



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

NESTEEN FOTOPOLYMERISOINTI TEKNIKALLA TUOTETTUJEN MUOVIEN MATERIAALITESTAA- MINEN

Konetekniikan koulutusohjelma

TE-

KIJÄ/T:

Jussi Hiltunen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jussi Hiltunen	
Työn nimi Nesteen fotopolymerisointi tekniikalla tuotettujen muovien materiaalitestaus	
Päiväys 05.06.2017	Sivumäärä/Liitteet 50/0
Ohjaaja(t) lehtori Mika Mäkinen, projekti-insinööri Lauri Alonen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu, Mallihammas Oy	
Tiivistelmä <p>Tämä työ liittyy Savonia-ammattikorkeakoulun LIVA-hankkeeseen, ja työn kokeellinen osuus on tehty yhteistyössä hammastekniikkaan erikoistuneen yrityksen Mallihammas Oy:n kanssa. LIVA-hankkeen tavoitteena on rakentaa ja käynnistää lisäävän valmistuksen toimintaympäristö Pohjois-Savossa. Työssä oli tarkoituksena löytää ratkaisu Mallihampaan nesteenfotopolymerisoinnilla valmistettujen purentakiskojen kestävyysongelmaan materiaalitestauksien avulla. Lisäksi tarkoituksena oli selvittää, kuinka materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä tuotettuja muoveja testataan. Materiaalitestaukset tehtiin Varseo Wax -fotopolymeerillä, jota Mallihammas käyttää purentakiskojensa valmistuksessa. Vertailun vuoksi testattiin Dental SG -fotopolymeeriä, joka on eri valmistajan vastaava materiaali.</p> <p>Työ aloitettiin tutustumalla aihetta käsittelevään kirjallisuuteen, minkä jälkeen suunniteltiin koekappaleet Solidworks-ohjelmalla. Tutkimuksessa materiaaleille tehtiin taivutuskokeet, vetokokeet, iskukokeet ja kovuuskokeet. Lujuskokeiden lisäksi testattiin veden imeytymisen, UV-kovetuksen ja tulostusasennon vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin. Varseo Wax:sta valmistetut koekappaleet tulostettiin Mallihampaan Bego-tulostimella ja Dental SG -koekappaleet 3DMakersin Formlabs-tulostimella.</p> <p>Materiaalitestaukset suoritettiin Itä-Suomen yliopiston ja Savonian aineenkoetuslaitteilla. Kesken työn havaittiin, että iskulujuuskokeet eivät onnistu käytössä olevilla laitteilla, joten ne jätettiin tekemättä. Ennen materiaalitesteja huomattiin, että Dental SG on UV-kovetettu tehokkaammin. Testien tuloksista havaittiin, että Dental SG on saanut paremmat lujuusominaisuudet kuin Varseo Wax. Lisäksi todettiin, että kosteudella ei ole merkittävää vaikutusta materiaaliin. Testien tuloksista päätettiin, että Mallihampaan purentakiskojen heikko kestävyys johtuu osaksi Mallihampaan huonosta UV-kovettamisesta.</p>	
Avainsanat materiaalia lisäävä valmistus, materiaalitestaus, 3D-tulostus, nesteen fotopolymerisointi, hammastekniikka	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Jussi Hiltunen			
Title of Thesis Material Testing of VAT Photopolymerization Prints			
Date	June 05, 2017	Pages/Appendices	50/0
Supervisor(s) Mr Mika Mäkinen, Senior Lecturer and Mr Lauri Alonen, Project Engineer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences, Mallihammas Oy			
<p>Abstract</p> <p>This final project was a part of the LIVA-project in Savonia University of Applied Sciences and the experimental section was made in cooperation with the company Mallihammas Oy. The aim of LIVA-project is to build and start an operating environment for additive manufacturing in Pohjois-Savo. The objective of this project was to find a solution to durability problem of occlusal splint. Occlusal splints are made by VAT photopolymerization technique. Another aim was to solve how to do material testing for plastics which are produced by using additive manufacturing techniques. The material tests were made with two different photopolymer resins, which are used in producing occlusal splints. The resins are Varseo Wax and Dental SG.</p> <p>First, the theoretical background was studied and then 3D models of the specimen were made using the program <i>SolidWorks</i>. The testing methods for the materials was flexural, tensile, impact and hardness tests. In addition, the impact of water absorption, print orientation and UV curing on the mechanical properties of the materials were tested. The specimens from Varseo Wax resin were printed with Bego Varseo printer, and Dental SG specimens with Formlabs Form printer.</p> <p>The material tests were made with the testing equipment of the University of Eastern Finland and Savonia UAS. In the middle of the study it was noticed, that the impact tests can not be done with the current equipment. Therefore the impact test was excluded. The test results revealed that Dental SG resin is UV-cured much more effectively than Varseo Wax. Dental SG got much higher strength properties. It was also noticed that water absorption does not affect photopolymer resins much. The study showed that UV curing is important for photopolymer resins to get good mechanical properties for the material. One way to solve the durability problem of occlusal splints is to improve UV the curing device of the company Mallihammas.</p>			
Keywords additive manufacturing, material testing, 3D printing, VAT photopolymerization, dental technology			
public			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	7
2	MATERIAALIA LISÄÄVÄT VALMISTUSMENETELMÄT	8
2.1	Materiaalin pursotus.....	9
2.2	Nesteen fotopolymerisointi	10
2.3	Jauhepetimenetelmät	11
2.4	Materiaalit	12
2.4.1	ABS (Akrylinitriilibutadieenistyreeni).....	12
2.4.2	PLA (Polylaktidi).....	12
2.4.3	PP (Polypropeeni).....	12
2.4.4	PA (Polyamidi)	12
2.4.5	PC (Polykarbonaatti).....	13
3	AM-TEKNIKALLA TUOTETTUJEN MUOVIEN MATERIAALITESTAAMINEN.....	14
3.1	Testausolosuhteet.....	14
3.2	Vetolujuuskoe.....	15
3.3	Taivutuskoe.....	16
3.4	Iskulujuuskoe	16
3.5	Kovuuskoe.....	18
4	MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUSTAVAN KÄYTTÖ HAMMASHOIDOSSA	19
4.1	AM-tekniikan ja materiaalia poistavan menetelmän erot	20
4.2	Käyttökohteet ja valmistusprosessi.....	20
5	NESTEEN FOTOPOLYMERISOINTI-TULOSTEIDEN MATERIAALITESTAUS	22
5.1	Tulostuskulman vaikutus	22
5.2	Veden vaikutus materiaaliin	23
5.3	UV-jälkikäsittely	24
5.3.1	Varseo Wax -testisauvojen UV-jälkikäsittely	26
5.3.2	Dental SG -testisauvojen UV-jälkikäsittely	26
5.4	Testisarjat	26
5.5	Koesauvojen valmistus	27
5.6	Testattavat materiaalit	29
5.7	Laitteisto	30
5.8	Materiaalitestaus.....	31

