole mahdollista. Lisäksi AM-teknologiat ovat

suhteellisen uusia verrattuna moniin muihin valmistusmenetelmiin, joten ne itsessään vaativat edelleen kehitystä.

Moni osa-alue voi tällä hetkellä hyötyä eniten lisäävän ja perinteisten valmistusmenetelmien rinnakkaisesta käytöstä komponentista riippuen. Tärkeintä on saada aikaan systeemi, joka toimii parhaalla mahdollisella tavalla. Siksi esimerkiksi membraanimoduulin jokaista osaa ei ole kannattavaa 3D-tulostaa, vaan on syytä tarkastella missä saadaan tämänhetkisillä teknologioilla jonkinlainen etu verrattuna perinteiseen. Osassa erotusmenetelmiä käyttöön tulevat lisäävällä valmistuksella tuotetut komponentit ovat jo valmiita hyödynnettäviksi kaupallisesti, mutta monessa tilanteessa aiheista on tehty vasta muutamia tutkimuksia. Näiden sovellusten kohdalla voidaan tilannekohtaisesti pohtia, onko 3D-tulostusta mahdollista soveltaa tarkasteltuun kohteeseen. Monessa tilanteessa tutkimustulokset ovat olleet lupaavia, ja kehityksen edetessä 3D-tulostettujen kaupallisten komponenttien määrä todennäköisesti lisääntyy tulevaisuudessa.

Yrityksillä on omat vakiintuneet tuotantoverkkonsa eri tekijöineen ja kumppaneineen. Niillä voi olla vaihtelevat resurssit tuotannon muuttamisen ja uudistamisen suhteen, eikä aina nähdä syytä korvata pitkään käytettyjä ja toimivia menetelmiä. Siksi onkin tärkeää, että tuodaan esille erotustekniikan prosessien mahdollisuus kehittyä lisäävän valmistuksen avulla. Etenkin tutkimusryhmät ja yliopistot voivat osaltaan vaikuttaa menetelmän käytön lisäämiseen kasvattamalla yhteistyötä yritysten välillä ja siten lisäämällä tietoisuutta 3D-tulostuksen käyttömahdollisuuksista.

Erotus- ja puhdistustekniikoissa on edelleen monia alueita, joita voitaisiin parantaa ja saada tehokkaammiksi. 3D-tulostuksen avulla onkin syytä pyrkiä löytämään ratkaisuja niihin ongelmiin, joihin ei tähän asti ole saatu ratkaisua perinteisten valmistusmenetelmien avulla tuotettujen komponenttien avulla. Näitä ovat esimerkiksi membraanien likaantuminen ja monissa erotusprosesseissa erotuksen tehokkuus sekä spesifisyys. Nykyään ympäristöasiat ovat tärkeässä asemassa, ja näihin pyritään vaikuttamaan koko prosessin laajuudelta. Lisäävä valmistus voi esimerkiksi olla vähemmän jätettä tuottava valmistusmenetelmä erotuksessa käytettävälle komponentille. Ympäristövaikutus voi tulla myös komponentin toiminnan kautta, jos erotus on tehokkaampaa uudella osalla.



Maailmanlaajuisesti teollisuuden ongelmakohdat ovat pitkälti ympäristöön liittyviä. Yritysten pääasiallisena tarkoituksena on tuottaa pääomaa, joten tämäkin on otettava huomioon tuotantoa suunniteltaessa. 3D-tulostus tulisikin esittää menetelmänä, joka pienten tuotantomuutosten avulla tarjoaa ratkaisun useisiin erotus- ja puhdistustekniikan keskeisiin ongelma-kohtiin. Tätä kautta yritykset voivat alkaa osoittaa enemmän mielenkiintoa menetelmää kohtaan ja siten kehittää sitä eteenpäin. On tärkeää muistaa, että myös lisäävän valmistuksen teknologioita on kehitettävä eteenpäin, jolloin niiden laajempi käyttö erotustekniikan komponenttien valmistuksessa mahdollistuu rajoitteiden vähentyessä.

