

Ilmari Pohjavirta

3D-TULOOSTAMISEN ASEMA NYKY- HAMMASLÄÄKETIETEESSÄ

Keraamiset hammaskruunut, ortodonttiset mallit ja
implanttien kirurgiset ohjaimet

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistotutkija Eeva Järvenpää
Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Ilmari Pohjavirta: 3D-tulostamisen asema nykyhammaslääketieteessä – Keraamiset hammaskruunut, ortodonttiset mallit ja implanttien kirurgiset ohjaimet

Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Joulukuu 2021

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin 3D-tulostamisen asemaa nykyhammaslääketieteessä, sekä arvioitiin, mihin suuntaan 3D-tulostamisen asema hammaslääketieteessä voisi tulevaisuudessa olla siirtymässä. Tutkimus suoritettiin kirjallisuusselvityksenä, jossa tutkimusongelmaan vastattiin arvioimalla kolmen eri hammaslääketieteeseen liittyvän 3D-tulostamisen sovelluksen nykyistä asemaa hammaslääketieteessä, sekä arvioitiin, mihin suuntaan nykyinen asema voisi tulevaisuudessa olla siirtymässä. Nämä kolme sovellusta olivat täysin keraamisen hammaskruunun 3D-tulostaminen, ortodonttisen tutkimusmallin 3D-tulostaminen sekä implanttikirurgiaan liittyvän kirurgisten ohjaimen 3D-tulostaminen. Tutkimuksessa hyödynnettiin vain vuotta 2002 tuoreempaa lähdeaineistoa, joka koostui tieteellisistä artikkeleista sekä alan kirjallisuudesta.

Tutkimuksessa selvitettiin ensin 3D-tulostamisen sekä tutkimuksen kohteena olleiden 3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovelluksien perusteoria. Tämän jälkeen arvioitiin 3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovellusten nykyistä sekä mahdollista tulevaisuuden asemaa lähdeaineistoa hyödyntäen.

Tutkimuksessa selvisi, että täysin keraamisten hammaskruunujen 3D-tulostaminen on vasta tutkimusvaiheessa. 3D-tulostamista on tutkittu viidellä eri 3D-tulostustekniikalla sekä kolmella eri materiaalilla, mutta kliiniseen käyttöön hyväksyttäviä täysin keraamisia hammaskruunuja ei ole vielä tutkimuksista huolimatta onnistuttu 3D-tulostamaan. Ongelmat ilmenivät eri 3D-tulostimien käsittelyparametreissa, ja tulevaisuuden asema riippuu pitkälti siitä, onnistutaanko jonkin tutkitun 3D-tulostustekniikan käsittelyparametrit optimoimaan sille tasolle, että kliiniseen käyttöön hyväksyttäviä täysin keraamisia hammaskruunuja pystyttäisiin onnistuneesti 3D-tulostamaan.

Ortodonttisen tutkimusmallin 3D-tulostaminen on mahdollista nykytekniikoilla ja niitä myös 3D-tulostetaan hammashoitosten yhteydessä. Yleisimmät käytössä olevat tulostustekniikat ovat DLP- (Digital light processing) ja SLA- (Stereolithography) tekniikat. Tulevaisuudessa halvat LCD- (Liquid crystal display) pohjaiset 3D-tulostimet saattavat yleistyä ortodonttisten tutkimusmallien 3D-tulostamisessa. Valmistusmateriaalit ovat hartsipohjaisia polymeerejä. Hammashoidon yleinen digitalisoituminen saattaa johtaa 3D-tulostettujen ortodonttisten tutkimusmallien yleistymiseen.

Implanttikirurgiaan liittyviä kirurgisia ohjaimia pystytään 3D-tulostamaan ja niitä myös 3D-tulostetaan hammashoitosten yhteydessä. Kirurgisia ohjaimia pystytään 3D-tulostamaan DLP-, SLA- ja PolyJet-tekniikoilla. Valmistusmateriaalit ovat hartsipohjaisia polymeerejä. Tulevaisuudessa kirurgisia ohjaimia saatetaan 3D-tulostaa myös FDM-tekniikalla, mikäli FDM-tekniikassa hyödynnettävät materiaalit hyväksytään kliiniseen käyttöön sopiviksi. Tämä saattaa alentaa kirurgisten ohjaimien hintaa.

Avainsanat: 3D-tulostaminen, keraaminen hammaskruunu, ortodonttinen tutkimusmalli, kirurginen ohjain

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Ilmari Pohjavirta: The role of 3D-printing in modern dentistry – Ceramic crowns, orthodontic study models and implant surgical guides

Bachelor's thesis

Tampere University

Degree Programme in Mechanical Engineering

December 2021

This bachelor's thesis investigated the role of 3D printing in contemporary dentistry and assessed the direction in which the role of 3D printing in dentistry could be moving in the future. The study was conducted as a literature review, in which the research problem was answered by evaluating the current position of three different dental 3D printing applications in dentistry and assessing the direction in which the current position could be moving in the future. These three applications were 3D printing of a fully ceramic dental crown, 3D printing of a physical orthodontic study model, and 3D printing of a surgical guide related to implant surgery. Only research data more recent than year 2002, consisting of scientific articles, and literature in the field were used in the study.

The study first investigated the basic theory of 3D printing, as well as the 3D printing applications in dentistry that were the subject of the study. This was followed by an assessment of the current, as well as possible future role of 3D printing in dental applications utilizing source material.

The study revealed that 3D printing of fully Ceramic dental crowns is still in the research phase. 3D printing has been studied with five different 3D printing techniques, as well as with three different materials, but despite the studies, fully ceramic dental crowns acceptable for clinical use have not yet been successfully printed in 3D. Problems arose in the processing parameters of various 3D printers, and the future position will largely depend on the success of the processing parameters of any of the 3D printing techniques studied to optimize the level of clinically acceptable fully ceramic dental crowns for 3D printing.

3D printing of orthodontic study models is possible with current technologies, and they are also 3D printed in connection with dental treatments. The most common printing technologies used are DLP (Digital light processing) and SLA (Stereolithography) technologies. In the future, cheap LCD- (Liquid crystal display) based 3D printers may become more common in 3D printing of orthodontic study models. The materials used are resin-based polymers. The general digitalization of dentistry may lead to the proliferation of 3D-printed physical orthodontic study models.

Surgical guides related to implant surgery can be 3D printed, and they are also 3D printed in connection with dental treatments. Surgical guides can be 3D printed using DLP, SLA and PolyJet technologies. The materials used are resin-based polymers. In the future, surgical guides may also be 3D printed using FDM technology if the materials utilized in FDM technology are approved for clinical use. This may lower the cost of surgical guides.

Keywords: 3D-printing, ceramic dental crown, orthodontic study model, surgical guide

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Hammaslääketieteen soveltamiseen liittyy läheisesti ihmisten auttaminen. Varmasti moni meistä tietää, miten helpottavalta tuntuu päästä viimein hammaslääkəriin, jossa hammaslääkəri operoi kipeän hampaan jälleen kuntoon. Tekniikan opiskelijana pystyn puolestaan näkemään, kuinka suuri potentiaali liittyy nykyaikaisiin teknologioihin sekä niiden olemassa oleviin sovelluksiin. Kiinnostus ihmisten auttamiseen synnytti halun tutkia, onko hammaslääketieteessä pystytty hyödyntämään kaikki se tekninen tietämys, mitä teknillinen puoli pystyy nykypäivänä tarjoamaan.

Haluan lämpimästi kiittää ohjaajaani Eeva Järvenpäättä, joka jaksoi esimerkillisesti ohjata kandityöni kirjoittamista, kaamosajan pimeydestä huolimatta. Ilman hänen panostaan kandityöni kirjoittaminen olisi ollut huomattavasti nykyistä raskaampi prosessi. Erityinen kiitos kuuluu myös kielenhuollollisissa kysymyksissä auttaneelle yliopisto-opettaja Suvi Pelliselle, jonka joustava ja oppilaan yksilönä huomioiva työskentelytapa tuli kirjoitusprosessin aikana ilahduttavalla tavalla ilmi. Haluan kiittää myös kirjaston henkilökuntaa hyödyllisiksi osoittautuneista neuvoista tiedon hakemiseen liittyen.

Tampereella, 10.12.2021

Ilmari Pohjavirta

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. 3D-TULOSTAMISEN PERUSTEET	3
2.1 3D-tulostamisen yleinen toimintaperiaate.....	3
2.2 Erilaisia 3D-tulostusmenetelmiä	4
3.TAUSTATEORIAA TUTKITUISTA HAMMASLÄÄKETIETEEN TUOTTEISTA.....	10
3.1 Hammaskruunut.....	10
3.1.1 Hammaskruunun toimintaympäristö.....	10
3.1.2 Synteettiset keraamiset hammaskruunut	11
3.2 Ortodonttiset tutkimusmallit	13
3.3 Kirurgiset ohjaimet implanttikirurgiaan.....	15
4.3D-TULOSTAMISEN HAMMASLÄÄKETIETEEN SOVELLUKSET	18
4.1 Täysin keraamisten hammaskruunujen 3D-tulostaminen	18
4.1.1 Nykyiset mahdollisuudet ja ongelmat	18
4.1.2 Materiaalit	19
4.2 Ortodonttisen tutkimusmallin 3D-tulostaminen	20
4.2.1 Nykyiset mahdollisuudet ja ongelmat	21
4.2.2 Materiaalit	22
4.3 Implanttien kirurgisien ohjaimien 3D-tulostaminen	23
4.3.1 Nykyiset mahdollisuudet ja ongelmat	23
4.3.2 Materiaalit	24
5.JOHTOPÄÄTÖKSET	25
6.YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	Three-dimensional, kolmiulotteinen
CAD	Computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CBCT	Cone beam computed tomography, kartiokeilatietokonetomografia
CGIP	Computer-guided implant placement, tietokoneohjattu implantin asennus
DED	Direct energy deposition, suorakerrostus
DIP	Direct ink printing, suora mustetulostus
DLP	Digital light processing, digitaalinen valoprosessi
DMD	Direct metal deposition
DMLS	Direct metal laser sintering, suora metallilasersintraus
DOD	Drop on demand
EBM	Electron beam melting, elektronisuihkusulatus
FDM	Fused deposition modeling, sulatepinnoitusmallinnus
FFF	Fused filament fabrication, fuusioitunut filamenttitulostus
LCD	Liquid crystal display, nestekidenäyttö
LOM	Laminated object manufacturing
MJ	Material jetting, materiaalin suihkut
MJP	Multijet printing, multijet-tulostus
PBF	Powder based fusion / Powder bed fusion, jauhepetisulatus
pH	Potential of hydrogen, vetyionien määrä
PolyJet	Photopolymer jetting, fotopolymeerisuihkut
SL	Sheet lamination, kerroslaminointi
SLA	Stereolithography, stereolitografia
SLM	Selective laser melting, selektiivinen lasersulatus
SLS	Selective laser sintering, valikoiva lasersintraus
UAM	Ultrasonic additive manufacturing
UV	Ultraviolet, ultravioletti

1. JOHDANTO

3D-tulostamisen asema valmistusmenetelmänä kasvaa nopeasti (Awari et al. 2021, s. cvii). Tulostustekniikoita ja tulostettavia materiaaleja kehitetään jatkuvasti eri toimialojen tarpeisiin. Yksi toimialoista on hammashoito, minkä tarpeisiin sopivien 3D-tulostimien hintataso on tippunut dramaattisesti viimeisen viiden vuoden aikana (Cousley 2020).

Hammaslääketieteeseen liittyy eri yhteyksissä hyvin tarkkojen kolmiulotteisten muotojen tuottaminen. Esimerkiksi synteettisen hammaskruunun pintamuodolla on vaikutusta hampaan kokemaan jännitysjakaumaan ja tämä puolestaan vaikuttaa hampaan murtumisalttiuteen (Kim et al. 2019). Hammaskirurgiassa puolestaan on olemassa riski hermoon poraamisesta, mitä voidaan pienentää käyttämällä tarkkaan kolmiulotteiseen muotoon valmistettuja porausohjaimia (Parashis & Diamantopoulos 2013, s. 4,18). 3D-tulostaminen valmistusmenetelmänä mahdollistaa monimutkaisten kolmiulotteisten muotojen tuottamisen tietoteknisen 3D-datan pohjalta, joka voi olla mitattu esimerkiksi potilaasta erilaisten skannereiden avulla (Kim et al. 2018). Hammaslääketieteeseen liittyykin suuri potentiaali hyödyntää 3D-tulostamista tavoiteltaessa personoidumpia, halvempia sekä mutkattomammin toteutettavissa olevia hammashoitoon liittyviä teknisiä ratkaisuja. 3D-tulostamisen kysyntä hammashoidossa onkin lisääntynyt viime vuosien aikana tekniikan kehittymisen myötä. Tekninen kehitys on johtanut siihen, että 3D-tulostaminen pystyy tarjoamaan hammaslääketieteellisissä toimenpiteissä suurta tarkkuutta ja suorituskykyä, jotka samalla vähentävät potilaille mahdollisesti aiheutuvia hoitoon liittyviä vaurioita. (Lin et al. 2019)

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan, millainen on 3D-tulostamisen nykyinen asema hammaslääketieteen sovelluksissa. Tämän lisäksi arvioidaan, mihin suuntaan 3D-tulostamisen asema voisi mahdollisesti tulevaisuudessa kehittyä toimialalla. Työssä tarkastellaan kolmea eri hammashoitoon liittyvää sovellusta, joissa tarkka kolmiulotteinen muoto on avainasemassa. Sovellukset ovat hammaskruunun (dental crown) valmistaminen hammasproteesien yhteydessä, hampaiston ortodonttisen mallin valmistaminen oikomishoitoihin liittyen (orthodontic study model) sekä erilaiset 3D-tulostetut porausohjaimet (surgical guide). Kyseiset sovellukset valikoituivat kandidaatintyöhöni sen mukaan, minkä sovellusten uskon hyötyvän 3D-tulostamisesta valmistusmenetelmänä mahdollisesti jo

nyt, tai vähintäänkin tulevaisuudessa. Kandidaatintyössä 3D-tulostamisen nykyistä asemaa arvioidaan etsimällä vastauksia kolmeen seuraavaksi lueteltavaan kysymykseen: Millä eri 3D-tulostustekniikoilla tutkittavia sovelluksia on tulostettu? Onko jollain 3D-tulostustekniikalla tulostettu sovellus hyväksytty kliiniseen käyttöön sopivaksi? Mitä 3D-tulostusmateriaaleja on ollut tutkimuksen alla tai mahdollisesti jo kliinisessä käytössä? 3D-tulostamisen tulevaa asemaa eri sovellusten yhteydessä arvioidaan vastaamalla kysymykseen: onko tutkimuksissa mainittu joitakin haasteita tai mahdollisuuksia, jotka puhuvat sen puolesta, että 3D-tulostamisen asema eri sovellusten yhteydessä saattaisi olla kehittymässä johonkin tiettyyn suuntaan?

Työ rajataan käsittelemään ainoastaan täysin keraamisten hammaskruunujen valmistamista 3D-tulostimien avulla. Työn ulkopuolelle rajataan 3D-tulostamiseen läheisesti liittyvien kuvantamismenetelmien tarkempi tarkastelu. Kandidaatintyö kirjoitetaan kirjallisuusselvityksenä, jossa hyödynnetään vain vuotta 2002 tuoreempaa lähdekirjallisuutta. 3D-tulostamisen asemaa nykyhammaslääketieteessä analysoivassa luvussa 4 hyödynnetään vain vuotta 2018 tuoreempaa lähdekirjallisuutta. Kandidaatintyössä englanninkieliset termit on suomennettu siltä osin, kun niille on suomen kielessä olemassa vastine.

Kandidaatintyössä esitellään ensin yleisellä tasolla 3D-tulostamiseen liittyvät perusperiaatteet luvussa 2 sekä esitellään yleisesti kolme tutkittavaa hammaslääketieteen sovellusta luvussa 3. Tämän jälkeen luvussa 4 arvioidaan 3D-tulostamisen teknistä suorituskykyä sekä käytössä olevia materiaaleja kolmen tutkitun hammaslääketieteen sovellusten valmistamisen yhteydessä. Työn lopussa luvussa 5 arvioidaan luvun 4 havaintoihin perustuen 3D-tulostamisen asemaa hammaslääketieteessä.

2. 3D-TULOSTAMISEN PERUSTEET

Tässä luvussa käsitellään yleistä asiaa 3D-tulostamisesta. Ensimmäisessä alaluvussa 2.1 esitellään pääpiirteittäin 3D-tulostamisen yleinen toimintaperiaate sekä tekniikasta käytettävä termit. Alaluvussa 2.2 puolestaan esitellään lyhyesti joitakin olemassa olevia 3D-tulostusmenetelmiä keskittyen niiden tekniseen toimintaperiaatteeseen sekä tekniikoille ominaisiin vahvuuksiin ja heikkouksiin.

2.1 3D-tulostamisen yleinen toimintaperiaate

Ainetta lisäävällä valmistuksella (AM, *additive manufacturing*) tarkoitetaan tietoteknisen 3D-datan (CAD, Computer-aided design) pohjalta suoritettavaa materiaalia lisäävää valmistamista, jossa ei tarvitse hyödyntää osariippuvaisia materiaalia poistavia työvaiheita, kuten esimerkiksi sorvausta ja porausta. 3D-tulostaminen puolestaan on yleistermi, jolla tarkoitetaan kaikkia valmistusmenetelmiä, jossa kappale valmistetaan automatisoidusti kerroksittain. Ainetta lisäävä valmistaminen, AM ja 3D-tulostaminen sisältävät kaikki mahdolliset prosessit, jotka liittyvät materiaalin järjestämiseen fyysiseksi kappaleeksi kappaleen tuotannossa. (Gebhardt et al. 2019, s. 1–3)

3D-tulostaminen siis tarkoittaa valmistusmenetelmää, jossa kappale rakentuu automaattisesti kerros kerrokselta materiaalia lisäämällä. On olemassa monia erilaisia 3D-tulostustekniikoita, jotka kaikki pohjautuvat materiaalin lisäämiseen. 3D-tulostustekniikat voidaan jaotella seitsemään erityyliseen valmistusprosessiin, joihin pohjautuvat tällä hetkellä olemassa olevat 3D-tulostustekniikat (Awari et al. 2021, s. 5). Seuraavan sivun taulukkoon 1 on koottu edellä mainitut seitsemän erilaista valmistusprosessia sekä joitakin olemassa olevia 3D-tulostustekniikoita, jotka pohjautuvat kirjaan *Additive Manufacturing and 3D Printing Technology: Principles and Applications*.

Taulukko 1. Valmistusprosessit ja käytössä olevat tekniikat. Koottu lähteestä (Awari et al. 2021, s. 6,16).

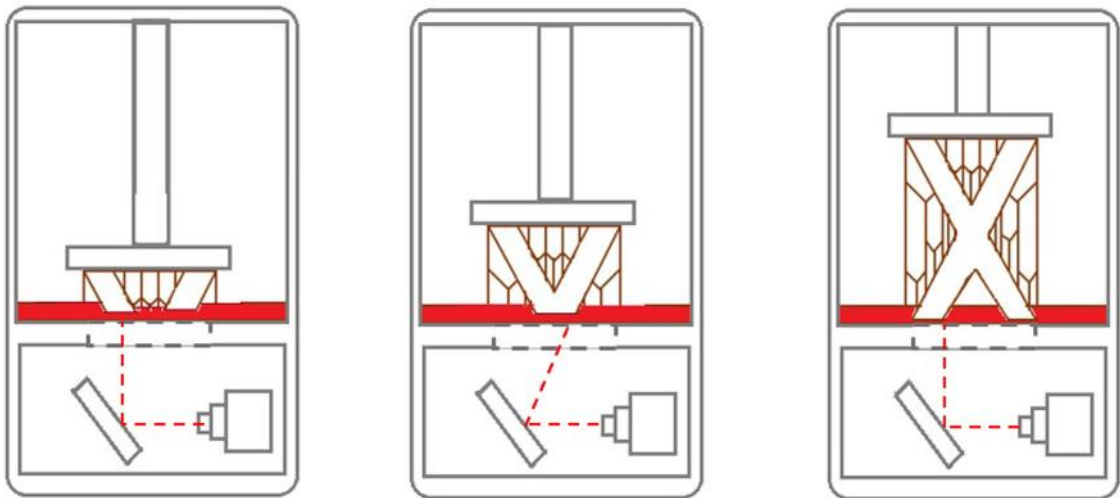
Valmistusmenetelmä	Tekniikka		
Materiaalin pursotus (ME, Material extrusion)	FDM/FFF (Fused deposition modeling / Fused filament fabrication, Sulatepinnoitusmallinnus / fuusioitunut filamenttittulostus)		
Valokovetus altaassa (Vat polymerization)	SLA (Stereolithography, stereolitografia)	DLP (Digital light processing, digitaalinen valo prosessi)	
Jauhepetisulatus (PBF, Powder bed fusion / Powder based fusion)	SLS (Selective laser sintering, valikoiva lasersintraus)	DMLS/SLM (Direct metal laser sintering / Selective laser melting, suora metallilasersintraus / selektiivinen lasersulatus)	EBM (Electron beam melting, elektroni-suihkusulatus)
Materiaalin suihkutus (MJ, Material jetting)	MJ (Material jetting, materiaalin suihkutus)	DOD (Drop on demand)	
Sideaineen suihkutus (BJ, Binder jetting)	Hiekkasideaineen suihkutus (Sand binder jetting)	Metallisideaineen suihkutus (Metal binder jetting)	
Kerros laminointi (SL, Sheet lamination)	LOM (Laminated object manufacturing)	UAM (Ultrasonic additive manufacturing)	
Suorakerrostus (DED, Direct energy deposition)	DMD (Direct metal deposition)		

2.2 Erilaisia 3D-tulostusmenetelmiä

Stereolitografia

Stereolitografiatekniikassa (SLA, stereolithography) lisäävä valmistaminen toteutetaan tekniikalla, jossa ohjelmoidusti kulkeva ultraviolettisäde (UV, ultraviolet) polymeroi UV-polymeroituvan nesteen pintaa vastaamaan valmistettavan kappaleen poikkileikkausta.

Tämän jälkeen rakentuvaa kappaletta siirretään ohjelmoidusti pois nesteen pinnalta, ja UV-säde polymeroi taas uuden kerroksen nesteen pintaan, joka vastaa valmistettavan kappaleen poikkileikkausta. Tätä toistetaan niin kauan, että kappale on valmis (Demiralph et al. 2020). SLA-tekniikan hyvinä puolina voidaan pitää hyvää pinnanlaatua, suurta tarkkuutta, suurta rakennusalustaa sekä valmistamisnopeutta. Huonoina puolina SLA-tekniikalla voidaan nähdä suuri hinta, tarve tukikehykselle sekä pitkät jälkikäsittelyajat (Methani et al. 2020). Myös materiaaleina käytettävät öljypohjaiset lämpökovettuvat muovit kuormittavat ympäristöä (Maines et al. 2021). Kuva 1 havainnollistaa visuaalisesti stereolitografian toimintaperiaatteen.



Kuva 1. Stereolitografian toimintaperiaate (Awari et al. 2021, s. 8).

Digitaalinen valoprosessi

Digitaalinen valoprosessi (DLP, Digital light processing) on muuten peruseriaatteiltaan samanlainen tekniikka kuin SLA, mutta DLP-tekniikassa käytetään digitaalista valoprojektorin, joka heijastaa jokaisen poikkileikkauksen kuvan vain yhden kerran. DLP-tekniikan hyvänä puolena voidaan pitää SLA:takin nopeampaa tulostusnopeutta (Awari et al. 2021, s. 8). Huonona puolena DLP-tekniikkaan liittyy SLA:n tavoin öljypohjaisten lämpökovettuvien muovimateriaalien ympäristöä kuormittavat vaikutukset (Maines et al. 2021). Kuvassa 2 on tyypillinen pöytämallinen DLP-tekniikkaan perustuva 3D-tulostin.



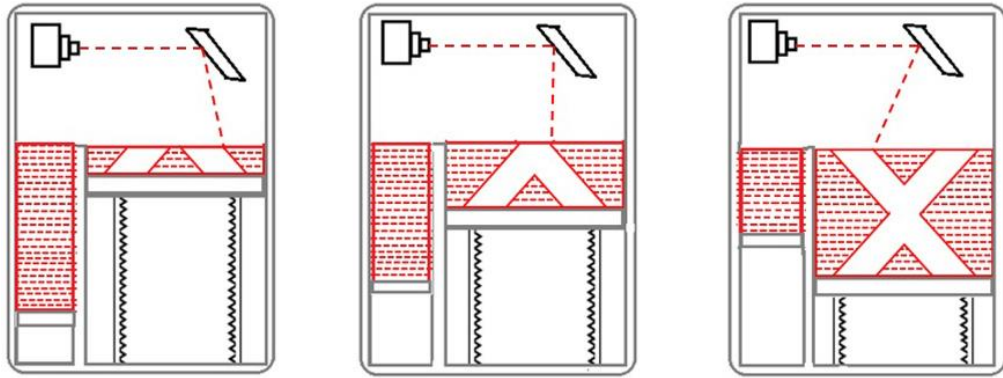
Kuva 2. DLP-tekniikkaan perustuva 3D-tulostin (Jaber et al. 2021).