## Lähdeluettelo

1. 3D printing could transform future membrane technology, [verkkodokumentti]. [viitattu 6.1.2019]. Saatavissa: [https://ac-els-cdn-com.ezproxy.cc.lut.fi/S0958211817300770/1-s2.0-S0958211817300770-main.pdf?\\_tid=61af5b35-50a2-4e3e-9398-b500543f3dee&acdnat=1546790881\\_b2456bb0097b53f2dfdc0185b6188db](https://ac-els-cdn-com.ezproxy.cc.lut.fi/S0958211817300770/1-s2.0-S0958211817300770-main.pdf?_tid=61af5b35-50a2-4e3e-9398-b500543f3dee&acdnat=1546790881_b2456bb0097b53f2dfdc0185b6188db)
2. Long Y., Pan J., Zhang Q. & Hao Y. 3D printing technology and its impact on Chinese manufacturing. *International Journal of Production Research*, 2017. Vol 55:5. S. 1488-1497. ISSN 1366-588X.
3. Lee J., An J. & Chua C. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*, 2017. Vol 7. S. 120-133. ISSN 2352-9407.
4. Weber A. 3D Printing Myths and Methods. *ASSEMBLY*, 2014. S.38-43.
5. Lee J., Tan W., An J., Chua C., Tang C., Fane A. & Chong T. The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology. *Journal of Membrane Science*, 2015. Vol 499. S. 480-490. ISSN 0376-7388.
6. 10. Kerns, J. THE EVER-SHRINKING LIMITATIONS OF 3D Printing. *Machine Design*, 2015. Vol 87. S. 50. ISSN 00249114.
7. Xu X., Meteyer S., Perry N. & Zhao Y. Energy consumption model of Binder-jetting additive manufacturing processes. *International Journal of Production Research*, 2014. Vol 53. S. 7005-7015. ISSN 1366-588X.
8. Shim D., Baek G., Seo J., Shin G., Kim K. & Lee K. Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process. *Optics & Laser Technology*, 2016. Vol 86. S. 69-78. ISSN 0030-3992.
9. Piili, H., Hirvimäki M., Väistö T., Nyamekye P., Pekkarinen J., Salminen A. Katsaus lisäävän valmistuksen (aka 3D-tulostus) mahdollisuuksiin ja kustannuksiin metallisten tuotteiden valmistuksessa. FAST COINS-projekti, 2014.
10. Shim D., Baek G., Lee E. Effect of substrate preheating by induction heater on direct energy deposition of AISI M4 powder. *Materials Science & Engineering A*, 2017. Vol 682. S. 550-562. ISSN 0921-5093.
11. Konepajamiesten seminaari, 3D-tulostuksen teknologiat, [verkkodokumentti]. [viitattu 23.5.2019]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/2277932-Konepajamiesten-seminaari-3d-tulostuksen-teknologiat.html>
12. Hafkamp T., van Baars G., de Jager B., Etman P. A feasibility study on process monitoring and control in vat photopolymerization of ceramics. *Mechatronics*, 2018. Vol 56. S. 220-241. ISSN 0957-4158.
13. Ligon S., Liska R., Stampfl J., Gurr M., Mühlaupt R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*, 2017. Vol 117. S. 10212-10290.
14. Kalsoom U., Hasan C., Tedone L., Desire C., Li F., Breadmore M., Nesterenko P., Paull B. Low-Cost Passive Sampling Device with Integrated Porous Membrane Produced Using Multimaterial 3D printing. *Analytical Chemistry*, 2018. Vol 90. S. 12081-12089.
15. Sreedhar N., Thomas N., Al-Ketan O., Rowshan R., Hernandez H., Abu Al-Rub R., Arafat H. 3D-printed feed spacers based on triply periodic minimal surfaces for flux

enhancement and biofouling mitigation in RO and UF. *Desalination*, 2018. Vol 425. S. 12-21. ISSN 0011-9164.

16. 3D printing creates patterned membranes, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.3.2019]. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0958211816302531?via%3Dihub>

17. Atkinson S. NanoSun sets up Singapore's first 3D-printing plant for water filtration membranes. *Technology Focus*, 2018. S.10-11.

18. Low X., Chua Y., Ray B., Mattia D., Metcalfe I., Patterson D. Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of Membrane Science*, 2017. Vol 523. S. 596-613. ISSN 0376-7388.

19. Armbruster S., Cheong O., Lölsberg J., Popovic S., Yüce S., Wessling M. Fouling mitigation in tubular membranes by 3D-printed turbulence promoters. *Journal of Membrane Science*, 2018. Vol 554. S. 156-163. ISSN 0376-7388.