Nestekidenäyttöpohjaiset tulostimet

Nestekidenäyttöpohjaiset tulostimet (LCD, Liquid crystal display) ovat harrastelijakäyttöön suunnattuja tulostimia, joissa varsinainen tulostustekniikka on kopioitu DLP-tulostimista. DLP-tulostimista poiketen UV-valo tuotetaan projektorin sijaan LED-matriisilla, minkä lisäksi tulostimeen käytetyt komponentit ovat DLP-tulostimissa käytettyjä komponentteja halvempia. Hyvänä puolena voidaan pitää ammattitason laitteistoihin nähden huomattavan halpaa hintaa, mutta huonoksi puoleksi muodostuu ammattitason laitteistoja vaatimattomampi tulostustarkkuus. (Io Giudice et al. 2021)

Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus (PBF, Powder bed fusion / Powder based fusion) on ylätermi, johon kuuluvat SLS- (Selective laser sintering, selektiivinen lasersintraus), DMLS- (Direct metal laser sintering, suora metallilasersintraus), SLM- (Selective laser melting, selektiivinen lasersulatus) ja EBM- (Electron beam melting, elektronisuihkusulatus) tulostustekniikat (Demiralph et al. 2020; Awari et al. 2021, s. 6). Yleisellä tasolla PBF perustuu tekniikkaan, jossa lämpöenergiälähde indusoi valikoivasti jauhehiukkasten välistä fuusioitumista kokonaiseksi kappaleeksi rakennusalueen sisällä. PBF-tekniikan hyvinä puolina voidaan pitää halpaa hintaa, sopivuutta prototyyppien valmistamiseen, sekä sitä, ettei se vaadi lisätukirakenteita. PBF-tekniikka soveltuu monimutkaisien kappaleiden valmistamiseen hyvin. (Awari et al. 2021, s. 8–11) Toisaalta PBF-tekniikan huonoina puolina voidaan pitää korkeita teho vaatimuksia, hitautta, sekä sitä, että pinnan laatu riippuu hiukkaskoosta (Methani et al. 2020). Kuva 3 havainnollistaa visuaalisesti jauhepetisulatuksen yleisen toimintaperiaatteen.



Kuva 3. Jauhepetisulatuksen toimintaperiaate (Awari et al. 2021, s. 9).

Sideaineen suihkutetus

Sideaineen suihkutuksessa (BJ, Binder Jetting) nestemäinen sideaine sitoo kerros kerrokselta valikoivasti jauhepetialueita, joista muodostuu lopulta kiinteä kappale (Awari et al. 2021, s. 13–14). BJ-tekniikan hyvinä puolina voidaan pitää nopeutta, sekä sitä, että useita materiaaleja ja värejä voidaan tulostaa peräkkäin. Huonoina puolina BJ-tekniikassa voidaan nähdä pidemmät jälkikäsittelyajat, sekä se, ettei tulostustekniikka sovi materiaaleille, jotka eivät ole yhteensopivia käytetyn sideaineen kanssa (Methani et al. 2020). Kuva 4 havainnollistaa visuaalisesti sideainesuihkutuksen toimintaperiaatteen.



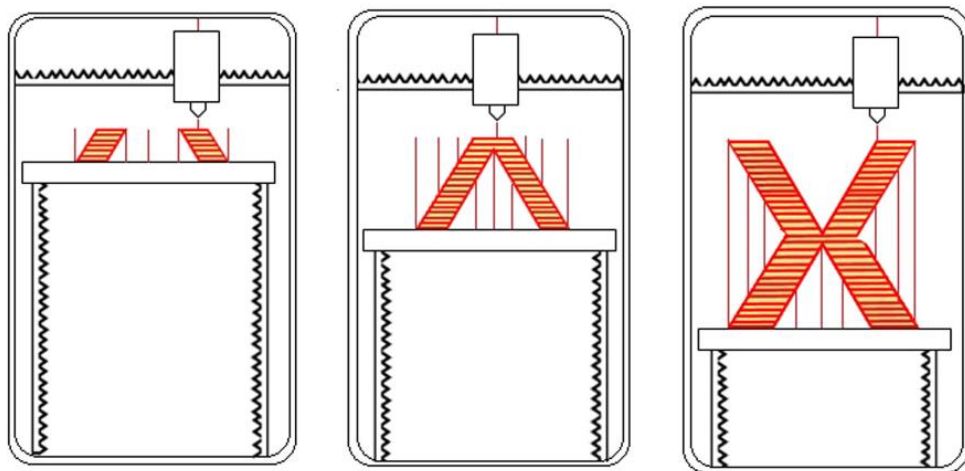
Kuva 4. Sideainesuihkutuksen toimintaperiaate (Awari et al. 2021, s. 13).

Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotus (ME, material extrusion) perustuu prosessiin, jossa kiinteästä kestomuovimateriaalista muodostuva filamentti työnnetään kuumennetun suuttimen läpi. Suuttimessa filamentti sulaa, minkä jälkeen suutin laskee ohjelmoitua reittiä pitkin sulan materiaalin rakennusalan päälle, johon se jähmettyy jäähtyessään muodostaen kiinteän kappaleen (Awari et al. 2021, s. 6–7). ME-tekniikkaa on tutkittu myös keramiikan 3D-tulostamisessa (Methani et al. 2020). Hyvänä puolena materiaalin pursottamisessa voidaan pitää halpaa hintaa. Huonoiksi puoliksi ME-tekniikassa muodostuu suuttimen

halkaisijan vaikutus tulostustarkkuuteen sekä tulostustekniikkaan liittyvä hitaus (Methani et al. 2020).

Fuusioitunut filamentitulostus (FFF, Fused filament fabrication), joka tunnetaan myös nimellä sulatettu kerrostumismallinnus (FDM, Fused deposition modelin), perustuu ME-tekniikkaan, jossa materiaalia pursutetaan kuumennetun putken läpi (Redwood et al. 2017, luku 2). FFF-tekniikan hyvinä puolina voidaan pitää matalia alkukustannuksia sekä matalia materiaalikustannuksia. Valmistuttuaan kappaleet ovat myös lähes käyttövalmiita. Toisaalta FFF-tekniikka ei ole käytössä niin tuottava kuin mitä esimerkiksi DLP-tekniikka on. (Lüchtenborg et al. 2021) Kuva 5 havainnollistaa visuaalisesti materiaalin pursotuksen yleisen toimintaperiaatteen.



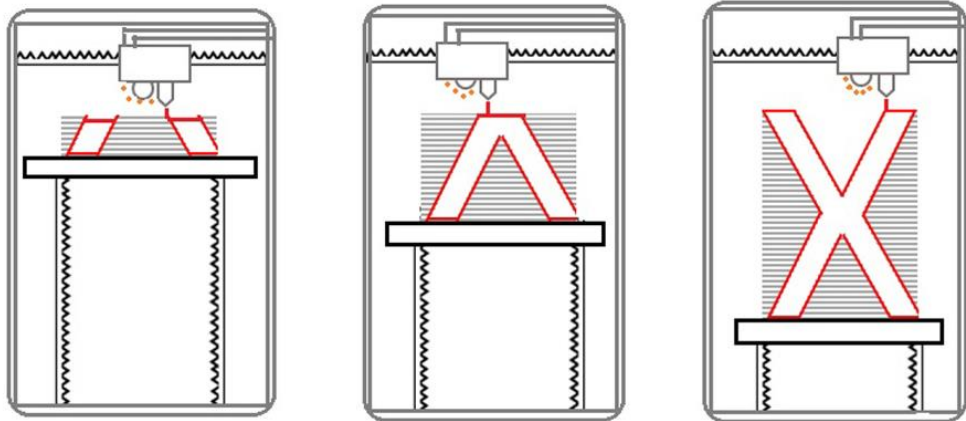
Kuva 5. Materiaalin pursottamisen yleinen toimintaperiaate (Awari et al. 2021, s. 7).

Materiaalin suihkut

Materiaalin suihkutustekniikkaan (MJ, Material jetting) viitataan yleisesti kahdella eri termillä, jotka ovat synonyymeja toisilleen. Kahden eri termin syntymisen taustalla on tulostinvalmistajien oikeudet tuotteidensa nimiin. Nämä käytössä olevat termit ovat PolyJet (Photopolymer jetting, fotopolymeerisuihkutus), jota valmistaa yritys nimeltä Stratasys, sekä MultiJet Printing (MJP, multijet-tulostus), jota valmistaa yritys nimeltä 3DSystems. (Gülcan et al. 2021) Myös termillä suora mustesuihkutulostus (DIP, Direct inkjet printing) voidaan viitata MJ-tekniikkaan (Willems et al. 2021).

Tekniikka pohjautuu nestemäisessä esiasemuodossa olevan materiaalin ohjaamiseen suuttimen kautta juuri oikean kokoisina pisaroina. Materiaalin sisältävät pisarat ohjataan alustalle siirtämällä suutin halutun sijainnin yläpuolelle tai ohjaamalla pisarat oikeaan paikkaan sähköstaattisen kentän avulla. (Derby & Reis 2003) Tekniikalla voidaan tulostaa esimerkiksi valokovettuvia muovihartseja tai valuvahamateriaaleja kerros kerrokselta (Awari et al. 2021, s. 11).

MJ-tekniikan hyviä puolia ovat pintakerrostumien suuri tarkkuus, sekä se, että useita materiaaleja ja värejä voidaan tulostaa peräkkäin. Huonoina puolina DIP-tekniikassa voidaan pitää sitä, että tekniikka rajoittuu materiaaleihin, joita käsitellään musteen muodossa, sekä sitä, että tekniikassa tulee usein tarve tukeville rakenteille. (Methani et al. 2020) Kuva 6 havainnollistaa visuaalisesti materiaalin suihkutustekniikan yleisen toimintaperiaatteen.



Kuva 6. Materiaalin suihkuttamisen yleinen toimintaperiaate (Awari et al. 2021, p. 11).

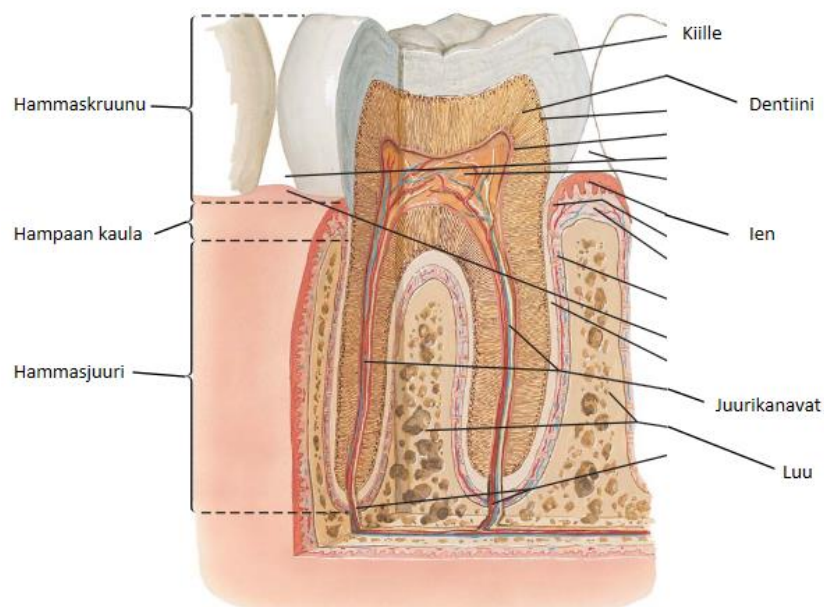
3. TAUSTATEORIAA TUTKITUISTA HAMMASLÄÄKETIETEEN TUOTTEISTA

Tässä luvussa esitellään yleisellä tasolla tutkimukseen liittyvät kolme hammaslääketieteen sovellusta: synteettiset hammaskruunut, ortodonttiset tutkimusmallit sekä kirurgiset ohjaimet. Hammaskruunujen yhteydessä esitellään lyhyesti myös orgaanisen hampaan rakenne sekä sen luonnollinen toimintaympäristö. Hammaslääketieteen sovellukset esitellään luvussa kiinnittäen erityistä huomiota niiden teknisiin yksityiskohtiin.

3.1 Hammaskruunut

3.1.1 Hammaskruunun toimintaympäristö

Hammaskruunulla tarkoitetaan näkyvää osaa hampaasta (Husain 2018). Hammaskruunu alkaa siis ienrajasta ja muodostaa hampaan kontaktipinnan, joka ottaa vastaan purentavoimia sekä kehon ulkopuolisia kemiallisia ärsyksiä. Kehon ulkopuolisista kemiallisista ärsyksistä osan muodostaa kemialliselta luonteeltaan vaihteleva kirjo ravintoa (Lussi et al. 2011). Toisaalta suussa elää valtava kirjo erilaisia mikrobeja, jotka osataan vaikuttavat hammaskruunua ympäröivään kemialliseen ympäristöön (Pitts et al. 2017). Hampaan kruunuosa joutuu siis ottamaan jatkuvasti vastaan erilaisia kemiallisia ja mekaanisia ärsyksiä. Kuvassa 7 havainnollistetaan orgaanisen hampaan anatomista rakennetta.

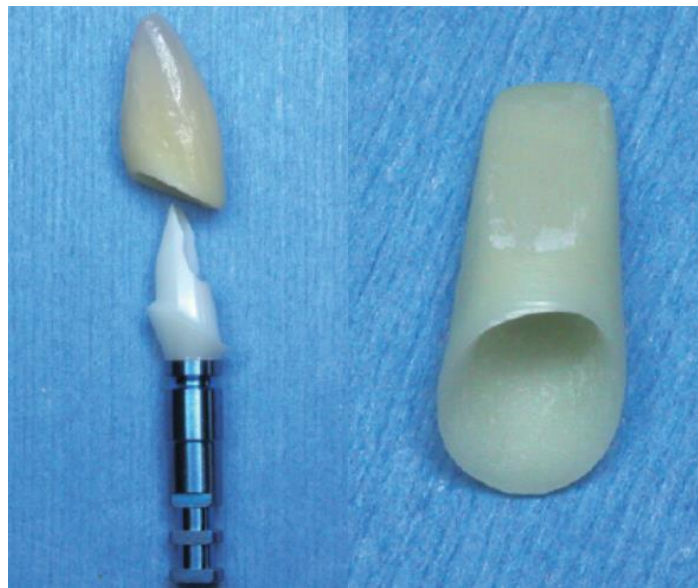


Kuva 7. Hampaan rakenne. Kuva muokattu lähteestä (Norton 2016, s. 359).

3.1.2 Synteettiset keraamiset hammaskruunut

Joissain tapauksissa kehon oma orgaaninen hammas tai hampaan kruunuosa voidaan joutua poistamaan. Syynä voi olla esimerkiksi parodontiitti, trauma tai karieksen aiheuttama vaurio (Zohrabian et al. 2015). Tällöin kyseeseen voi tulla koko hampaan tai hampaan kruunuosan korvaaminen synteettisellä valmisteella tai valmisteilla.

Synteettisiä hammaskruunuja on olemassa useita eri tyyppisiä ja niitä voidaan valmistaa monin eri menetelmin useista eri materiaaleista. On olemassa esimerkiksi täysin keraamisia hammaskruunuja, keraamisia hammaskruunuja, johon on seostettu hartsia, metallokeraamisia hammaskruunuja, joissa metallikuori on päällystetty posliinilla, täysin metallisia hammaskruunuja sekä metallikruunuja, jotka on päällystetty akryylillä tai komposiitilla. (Smith & Howe 2007, luku 2) Kuvassa 8 esiintyy keraamisesta zirkonista valmistettu synteettinen hammaskruunu. Kuvan vasemmassa laidassa esiintyy hammaskruunun lisäksi myös keinojuuri/implantti, johon synteettinen hammaskruunu voidaan asentaa.



Kuva 8. Zirkonista valmistettu keraaminen keinojuureen asennettava hammaskruunu. Muokattu lähteestä (Drago & Peterson 2010, s. 245).

Täysin keraamisten hammaskruunujen valmistusmateriaaleina voidaan käyttää esimerkiksi zirkonia, litiumsilikaattia tai lasikeraameja (Shahmoradi et al. 2020). Myös posliinia voidaan käyttää täysin keraamisten hammaskruunujen valmistamisessa (Smith & Howe 2007, s. 29). Yhdistelmäateriaalit ovat myös mahdollisia synteettisten hammaskruunu-

jen valmistamisessa. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi polymeerit, joihin on imeytetty keramiikkaa sekä erilaiset hybridihartsimateriaalit (Shahmoradi et al. 2020). Täysin metallisten hammaskruunujen tapauksessa valmistusmateriaalina voidaan puolestaan käyttää erilaisia kultaseoksia (Smith & Howe 2007, s. 45).

Metallokeraamisissa kruunuissa metalliosan muodostaa erilaiset metalliseokset. Seokset voivat olla jalometalliseoksia, puolijalometalliseoksia tai epämetalliseoksia. Jalometalliseokset valmistetaan suurelta osin kullasta tai platinasta. Puolijalometalliseokset valmistetaan suurelta osin palladiumista tai hopeasta. Epämetalliseokset puolestaan valmistetaan suurelta osin nikkelistä ja kromista. Metallikuoren päälle tuleva keraaminen pinta voidaan valmistaa esimerkiksi posliinista. (Smith & Howe 2007, s. 37) Kuvassa 9 esiintyy metallokeraaminen hammaskruunu, jossa sisäpinta on valmistettu metallista ja ulkopinta posliinista.



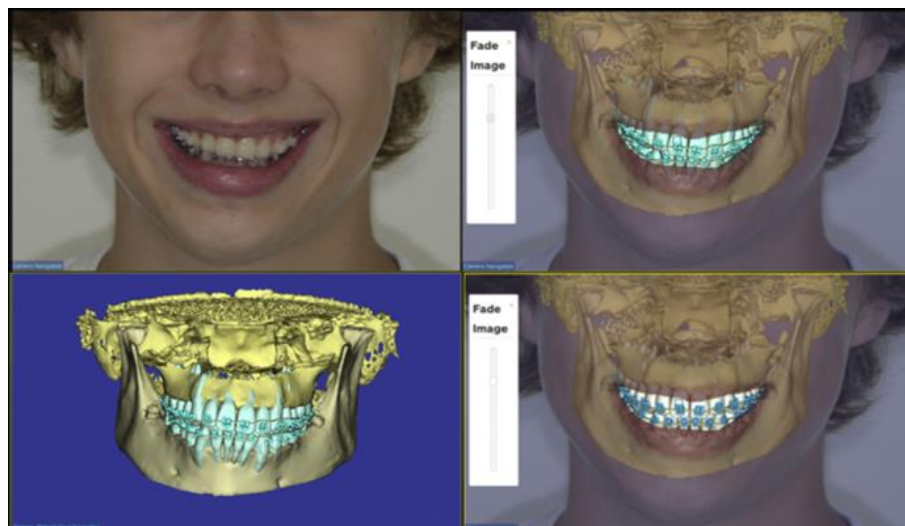
Kuva 9. Metallokeraaminen hammaskruunu (Smith & Howe 2007, s. 32).

Synteettiset keraamiset hammaskruunut voidaan valmistaa nykyään esimerkiksi kolmiulotteiseen jrsintään ja pintahiontaan kykenevillä laitteilla, jotka valmistavat hammaskruunun potilaasta mitatun 3D-datan pohjalta. Ensin potilaasta mitataan erilaisin kuvantamismenetelmin dataa pistepilvimuodossa, joka muunnetaan tietokoneella CAD-muotoiseksi dataksi. CAD-mallin pohjalta voidaan määrittää työstökoneelle työstöradat, joiden pohjalta työstökone voi valmistaa potilaasta mitattua 3D-dataa vastaavan hammaskruunun. (Nam & Kim 2019)

3.2 Ortodontiset tutkimusmallit

Ortodontisilla tutkimusmalleilla tarkoitetaan hampaistosta ja hampaiden purennasta tehtävää staattista mallia, jota oikomishammaslääkärit voivat käyttää hyödykseen oikomishoitoihin liittyvässä diagnostiikassa. Ortodontisia tutkimusmalleja käytetään muun muassa purennan luokittelussa, hampaiden sijainnin analysoimisessa hammaskaarilla sekä hampaiden mahdollisten väärien asentojen määrän ja asteen määrittämisessä. (Krishnan 2021) Ortodontiset tutkimusmallit ovat ratkaisevan tärkeitä myös tutkimuksellisissa ja didaktisissa tarkoituksissa (Becker et al. 2018).

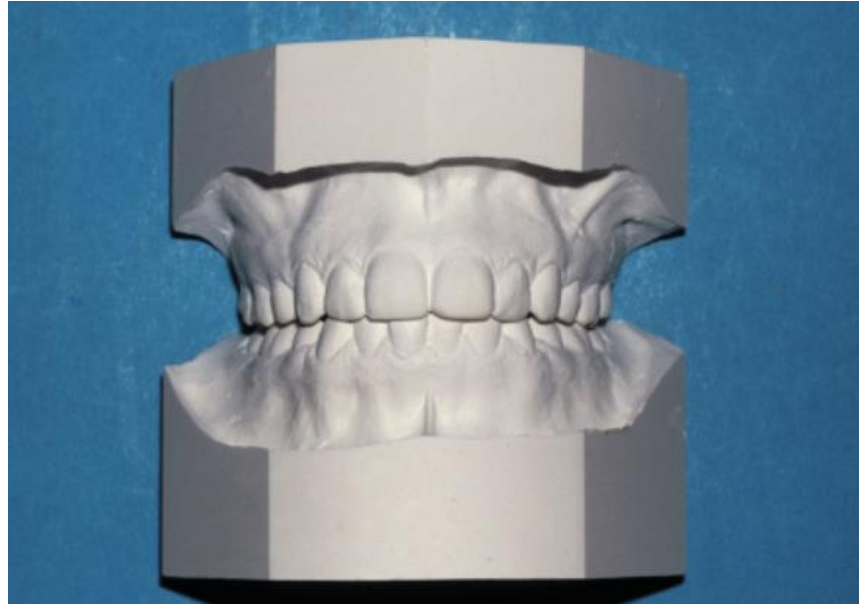
Ortodontiset tutkimusmallit voidaan toteuttaa joko digitaalisesti tai valmistamalla fyysinen oikomismalli (Mangano et al. 2018; Becker et al. 2018; Krishnan 2021). Potilaan hampaat pystytään kuvaamaan erilaisilla kuvantamislaitteistoilla, esimerkiksi kartiokeila-tietokonetomografialla (CBCT, Cone beam computed tomography), intraoraalisilla skannereilla sekä edestäpäin kuvatuilla hymy kuvilla. Tämä kuvausdata pystytään puolestaan muuttamaan 3D-muotoiseksi hammasmalliksi tietokoneelle. Näin syntyy hampaiston digitaalinen malli. (Tarraf & Ali 2018) Syntyneen 3D-mallin pohjalta on nykyään mahdollista valmistaa myös fyysinen tutkimusmalli erilaisien 3D-tulostimien avulla (Jaber et al. 2021). Kuvassa 10 esiintyy hampaistosta laadittu digitaalinen malli, jota voidaan hyödyntää oikomishoitojen yhteydessä.



Kuva 10. Hampaiston digitaalinen malli (Tarraf & Ali 2018).

Toinen tapa valmistaa fyysinen tutkimusmalli on perinteinen kipsivaluun perustuva valmistustekniikka (Staley & Reske 2011, luku 2; Krishnan 2021). Kipsivalutekniikka on edelleen laajasti käytössä (Jaber et al. 2021). Kipsivalutekniikassa valmistetaan ensin muotit sekä hampaiden yläkaaresta että alakaaresta painamalla hampaat alustan päällä

olevaa alginaattimassaa vasten. Näin voidaan valmistaa erikseen sekä ylä- että alakaaria ilmentävät muotit. Varsinaiset kipsivalumallit valmistetaan kaatamalla ylä- ja alakaaria ilmentäviin muotteihin veteen seostettua kipsiä, joiden annetaan jähmettyä valmiiksi kipsivalumalleiksi. (Staley & Reske 2011, luku 2) Kuvassa 11 esitetään perinteisellä kipsivalutekniikalla valmistettu tutkimusmalli. Kuvan tutkimusmalli koostuu sekä ylä- että alahampaiden pohjalta valmistetuista kipsivalumalleista.



Kuva 11. Perinteinen kipsivalutekniikalla valmistettu tutkimusmalli (Staley & Reske 2011, s. 28).

Vuonna 2018 julkaistussa tutkimuksessa todettiin, että nuoret oikomishoitopotilaat kokiivat 3D-kuvantamiseen perustuvan hampaiden jäljentämisen mukavammaksi tavaksi jäljentää hampaat verrattuna perinteiseen kipsivalumuotilla tehtävään jäljentämiseen (Mangano et al. 2018). Toisaalta fyysisiin kipsivalumuotteihin liittyy katoamis- ja vaurioitumisriski sekä tarve mahdollisesti kalliillekin säilytystilalle (Becker et al. 2018). Digitaalisessa muodossa olevat suun 3D-mallit yhdistettynä röntgen- ja valokuvadataan saattavat johtaa tarkempiin hoitosuunnitelmiin, mutta tästä ei ole vielä saatu kerättyä tutkimusnäyttöä (Krishnan 2021).