20. Tsai H., Huang A., Fajar soesanto J., Luo Y., Hsu T., Chen C., Hwang K., Ho C., Tung K. 3D printing design of turbulence promoters in a cross-flow microfiltration system for fine particles removal. *Journal of Membrane Science*, 2019. Vol 573. S. 647-656. ISSN 0376-7388.

21. Arenas L., de León P., Walsh F. 3D-printed porous electrodes for advanced electrochemical flow reactors: A Ni/stainless steel electrode and its mass transport characteristics. *Electrochemistry Communications*, 2017. Vol 77. S. 133-137. ISSN 1388-2481.

22. Areir M., Xu Y., Zhang R., Harrison D., Fyson J., Pei E. A study of 3D printed active carbon electrode for the manufacture of electric double-layer capacitors. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017. Vol 25. S.351-356. ISSN 1526-6125.

23. Ji Y., Ma Y., Ma Y., Asenbauer J., Passerini S., Streb C. Water decontamination by polyoxometalatefunctionalized 3D-printing hierarchial porous devices. *ChemComm*, 2018. Vol 54. S. 3018-3021

24. Lahtinen E., Kivijärvi L., Tatikonda R., Väisänen A., Rissanen K., Haukka M. Selective recovery of gold from electronic waste using 3D-printed scavenger. *ACS Omega*, 2017. Vol 2. S. 7299-7304.

25. Dong Y., Fan S., Shen Y., Yang J., Yan P., Chen Y., Li J., Guo J., Duan X., Fang F., Liu S. A Novel Bio-carrier Fabricated Using 3D Printing Technique for Wastewater Treatment. *Scientific Reports*, 2015. Vol 5. S. 1-10. ISSN 12400.

26. Mardani S., Ojala L., Uusi-Kyyny P., Alopeus V. Development of a unique modular distillation column using 3D printing. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2016. Vol 109. S.136-148. ISSN 0255-2701.

27. Simon U., Dimartino S. Direct 3D printing of monolithic ion exchange adsorbers. *Journal of Chromatography A*, 2019. Vol 1587. S.119-128. ISSN 0021-9673.

28. Hu L., Guibin J. 3D Printing Techniques in Environmental Science and Engineering Will Bring New Innovation. *Environmental Science and Technology*, 2017. Vol 51. S. 3597-3599.

29. Bechtold S. 3D Printing, Intellectual Property and Innovation Policy. Springer, 2016. Vol 47. S. 517-536.

30. Simons M. Additive manufacturing—a revolution in progress? Insights from a multiple case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. Vol 96. S. 735-749.
31. Additive Manufacturing transforms RF antenna design, [verkkodokumentti]. [viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: <https://www.metal-am.com/additive-manufacturing-transforms-rf-antenna-design/>
32. Piili, H. Metallien 3D-tulostus — globaali teollinen standardi. *Uudistuvat tuotantoteknologiat*, 2019.
33. Randolph S. 3D Printing What are the Hazards?. *Workplace Health & Safety*, 2018. S.164.
34. 3DStep tarjoaa räätälöityjä koulutuksia 3D-tulostuksen hyödyntämiseen ja käyttöönoton, [verkkodokumentti]. [viitattu 14.2.2019]. Saatavissa: <http://www.3dstep.fi/palvelut/koulutus/>
35. Piili Heidi, Salminen Antti. Näin opetan lisäävää valmistusta ja 3D-tulostusta: Pohdintoja uuden teknologian opetuksesta ja koulutuksesta. *Pohdintoja 3D-tulostuksen opetuksesta*, 2016.
36. Öberg C., Shams T., Asnafi N. Additive manufacturing and Business Models: Current Knowledge and Missing Perspectives. *Technology Innovation Management Review*, 2018. Vol 8. S.15-33.
37. Ituarte I., Salmi M., Ballardini R., Tuomi J., Partanen J. Additive Manufacturing in Finland: Recommendations for a Renewed Innovation Policy. *Physics Procedia*, 2017. Vol 89. S. 70-79. ISSN 1875-3892.
38. VTT's 3DMetalprint: Kohti digitaalista vallankumousta, [verkkodokumentti]. [viitattu 27.2.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/palvelut/%C3%A4lyk%C3%A4s-teollisuus/tulevaisuuden-tehdas/valmistusmenetelm%C3%A4t/3d-tulostus>
39. First Metso valves with 3D printed parts shipped to a customer, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.3.2019]. Saatavissa: <https://www.metso.com/news/2018/12/first-metso-valves-with-3d-printed-parts-shipped-to-a-customer/>