On siis olemassa viitteitä siitä, että suunta voisi olla menossa kohti perinteisten kipsivalumallien vähenemistä digitaalisten tutkimusmallien ottaessa suurempaa jalansijaa. Väitettä tutkimusmallien digitalisoitumisesta tukee myös se tosiasia, että vanhoja jo olemassa olevia kipsivalumalleja on jo pitkään skannattu digimuotoisiksi (Krishnan 2021). Toisaalta tiedetään, että tietoteknisestä harppauksesta huolimatta fyysiset tutkimusmallit ovat edelleen oikomishammaslääkäreiden suosiossa, koska niitä pidetään käytännöllisinä ja konkreettisina. Edelleen myös tiettyjen oikomiskojeiden laboratoriovalmistaminen vaatii fyysisiä tutkimusmalleja. (Jaber et al. 2021)

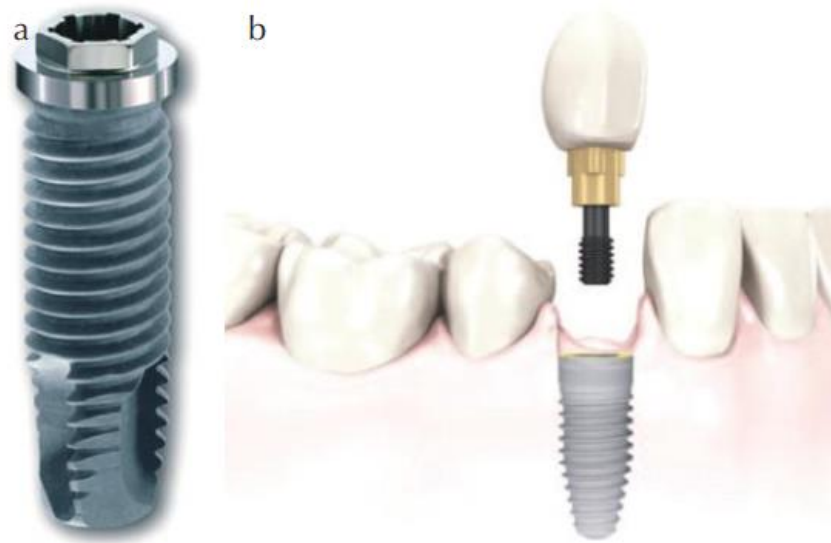
3.3 Kirurgiset ohjaimet implanttikirurgiaan

Hammaslääketieteessä hyödynnettävillä implanteihin liittyvillä kirurgisilla ohjaimilla tarkoitetaan potilaan suusta kuvatun 3D-datan pohjalta valmistettua fyysistä ohjainta, jolla esimerkiksi pora saadaan kohdistettua juuri oikeaan suuntaan implanttikirurgisen toimenpiteen yhteydessä. Kirurginen ohjain voi olla tuettuna esimerkiksi potilaan hampaisiin, luuhun tai limakalvoihin. Hampaisiin tuetut kirurgiset ohjaimet ovat kaikkein yleisimmin käytössä. (Parashis & Diamantopoulos 2013, s. 33) Kuvassa 12 esiintyy implanttikirurgiaan tarkoitettu hampaisiin tuettava kirurginen ohjain.



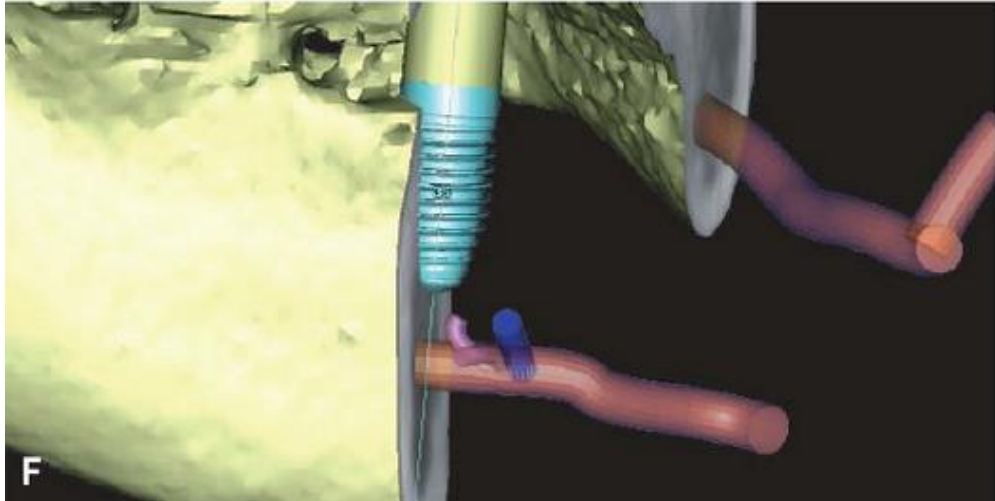
Kuva 12. Hampaisiin tuettava kirurginen ohjain (Anunmana et al. 2020).

Asennettavan implantin oikea asento on ensiarvoisen tärkeä tekijä proteettisen hoidon onnistumisen kannalta. Implantin asento vaikuttaa asennettavan proteesin asentoon, ja toisaalta proteesin asento vaikuttaa purentaan, estetiikkaan sekä hampaan kuormituskuviioon. (Smitkarn et al. 2019) Vuonna 2019 tehdyssä tutkimuksessa todettiin, että asentamalla hammasimplantin hyödyntäen kirurgista ohjainta päästään tarkempaan lopputulokseen verrattuna vapaalla kädellä suoritettavaan implantin asentamiseen (Smitkarn et al. 2019). Alla olevassa kuvassa 13 esiintyy vasemmassa reunassa hammasimplantti. Kuvan oikeassa reunassa esiintyy luuhun porattuun reikään asennettu hammasimplantti sekä hammasimplanttiin asennettava hammasproteesi.



Kuva 13. *Hammassimplantti ja asennettava hammasproteesi (Byrne 2014, s. 2).*

Kirurgiset ohjaimet ovat osa digitaalisesti ohjattua implantin sijoittamista (CGIP, computer-guided implant placement). Tässä työkulussa suunnitellaan tietokoneohjelman avustuksella implantille tarkka asento suussa ennen todellisen implantin asentamista. Ensin potilaasta otetaan CBCT-kuvat. Tietokone pystyy hyödyntämään tätä kuvadataa ja rakentamaan suun alueesta 3D-mallin. Tämän jälkeen tietokoneavusteisesti määritetään, miten luu pitäisi valmistella, jotta asennettava implantti saataisiin juuri oikeaan asentoon, oikeaan kulmaan ja oikealle syvyydelle luussa. Tietokoneohjelma pystyy esimerkiksi laskemaan implantin etäisyyden hermoihin, verisuoniin sekä kasvojen alueen onteloihin. Tämän datan pohjalta valmistetaan kirurginen ohjain, joka ohjaa poran poraamaan luuhun juuri oikeassa kulmassa. (Parashis & Diamantopoulos 2013, s. 4–18) Kuvassa 14 esitellään suun alueen 3D-malli, joka demonstroi asennettavan implantin sijaintia suhteessa hermoon.



Kuva 14. Implantin sijainti suhteessa hermoon suun alueen 3D-mallissa (Parashis & Diamantopoulos 2013, s. 21).

Digitaalisessa työnkulussa implanttien asentamisen yhteydessä hyödynnettävät kirurgiset ohjaimet voidaan valmistaa 3D-tulostamalla esimerkiksi SLA-tekniikalla (Ramasamy et al. 2013; Parashis & Diamantopoulos 2013, s. 32). Valmistamisessa on mahdollista hyödyntää myös jrsintekniikkaa (Anunmana et al. 2020). Valmis kirurginen ohjain voi olla valmistettu esimerkiksi akryylihartsista (Parashis & Diamantopoulos 2013, s. 32). Kirurgisen ohjaimen ohjaavassa aukossa on usein kiinni myös metallinen holkki, joka on lisätty kirurgiseen ohjaimen parantamaan ohjausreiän retentiota toimenpiteen aikana (Ramasamy et al. 2013). Kuvassa 15 esiintyy kirurginen ohjain hampaisiin tuettuna. Kuvan kirurgisessa ohjaimessa voidaan havaita edellä mainittu metallinen holkki.



Kuva 15. Kirurginen ohjain hampaisiin tuettuna (Parashis & Diamantopoulos 2013, s. 55).

4. 3D-TULOSTAMISEN HAMMASLÄÄKETIETEE- TEEN SOVELLUKSET

Tässä luvussa arvioidaan, millaiset tekniset edellytykset on tällä hetkellä 3D-tulostaa luvussa 3 esiteltyjä hammaslääketieteen sovelluksia. Tässä luvussa otetaan kantaa eri 3D-tulostustekniikoiden tekniseen suorituskykyyn hammaslääketieteen sovelluksia 3D-tulostettaessa sekä tarkastellaan myös hammaslääketieteen sovellusten 3D-tulostamiseen liittyviä materiaaleja.

4.1 Täysin keraamisten hammaskruunujen 3D-tulostaminen

Erilaisia hammaskruunuja on pyritty 3D-tulostamaan erilaisin tekniikoin vaihtelevalla menestyksellä. Kiinnostus hammaskruunujen 3D-tulostamisesta kohtaan liittyy pitkälti raaka-aineiden hukan vähentämiseen, valmistamisajan lyhenemiseen sekä keramiikan jyrskintään liittyvien jännitysten välttämiseen (Methani et al. 2020). Seuraavassa luvussa esitellään täysin keraamisten hammaskruunujen 3D-tulostamiseen liittyvät tekniset mahdollisuudet sekä ilmenneet ongelmakohdat. Täysin keraamisten hammaskruunujen 3D-tulostamiseen liittyvät materiaalit esitellään omassa luvussaan.

4.1.1 Nykyiset mahdollisuudet ja ongelmat

Keraamisia hammaskruunuja on 3D-tulostettu viidellä eri 3D-tulostustekniikalla: stereolitografialla (SLA), jauhepetisulatuksella (PBF), sideainesuihkutuksella (BJ), suoralla mustesuihkutulostuksella (DIP) sekä materiaalin pursottaminen (ME). Nykyiset tutkimukset enteilevät keraamisille 3D-tulostetuille hammaskruunuille lupaavaa tulevaisuutta, mutta keraamisten hammaskruunujen valmistamisessa on kuitenkin vielä tutkittavaa, eivätkä ne ole vielä saavuttaneet kaupallista käyttöä. Olemassa olevien tutkimusten tuloksia on vaikeaa standardoida, sillä jokaisen 3D-tulostustekniikan toimivuuteen vaikuttaa omat parametrinsa, joiden kanssa on vielä toistaiseksi ilmennyt ongelmia. 3D-tulostustekniikoille voidaan kuitenkin määrittää tietyt käsittelyparametrit, jotka tulisi optimoida, jotta täysin keraamisten hammaskruunujen 3D-tulostaminen voisi mahdollisesti onnistua. (Methani et al. 2020) Nämä käsittelyparametrit ovat (Methani et al. 2020):

- SLA: Hiukkaskoko, lietteen viskositeetti, kuiva-aine ja sideainepitoisuus.
- ME: Kriittinen suuttimen korkeus, pH ja lietteen viskositeetti.
- PBF: Lasertehto, skannausnopeus, skannausväli ja sideainepitoisuus
- DIP: Tulostuspään etäisyys rakennusalustasta ja musteen Oh-luku.
- BJ: Tulostimen tehotaso ja sideaineen kylläisyystaso.

4.1.2 Materiaalit

Suuhun kiinnitettävien väliaikaisien sekä pysyvien hammaskruunujen materiaalivalikoimaa rajoittaa suun asettamat vaatimukset materiaalin mekaanisille ominaisuuksille sekä myös vaatimus materiaalin biologisesta yhteensopivuudesta. Keraamisia materiaaleja käytetäänkin laajasti hammaslääketieteessä niiden bioyhteensopivuuden, kemiallisen stabiiliuden sekä esteettisien ominaisuuksien vuoksi (Galante et al. 2019). Keramiikkaan liittyy kuitenkin hauraus, minkä vuoksi valmistusprosessin tiukka valvonta on tarpeen (Galante et al. 2019). Tiedetäänkin, että keraamisiin kruunuihin voi liittyä halkeamisriski (Shahmoradi et al. 2020). 3D-tulostamisessa on tähän mennessä tutkittu materiaaleina zirkoniumoksidia, alumiinioksidia sekä maasälpäpohjaista posliinia (Methani et al. 2020). Zirkoniumoksidi ZrO_2 , eli zirkonia, on materiaali, jota kohtaan on osoitettu kasvavaa kiinnostusta lääketieteellisessä kirjallisuudessa viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana. Zirkoniumoksidi on biokeraaminen materiaali, jota on pyritty hyödyntämään pysyvien hammaskruunujen valmistamisessa. (Ispas et al. 2021) Tähän mennessä zirkonia on pystytty soveltamaan SLA-, ME- ja DIP-tulostustekniikoiden yhteydessä (Methani et al. 2020).

Epäorgaanisena ei-metallisena oksidiyhdisteenä zirkoniumoksidi on bioyhteensopiva, kemiallisesti kestävä, optisilta ominaisuuksiltaan mielenkiintoinen yhdiste, jolla on vain vähän sytotoksisia vaikutuksia (Ispas et al. 2021). Zirkoniumoksidin ei ole myöskään todettu aiheuttavan allergisia reaktioita eikä makumuutoksia suussa (Demiralph et al. 2020). Sillä on myös hyvät mekaaniset ominaisuudet taivutusjäykkyydessä sekä murtojuuudessa ja sillä on myös hyvä väsymiskestävyys. Zirkoniumoksidin Youngin moduuli peräti on sama kuin ruostumattomalla teräksellä. (Ispas et al. 2021)

Zirkoniumoksidin rakenteelliseen stabiiliuteen voidaan vaikuttaa erilaisilla seosteaineilla, joita ovat esimerkiksi magnesiumoksidi MgO , alumiinioksidi Al_2O_3 , ceriumoksidi CeO_2 , kalsiumoksidi CaO sekä yttriumoksidi Y_2O_3 . Kuitenkin vain yttriumoksidilla, magnesiumoksidilla ja alumiinioksidilla seostettua zirkonia on käytetty tähän mennessä hammaslää-

ketieteessä. (Ispas et al. 2021) Seosteaineilla pyritään muuttamaan zirkonin ominaisuuksia esimerkiksi kovuudessa ja kulutuskestävyydessä sekä pyritään muuttamaan zirkonin ominaisuuksia kestävämmän erilaisia teollisia prosesseja, kuten sintrausta ja lämpökäsittelyä (Demiralph et al. 2020). Sintrausprosessi on välttämätön, jotta zirkonin mekaanisia ominaisuuksia saadaan parannettua (Lin et al. 2019). Zirkonin on todettu olevan materiaali, jolla on erittäin hyvät käyttömahdollisuudet hammaslääketieteessä (Lin et al. 2019).

Toinen keraamisten hammaskruunujen valmistamisessa sovellettu materiaali on alumiinioksidi Al_2O_3 , eli alumina, minkä käyttöä on tähän mennessä tutkittu SLA-tulostustekniikan yhteydessä (Methani et al. 2020). Alumiinioksidi on kehitetty vaihtoehdoksi metalleille hammaslääketieteen sovelluksissa ja SLA-tekniikalla tulostettuna sen on todettu olevan lupaava materiaali valmistettaessa hammaslääketieteellistä keramiikkaa (Demiralph et al. 2020). US Food and Drug Administration (FDA) toteaa, että vain hyvin puhdasta alumiinioksidia tulisi käyttää hammaslääketieteessä. Tämä tarkoittaa puhtausasteeltaan noin 99.99 % alumiinioksidia. (Demiralph et al. 2020)

Kolmas hammaskruunujen valmistamisessa sovellettu keraami on maasälpäpohjainen posliini. Maasälpäpohjaista posliinia on tähän mennessä tutkittu ME-, PBF- ja BJ-tulostustekniikoiden yhteydessä (Methani et al. 2020). Maasälpäpohjainen posliini on biologisesti yhteensopiva, kestävä ja pitkäikäinen materiaali, jolla on hyvät esteettiset ominaisuudet. Sitä käytetään erilaisiin restaurointeihin varsinkin etuhampaissa, sillä sen väri muistuttaa läheisesti hampaiden luonnollista väriä. Maasälpäpohjaisen posliinin käyttö kuitenkin rajautuu pääasiassa juuri etuhampaisiin osittain sen vuoksi, että se on yleisesti heikoin kaikista restaurointimateriaaleista. (ICOI) Maasälpäpohjainen posliini ei ole enää vuosikymmeniin ollut laajassa käytössä kruunujen valmistamisessa sen heikon kestävyiden vuoksi (O'Brien 2002, s. 223).

4.2 Ortodonttisen tutkimusmallin 3D-tulostaminen

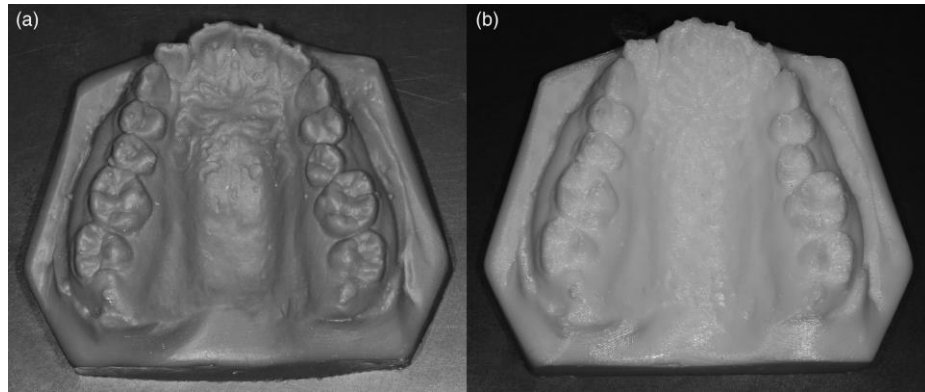
Kiinnostus fyysisten tutkimusmallien 3D-tulostamiseen liittyy pitkälti hammashoidon digitalisaatioon (Krishnan 2021; Jaber et al. 2021). Seuraavassa luvussa esittelen nykyiset ortodonttisten tutkimusmallien 3D-tulostamiseen liittyvät tekniset mahdollisuudet sekä mahdollisesti ilmenneet tekniset ongelmakohdat. Ortodonttisten tutkimusmallien 3D-tulostamiseen liittyvät tulostusmateriaalit esitellään omassa luvussa.

4.2.1 Nykyiset mahdollisuudet ja ongelmat

Fyysisiä tutkimusmalleja pystytään 3D-tulostamaan. Nykyisin tutkimusmalleja tulostetaan neljän eri 3D-tulostustekniikan avulla. Nämä tulostustekniikat ovat: PolyJet-, FFF-SLA- sekä DLP-teknikat (Cousley 2020). Toisaalta tiedetään, että hammaslääkäriklinikoilla käytetään myös harrastelijakäyttöön suunnattuja LCD-teknikkaan pohjautuvia 3D-tulostimia (lo Giudice et al. 2021). Näistä mainituista 3D-tulostustekniikoista SLA ja DLP ovat yleisimpiä hammaslääkäriklinikoilla (Cousley 2020; lo Giudice et al. 2021).

FFF-teknikkaa käytetään tällä hetkellä vain harvoin hammaslääketieteessä. Tämän epäillään johtuvan FFF-teknikan heikommasta tarkkuudesta ja resoluutiosta verrattuna SLA- ja DLP-teknikoihin. Yleisin käyttökohde FFF-teknikalle hammaslääketieteessä onkin juuri hampaistosta tehtävät fyysiset 3D-mallit, sillä eivät vaadi niin suurta tarkkuutta, kuin mitä esimerkiksi hammasproteesien tuotanto vaatii. Vaikka FFF-teknikan tulostustarkkuus onkin SLA- ja DLP-teknikoita vaatimattomampi, täyttää FFF-teknikalla tulostetut tutkimusmallit silti useiden hammaslääketieteen sektoreiden vaatimukset. (Lüchtenborg et al. 2021) FFF-teknikalla tulostetut ortodonttiset mallit ovat tarkkuudeltaan hyväksyttäviä kliiniseen käyttöön, mutta vuonna 2018 julkaistussa tutkimuksessa huomautettiin, että kliinisen käytön hyväksyviä tarkkuusrajoja tulisi muuttaa riippumaan ortodonttisen mallin käyttötarkoituksesta. Tutkimuksessa todettiin, että FFF-teknikalla valmistettujen ortodonttisten mallin tarkkuus ei riitä esimerkiksi tiettyjen oikomiskojeiden valmistamiseen, vaikka tutkimusmallien tarkkuus onkin kliinisen käytön hyväksyvien rajojen sisäpuolella. (Kim et al. 2018)

SLA ja DLP tulostimilla päästään nykyään samaan tulostustarkkuuteen kuin mitä päästään perinteisillä kipsivalumalleilla (Cousley 2020). SLA -ja DLP- tekniikoiden onkin todettu tarjoavan kliinisiin sovelluksiin riittävän hyvän tulostustarkkuuden (Cousley 2020; lo Giudice et al. 2021). Kaikista 3D-tulostustekniikoista, SLA- ja DLP-teknikoiden on todettu olevan parhaiten hammaslääketieteeseen sopivia tulostustekniikoita, sillä ne tarjoavat paremman tulostarkkuuden verrattuna sulatettuun kerrosmallinnukseen pohjautuviin tulostimiin (Shin et al. 2020). Kuvassa 16 esiintyy vasemmalla puolella esimerkki DLP-teknikalla tulostetusta tutkimusmallista sekä oikealla puolella esimerkki FFF-teknikalla tulostetusta tutkimusmallista.



Kuva 16. Esimerkki DLP- ja FFF-tekniikoilla tulostetuista tutkimusmalleista (Jaber et al. 2021).

Myös PolyJet-tekniikkaa on käytetty fyysisten tutkimusmallien valmistamiseen. Vuonna 2018 julkaistussa tutkimuksessa vertailtiin jo mainitsemieni neljän tulostustekniikan tarkkuutta ja todenmukaisuutta toisiinsa. Tutkimuksen mukaan PolyJet-tekniikalla tulostetut tutkimusmallit olivat kaikkein tarkimpia, minkä jälkeen tarkimpia olivat järjestyksessä DLP-, SLA- ja FFF-tekniikat. Myös hammaskaarien leveydessä PolyJet oli tarkin tulostustekniikka, minkä jälkeen tarkimmat olivat järjestyksessä DLP-, FFF- ja SLA-tekniikat. (Kim et al. 2018) Tämän tutkimuksen pohjalta lienee mahdollista arvioida, että myös PolyJet-tekniikka voisi olla varteen otettava vaihtoehto ortodonttisten tutkimusmallien 3D-tulostamiseen.

Kuten alaluvussa 2.2 mainittiin, myös harrastelijakäyttöön suunnattuja LCD-pohjaisia tulostustekniikoita käytetään hammaslääkäriklinikoilla ortodonttisten tutkimusmallien valmistamisessa. LCD-pohjaisilla 3D-tulostimilla tulostettuja ortodonttisia tutkimusmalleja on hyödynnetty hammaslääkäriklinikoilla oikomiskojeiden (clear aligners) tuotannossa. Vuonna 2021 julkaistun tutkimuksen mukaan LCD-tekniikkaan pohjautuvien tulostustekniikoiden tarkkuus on kuitenkin riittävän hyvä oikomishoidollisiin tarkoituksiin, vaikka tulostustarkkuus jääkin ammattitasoisia 3D-tulostimia vaatimattomammaksi. LCD-pohjaiset tulostustekniikat ovat huomattavasti edullisempia kuin ammattitasoiset 3D-tulostimet. (Io Giudice et al. 2021)

4.2.2 Materiaalit

Ortodonttisten tutkimusmallien valmistamisen yhteydessä FDM- / FFF-tekniikassa käytetään valmistusmateriaaleina hartsimateriaaleja, joista voidaan nestemäisessä olomuodossa muodostaa kiinteä kappale (Rebong et al. 2018). SLA- ja DLP-tekniikoissa käytetään ortodonttisten tutkimusmallien valmistamisen yhteydessä materiaaleina nestemäisiä polymeerejä, jotka kovetetaan fotopolymeeroitumisreaktiossa kiinteäksi hartsiksi

(Cousley 2020). Kuten SLA- ja DLP-tekniikoidenkin tapauksessa, myös PolyJet-tekniikassa käytetään tutkimusmallien valmistamisen yhteydessä valmistusmateriaaleina nestemäisiä fotopolymeerejä (Rebong et al. 2018). Yleisesti ortodonttiset tutkimusmallit valmistetaan siis muovihartsimateriaaleista.

On kuitenkin huomattava, etteivät tutkimusmallit tule intraoraaliseen käyttöön. Tällöin lieinee mahdollista hyödyntää vähintäänkin kokeellisesti monia erilaisia materiaaleja, siten kun tulostuslaitteistot tähän kykenevät. Esimerkiksi FFF-tulostimille on kehitetty valtava määrä erilaisia materiaaleja, joita pystytään hyödyntämään tulostusprosessissa (Lüchtenborg et al. 2021).

Materiaalien täsmällistä määrittämistä hankaloittaa lisäksi se tosiasia, että useimmat tulostinvalmistajat ovat määränneet tulostimensa käyttämään vain valmistajan omia muovihartseja (Cousley 2020). Tällöin materiaalien tarkemmat spesifikaatiot saattavat vaihdella eri tulostinvalmistajien välillä.

4.3 Implanttien kirurgisten ohjaimien 3D-tulostaminen

Porausohjaimien 3D-tulostaminen polymeereistä on kliinistä todellisuutta (Tahayeri et al. 2018). Seuraavassa luvussa esittelen tämän hetken teknisiä mahdollisuuksia sekä ilmenneitä teknisiä ongelmakohtia liittyen kirurgisten ohjaimien 3D-tulostamiseen nykyisillä 3D-tulostustekniikoilla. Kirurgisten ohjaimien 3D-tulostamisessa hyödynnettävät materiaalit analysoidaan omassa luvussa.

4.3.1 Nykyiset mahdollisuudet ja ongelmat

Vuonna 2020 tehdyssä tutkimuksessa vertailtiin SLA-, DLP- ja PolyJet-tekniikoita toisiinsa kirurgisten ohjaimien valmistamisen yhteydessä. Tutkimuksen mukaan PolyJet-tekniikalla pystyttiin tuottamaan SLA- ja DLP-tekniikoita tarkemmat kirurgiset ohjaimet, siinä missä DLP-tekniikalla saavutettiin nopein tulostusaika. Tutkimuksen yhteydessä todettiin, että kirurgisen ohjaimen kulmapoikkeavuus oli kaikilla tulostintyypeillä kliinisen sallittavuuden rajoissa. (Anunmana et al. 2020) Samana vuonna julkaistussa tutkimuksessa tutkittiin SLA-, PolyJet- ja MJP-tulostustekniikoiden tarkkuutta kirurgisten ohjaimien yhteydessä. Tutkimuksen mukaan MJP-tekniikan tulostustarkkuus oli merkittävästi heikompi verrattuna SLA- ja PolyJet-tekniikoiden tulostustarkkuuteen. Tutkimuksessa todettiin, että tutkituista tulostimista vain SLA- ja PolyJet-tekniikat ovat soveltuvia kliiniseen käyttöön. PolyJet-tekniikan todettiin olevan SLA-tekniikkaa tarkempi ja nopeampi, mutta toisaalta tutkimuksessa tuotiin esiin myös se tosiasia, ettei SLA-tekniikka ole niin hintava, kuin mitä PolyJet-tekniikka on. (Kim et al. 2020)

Edellä mainittujen tulostustekniikoiden lisäksi myös FDM-tekniikkaa on tutkittu käytettäväksi kirurgisten ohjaimien valmistamiseen. Tulostettaessa kirurgisia ohjaimia biopolymeripohjaisella FDM-tekniikalla, päästiin tulostustarkkuudessa yhtä hyvään tarkkuuteen SLA-tekniikan kanssa. FDM-tekniikan todettiin olevan myös SLA-tekniikkaa kustannustehokkaampi ja vähemmän aikaa vievä tulostustekniikka. (Pieralli et al. 2020)

Myös metalliolkittomia 3D-tulostettuja kirurgisia ohjaimia on tutkittu. Vuonna 2020 tutkimuksessa todettiin, että tulostettaessa kirurginen ohjain SLA- tai FDM-tekniikan avulla, metalliolkki ei lisännyt potilaaseen asennettavan lopullisen implantin asennon tarkkuutta. Metalliolkki lisätään kirurgiseen ohjaimen vasta 3D-tulostusprosessin jälkeen, jolloin metalliolkista luopumisella voitaisiin säästää valmistuskustannuksissa, pienentää valmistusaikaa sekä välttää metalliolkkin asentamisessa mahdollisesti tapahtuvia virheitä. (Pieralli et al. 2020)

4.3.2 Materiaalit

Kirurgisten ohjaimien valmistamisessa voidaan hyödyntää materiaaleja, joiden tulostaminen on mahdollista käytössä olevilla 3D-tulostimilla. Toisaalta materiaalien tulee myös olla hyväksytyjä kliiniseen käyttöön.

Kuten alaluvussa 4.2.2 viittaamassani Cousleyn vuonna 2020 julkaisemassa tutkimuksessa mainittiin, monet 3D-tulostinvalmistajat sallivat 3D-tulostimissa käytettäväksi vain valmistajan omia materiaaleja (Cousley 2020). Tämä asettaa omat haasteensa materiaalien tarkempaan analysointiin. Kuitenkin tiedetään, että kirurgisten ohjaimien valmistamisessa SLA- ja DLP-tekniikoiden yhteydessä käytetään hartsipohjaisia materiaaleja (Pieralli et al. 2020). Myös vuonna 2020 julkaistussa artikkelissa, jossa ilmoitettiin kirurgisten ohjaimien tulostusmateriaaleiksi vain materiaalien kauppanimet, todettiin SLA- ja DLP-tulostimien hyödyntävän nestemäisiä hartsipohjaisia materiaaleja. Samassa artikkelissa myös PolyJet-tekniikan yhteydessä ilmoitettiin käytetyksi materiaaliksi vain materiaalin kaupp nimi, mutta todettiin PolyJet-tekniikan hyödyntävän fotopolymeeroituvia materiaaleja. (Anunmana et al. 2020)

Alaluvussa 4.3.1 mainitsemassani FDM-tekniikkaan liittyvässä tutkimuksessa kokeellisesti tulostetut kirurgiset ohjaimet valmistettiin biohajoavasta ligniinipohjaisesta biopolymerimateriaalista. Ligniini on kasvien soluseinässä esiintyvä termisesti stabiili fenolipolymeeri. Tutkimuksessa todettiin kuitenkin, että onnistuneista 3D-tulostamisista huolimatta tutkittu materiaali vaatii vielä lisätutkimuksia koskien mahdollisia sytotoksisia vaikutuksia intraoraalisessa käytössä. Lisätutkimukset voisivat mahdollisesti johtaa materiaalin hyväksymiseen kliiniseen käyttöön sopivaksi. (Pieralli et al. 2020)

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tähän lukuun on koottu johtopäätökset luvussa 4 esiin tulleista havainnoista. Luvussa esitetään johtopäätökset koskien 3D-tulostamisen teknisiä mahdollisuuksia ja ongelmia koskien kolmea 3D-tulostettavaa hammaslääketieteen sovellusta. Tähän lukuun on koottuna myös johtopäätökset tutkittujen sovellusten 3D-tulostamisiin liittyvistä materiaaleista sekä arvioidaan, mihin suuntaan 3D-tulostamisen asema tutkittujen sovellusten yhteydessä voisi mahdollisesti olla tulevaisuudessa siirtymässä. Luvusta löytyy taulukoituna johtopäätökset koskien 3D-tulostamisen nykyistä ja mahdollista tulevaa asemaa hammaslääketieteessä tutkittujen sovellusten tapauksessa.

Taulukkoon 2 on koottu luvussa 4 ilmi tulleet havainnot koskien 3D-tulostamisen nykyistä asemaa hammaslääketieteessä. Taulukosta 2 selviää, onko 3D-tulostamalla onnistuttu tuottamaan kliiniseen käyttöön hyväksyttävä 3D-tuloste, mitä tulostustekniikoita kliinisessä käytössä on ja mistä materiaaleista kliiniseen käyttöön hyväksyttävät sovellukset valmistetaan. Taulukko 2 havainnollistaa myös, mitä 3D-tulostustekniikoita ja materiaaleja on tutkittu niissä tapauksissa, joissa kliiniseen käyttöön hyväksytyä 3D-tulostetta ei olla toistaiseksi onnistuttu valmistamaan. Merkinnällä "*" varustetut sarakkeet on varattu kuvaamaan edellä mainittuja tapauksia.

Taulukko 2. Luvun 4 johtopäätökset taulukoituna liittyen 3D-tulostamisen nykyiseen asemaan hammaslääketieteessä tutkittujen hammaslääketieteen sovellusten tapauksessa.

3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovellus	Kliiniseen käyttöön hyväksytty 3D-tuloste on olemassa	Tutkitut 3D-tulostustekniikat*	Tutkitut materiaalit*	Kliinisessä käytössä olevat 3D-tulostustekniikat	Kliinisessä käytössä olevat materiaalit
Täysin keraamiset hammaskruunut	EI	SLA	Zirkoni	---	---
		DIP			
		PBF	Alumina		
		ME BJ	Maasälpäpohjainen posliini		
Ortodonttiset tutkimusmallit	KYLLÄ	---	---	SLA	Muovihartsit
		---	---	DLP	
		---	---	PolyJet	
		---	---	FFF (LCD)	
Kirurgiset ohjaimet	KYLLÄ	---	---	SLA	Muovihartsit
		---	---	DLP	
		---	---	PolyJet	

Taulukkoon 3 on koottu johtopäätökset luvussa 4 esiin tulleista havainnoista koskien 3D-tulostamisen mahdollista tulevaa asemaa hammaslääketieteessä. Taulukosta 3 selviää tutkitut 3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovellukset sekä mihin suuntaan niiden asema voisi 4 luvun havaintojen pohjalta mahdollisesti tulevaisuudessa siirtyä.

Taulukko 3. Luvun 4 johtopäätökset taulukoituna liittyen 3D-tulostamisen mahdolliseen tulevaan asemaan tutkittujen hammaslääketieteen sovellusten tapauksessa.

3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovellus	Mahdolliset tulevaisuuden näkymät
Täysin keraamiset hammaskruunut	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-tulosteen mahdollinen hyväksyminen kliiniseen käyttöön, mikäli josakin viidestä tutkitusta 3D-tulostustekniikasta onnistutaan optimoimaan käyttöparametrit.
Ortodonttiset tutkimusmallit	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-tulostettujen ortodonttisten tutkimusmallien hyödyntäminen ortodonttisten hoitojen yhteydessä on todennäköisesti tulevaisuudessa lisääntymässä.
Kirurgiset ohjaimet	<ul style="list-style-type: none"> • Uusien materiaalien myötä mahdollisesti tapahtuva FDM-tekniikan hyväksymiseen kliiniseen käyttöön saattaa johtaa hintatason laskemiseen. • Metalliholkista luopumisella saattaa myös olla hintatasoa laskeva vaikutus kirurgisien ohjaimien tuotannossa.

Tällä hetkellä täysin keraamisia hammaskruunuja ei pystytä valmistamaan niin, että ne sopisivat kliiniseen käyttöön. Varsinkin pysyvään käyttöön valmistetuilta täysin keraamisilta hammaskruunuilta vaaditaan tarpeeksi hyvät mekaaniset ja biokemialliset ominaisuudet, jotta niitä voidaan soveltaa kliinisessä käytössä. Valmiin lopputuloksen mekaaniset ja biokemialliset ominaisuudet riippuvat pitkälti käytetystä tulostustekniikasta, sen eri variaatioista sekä tulostamisprosessissa käytetystä materiaalista. Kiinnostus etenkin zirkonista valmistettuihin hammaskruunuihin on kasvanut viime vuosikymmeninä ja monia eri 3D-tulostustekniikoita eri materiaaleilla on tutkittu viime vuosina. Vaaditaan kuitenkin lisää tutkimusta sekä 3D-tulostusmenetelmistä että 3D-tulostusmateriaaleista, jotta 3D-tulostetut keraamiset hammaskruunut voisivat päästä kliiniseen käyttöön.

Fyysisiä tutkimusmalleja puolestaan pystytään valmistamaan 3D-tulostamalla muovihartseista ja niitä myös 3D-tulostetaan hammaslääketieteellisten hoitojen yhteydessä. Yleisessä käytössä ovat sekä SLA- että DLP-tulostimet, mutta myös LCD- ja FFF-pohjaisia tulostustekniikoita hyödynnetään tutkimusmallien valmistamisessa. On mahdollista, että tulevaisuudessa juuri LCD-tekniikkaan pohjautuvat 3D-tulostimet yleistyvät

hammaslääkäriklinikoilla niiden edullisen hinnan vuoksi, mikäli tekniikan soveltuvuudesta ortodonttisten tutkimusmallien valmistamiseen saadaan vahvempaa tutkimusnäyttöä.

Lienee odotettavissa, että 3D-tulostamisen asema kasvaa hammaslääketieteellisten oikomishoitojen yhteydessä. Tähän vaikuttaa tutkimusmallien digitalisaatio sekä toisaalta fyysisten tutkimusmallien suosio, joiden voisi mahdollisesti olettaa johtavan myös fyysisten 3D-tulostettujen tutkimusmallien yleistymiseen. Cousleyn vuonna 2020 julkaisemassa ortodonttista 3D-tulostamista käsittelevässä artikkelissa todettiin, että vaadittava pääomasijoitus 3D-tulostimeen oli vuonna 2020 Iso-Britanniassa noin 4000–10000 Englannin puntaa hinnan sisältäessä 20 % veron (Cousley 2020). Lienee siis mahdollista, että mahdollisesti tapahtuva hintatason laskeminen sekä mahdollinen tietoisuudenkin lisääntyminen saattavat yhdessä hammashoidon digitalisoitumisen kanssa johtaa 3D-tulostamista hyödyntävän asiakaskunnan lisääntymiseen ortodonttisessa hammashoidossa.

3D-tulostetut tutkimusmallit ovat siis löytäneet tiensä hammaslääketieteelliseen käyttöön. Cousleyn vuonna 2020 julkaisemassa artikkelissa todetaankin, että 3D-tulostaminen on tullut jäädäkseen hammaslääketieteeseen ja se kehittyy entisestään oikomishoitojen yhteydessä (Cousley 2020).

3D-tulostetut kirurgiset ohjaimet ovat myös kliinistä todellisuutta. Tällä hetkellä on olemassa vähintään kolme erilaista 3D-tulostustekniikkaa, joilla pystytään 3D-tulostamaan kliiniseen käyttöön hyväksyttäviä kirurgisia ohjaimia. Nämä 3D-tulostustekniikat ovat SLA-, DLP- ja PolyJet-tekniikat, jotka tulostavat muovihartsista valmistettuja kirurgisia ohjaimia. PolyJet-tekniikalla pystytään tuottamaan tarkin lopputulos, mutta se on esimerkiksi SLA-tekniikkaan verraten kallis tulostustekniikka. Toisaalta DLP-tulostustekniikka tarjosi PolyJet-tekniikkaa nopeamman tulostusajan.

Nykyinen tilanne onkin, että toimivaa tekniikkaa on saatavilla, ja kirurgisia ohjaimia valmistavan tahon päätettäväksi jää, mitä tekniikkaa halutaan hyödyntää valmistusprosessin yhteydessä. Tulevaisuuden uudet innovaatiot saattavat avata tietä kirurgisten ohjaimien halpenemiseen. Esimerkiksi FDM-tulostustekniikka tarjosi yhtä hyvän tulostustarkkuuden kuin kliiniseen käyttöön hyväksytty SLA-tekniikka, mutta tulostamisessa käytettyä materiaalia ei ole vielä hyväksytty kliiniseen käyttöön. FDM-tekniikka olisi SLA-tekniikkaa kustannustehokkaampi ja nopeampi tulostustekniikka. Myös mahdollinen metalliholkista luopuminen saattaisi tulevaisuudessa laskea kirurgisten ohjaimien hintoja johtuen materiaalikustannusten pienenemisestä ja valmistamisprosessin yksinkertaistamisesta.

6. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin 3D-tulostamisen nykyistä asemaa hammaslääketieteessä sekä arvioitiin, mihin suuntaan 3D-tulostamisen asema hammaslääketieteessä voisi mahdollisesti olla siirtymässä. Kysymyksiin vastattiin tutkimalla kolmea eri 3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovellusta, joiden teknistä suorituskykyä, tulostusmateriaaleja sekä mahdollisesti ilmenneitä ongelmakohtia arvioitiin omissa luvuissaan. Työ suoritettiin kirjallisuusselvityksenä, minkä lähdemateriaalina toimi alan kirjallisuus sekä alan tuoreet tutkimukset.

Kuten tutkimuksiin yleensä, myös tämän kandidaatintyöhön tuloksiin liittyy jonkin verran epävarmuutta. Kandidaatintyö rajattiin käsittelemään vain kolmea eri 3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovellusta, joiden pohjalta muodostettiin kuva näiden kolmen sovelluksen asemasta hammaslääketieteessä. Tämä kertoo vain näiden kolmen 3D-tulostamisen hammaslääketieteen sovelluksen asemasta hammaslääketieteessä, eikä välttämättä koko 3D-tulostamisen asemasta toimialalla. On myös mahdollista, ettei lähdeaineistoon löytynyt kaikkia mahdollisia lähteitä, jotka olisivat voineet vaikuttaa kandidaatintyön tuloksiin. Edellä luetelluista epävarmuustekijöistä huolimatta kandidaatintyössä saatiin melko luotettavaa näyttöä sen puolesta, että 3D-tulostaminen on rantautumassa osaksi hammashoitoon liittyvää valmistavaa tuotantoa ja sen asema hammashoidossa on todennäköisesti vahvistumaan päin.

Kolmeen tutkimaani hammaslääketieteen sovellukseen liittyen voidaan todeta, että 3D-tulostaminen on joko vasta tutkimusvaiheessa, kuten täysin keraamisten hammaskruunujen yhteydessä todettiin, tai sen hyödyntäminen on jo kliinistä todellisuutta, kuten 3D-tulostettujen tutkimusmallien ja kirurgisten ohjaimien yhteydessä voitiin havaita. 3D-tulostaminen on ottanut suurempaa jalansijaa nykyhammaslääketieteessä tekniikan kehittymisen myötä, ja lienee todennäköistä, että 3D-tulostamisen asema hammaslääketieteessä vahvistuu entisestään tulevien vuosien aikana.

LÄHTEET

- Anunmana, C. et al. (2020). "In Vitro Comparison of Surgical Implant Placement Accuracy Using Guides Fabricated by Three Different Additive Technologies." *Applied Sciences*, 10(21), p. 7791. DOI: 10.3390/app10217791.
- Awari, G.K. et al. (2021). "Additive Manufacturing and 3D Printing Technology: Principles and Applications." Boca Raton: CRC Press, 309 p.
- Becker, K. et al. (2018). "Accuracy and Eligibility of CBCT to Digitize Dental Plaster Casts." *Clinical Oral Investigations*, 22(4), pp. 1817–1823. DOI: 10.1007/s00784-017-2277-x.
- Byrne, G. (2014). "Fundamentals of Implant Dentistry." New York, United States: John Wiley & Sons Inc, 264 p.
- Cousley, R.R. (2020). "Introducing 3D Printing in Your Orthodontic Practice." *Journal of Orthodontics*, 47(3), pp. 265–272. DOI: 10.1177/1465312520936704.
- Demiralph, E., Dorgu, G. & Yilmaz, H. (2020). "Additive Manufacturing (3D Printing) Methods and Applications in Dentistry." *Clinical and Experimental Health Sciences*. DOI: 10.33808/clinexphealthsci.786018.
- Derby, B. & Reis, N. (2003). "Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions." *MRS Bulletin*, 28(11), pp. 815–818. DOI: 10.1557/mrs2003.230.
- Drago, C.J. & Peterson, T. (2010). "Implant Laboratory Procedures a Step-by-Step Guide." Palm Beach Gardens, Florida: John Wiley & Sons, 344 p.
- Galante, R., Figueiredo-Pina, C.G. & Serro, A.P. (2019). "Additive Manufacturing of Ceramics for Dental Applications: A Review." *Dental Materials*, 35(6), pp. 825–846. DOI: 10.1016/j.dental.2019.02.026.
- Gebhardt, A., Kessler, J. & Thurn, L. (2019). "3D Printing - Understanding Additive Manufacturing (2nd Edition)." Cincinnati, Ohio: Hanser Publishers, 224 p.
- Io Giudice, A. et al. (2021). "Evaluation of the Accuracy of Orthodontic Models Prototyped with Entry-Level LCD-Based 3D Printers: A Study Using Surface-Based Superimposition and Deviation Analysis." *Clinical Oral Investigations*. DOI: 10.1007/s00784-021-03999-1.
- Gülcan, O., Günaydın, K. & Tamer, A. (2021). "The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review." *Polymers*, 13(16), p. 2829. DOI: 10.3390/polym13162829.
- Husain, M.A. (2018). "Dental Anatomy and Nomenclature for the Radiologist." *Radiologic Clinics of North America*, 56(1), pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.rcl.2017.08.001.
- ICOI, International congress of oral implantologists [verkkoaineisto]. [Viitattu 26.11.2021]. Saatavissa: <https://www.icoi.org/glossary/feldspathic-porcelain/>
- Ispas, A. et al. (2021). "Zirconia in Dental Medicine: A Brief Overview of Its Properties and Processing Techniques." *Human & Veterinary Medicine*, 13(1), pp. 33–39. Saatavilla: <http://www.hvm.bioflux.com.ro/>.
- Jaber, S.T. et al. (2021). "Evaluation of the Fused Deposition Modeling and the Digital Light Processing Techniques in Terms of Dimensional Accuracy of Printing Dental Models Used for the Fabrication of Clear Aligners." *Clinical and Experimental Dental Research*, 7(4), pp. 591–600. DOI: 10.1002/cre2.366.

Kim, H.-W. et al. (2019). "Comparison of Stress Distribution in Dental Crown with Different Cusp Angles: 3D Finite Element Analysis." *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 22(3), pp. 251–258. DOI: 10.1080/10255842.2018.1549659.

Kim, S.-Y. et al. (2018). "Precision and Trueness of Dental Models Manufactured with Different 3-Dimensional Printing Techniques." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 153(1), pp. 144–153. DOI: 10.1016/j.ajodo.2017.05.025.

Kim, T. et al. (2020). "Accuracy of a Simplified 3D-Printed Implant Surgical Guide." *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 124(2), pp. 195-201.e2. DOI: 10.1016/j.prosdent.2019.06.006.

Krishnan, V. (2021). "Conventional or Digital – Orthodontic Study Models Are Here to Stay!" *Journal of the World Federation of Orthodontists*, 10(2), pp. 41–42. DOI: 10.1016/j.ejwf.2021.05.002.

Lin, L. et al. (2019). "3D Printing and Digital Processing Techniques in Dentistry: A Review of Literature." *Advanced Engineering Materials*, 21(6), p. 1801013. DOI: 10.1002/adem.201801013.

Lüchtenborg, J. et al. (2021). "Implementation of Fused Filament Fabrication in Dentistry." *Applied Sciences*, 11(14), p. 6444. DOI: 10.3390/app11146444.

Lussi, A. et al. (2011). "Dental Erosion – An Overview with Emphasis on Chemical and Histopathological Aspects." *Caries Research*, 45(s1), pp. 2–12. DOI: 10.1159/000325915.

Maines, E.M. et al. (2021). "Sustainable Advances in SLA/DLP 3D Printing Materials and Processes." *Green Chemistry*, 23(18), pp. 6863–6897. DOI: 10.1039/D1GC01489G.

Mangano, A. et al. (2018). "Conventional Vs Digital Impressions: Acceptability, Treatment Comfort and Stress Among Young Orthodontic Patients." *The Open Dentistry Journal*, 12(1), pp. 118–124. DOI: 10.2174/1874210601812010118.

Methani, M.M., Revilla-León, M. & Zandinejad, A. (2020). "The Potential of Additive Manufacturing Technologies and Their Processing Parameters for the Fabrication of All-ceramic Crowns: A Review." *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 32(2), pp. 182–192. DOI: 10.1111/jerd.12535.

Nam, S. & Kim, B. (2019). "Design of Material Removal Rate to Reduce Machining Time of Dental Crown." *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(7), pp. 3423–3434. DOI: 10.1007/s12206-019-0637-y.

Norton, N.S. (2016). "Netter's Head and Neck Anatomy for Dentistry (Netter Basic Science) 3rd Edition." Philadelphia, United States: Elsevier, 698 p.

O'Brien, W.J. (William J. (2002). "Dental Materials and Their Selection." Chicago, USA: Quintessence Pub. Co, 569 p.

Parashis, A. & Diamantopoulos, P. (2013). "Clinical Application of Computer-Guided Implant Surgery." Boca Raton, Florida: CRC Press, an Imprint of Taylor and Francis, 170 p.

Pieralli, S. et al. (2020). "How Accurate Is Oral Implant Installation Using Surgical Guides Printed from a Degradable and Steam-Sterilized Biopolymer?" *Journal of Clinical Medicine*, 9(8), p. 2322. DOI: 10.3390/jcm9082322.

Pitts, N.B. et al. (2017). "Dental Caries." *Nature Reviews Disease Primers*, 3(1), p. 17030. DOI: 10.1038/nrdp.2017.30.

Ramasamy, M. et al. (2013). "Implant Surgical Guides: From the Past to the Present." *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 5(5), p. 98. DOI: 10.4103/0975-7406.113306.

Rebong, R.E. et al. (2018). "Accuracy of Three-Dimensional Dental Resin Models Created by Fused Deposition Modeling, Stereolithography, and Polyjet Prototype Technologies: A Comparative Study." *The Angle Orthodontist*, 88(3), pp. 363–369. DOI: 10.2319/071117-460.1.

Redwood, B., Schöffner, F. & Garret, B. (2017). "The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications." Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V, 304 p.

Shahmoradi, M. et al. (2020). "Monolithic Crowns Fracture Analysis: The Effect of Material Properties, Cusp Angle and Crown Thickness." *Dental Materials*, 36(8), pp. 1038–1051. DOI: 10.1016/j.dental.2020.04.022.

Shin, S.-H. et al. (2020). "Evaluation of the 3D Printing Accuracy of a Dental Model According to Its Internal Structure and Cross-Arch Plate Design: An In Vitro Study." *Materials*, 13(23), p. 5433. DOI: 10.3390/ma13235433.

Smith, B.G. & Howe, L.C. (2007). "Planning and Making Crowns and Bridges Fourth Edition." United Kingdom: Informa Healthcare, 326 p.

Smitkarn, P. et al. (2019). "The Accuracy of Single-tooth Implants Placed Using Fully Digital-guided Surgery and Freehand Implant Surgery." *Journal of Clinical Periodontology*, 46(9), pp. 949–957. DOI: 10.1111/jcpe.13160.

Staley, R.N. & Reske, N.T. (2011). "Essentials of Orthodontics Diagnosis and Treatment." West Sussex, United Kingdom: Blackwell Publishing, Ltd, 356 p.

Tahayeri, A. et al. (2018). "3D Printed versus Conventionally Cured Provisional Crown and Bridge Dental Materials." *Dental Materials*, 34(2), pp. 192–200. DOI: 10.1016/j.dental.2017.10.003.

Tarraf, N.E. & Ali, D.M. (2018). "Present and the Future of Digital Orthodontics☆." *Seminars in Orthodontics*, 24(4), pp. 376–385. DOI: 10.1053/j.sodo.2018.10.002.

Willems, E. et al. (2021). "Additive Manufacturing of Zirconia Ceramics by Material Jetting." *Journal of the European Ceramic Society*, 41(10), pp. 5292–5306. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.018.

Zohrabian, V.M. et al. (2015). "Dental Implants." *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, 36(5), pp. 415–426. DOI: 10.1053/j.sult.2015.09.002.