5.8.1	Vetokokeet	31
5.8.2	Taivutuskokeet	35
5.8.3	Iskulujuuskokeet.....	39
5.8.4	Kovuusmittaus	40
6	LOPPUTULOKSET JA PÄÄTELMÄT	42
7	YHTEENVETO	46
	LÄHTEET.....	47

1 JOHDANTO

Materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä on kasvanut suureksi tuotantotavaksi maailmanlaajuisesti. Tekniikka on kehittynyt paljon ja yhä useammat yritykset ja tutkijat kehittävät materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä tehokkaammiksi ja tarkemmiksi. Materiaalia lisääviä tekniikoita on olemassa jo monia erilaisia. Tietämyksen ja osaamisen lisääntyessä vanhoja tekniikoita kehitetään ja uusia keksitään.

Suomessa materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät ovat yleistyneet paljon lähivuosien aikana. Useista yrityksistä ja oppilaitoksista löytyy jo oma 3D-tulostin. Lisäksi Suomessa on tehty jo lukuisia tutkimuksia ja pyritty kehittämään tätä mullistavaa valmistusmenetelmää.

Tämä työ liittyy Savonia-ammattikorkeakoulun LIVA-hankkeeseen, ja työn kokeellinen osuus on tehty yhteistyössä hammastekniikkaan erikoistuneen yrityksen Mallihammas Oy:n kanssa. Opinnäytetyön aiheena on materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän muovikappaleiden materiaalitestaus ja nesteen fotopolymerisointi -tulosteiden testaus. Tässä tutkimustyössä selvitetään, kuinka 3D-tulostettuja muoveja testataan ja saadaan selville niiden mekaaniset ominaisuudet. Työssä tehdään materiaalitestaukset tulosteille, jotka on tehty nesteen fotopolymerisointitekniikkaa käyttäen. Erityisesti työssä keskitytään hammaspuolen SLA-materiaalien ominaisuuksiin ja niihin vaikuttaviin tekijöihin. Lisäksi työssä käsitellään yleisesti materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän käyttämisestä hammas-tekniikassa.

Työ liittyy Savonian LIVA-hankkeeseen (lisäävä valmistus Pohjois-Savossa), jonka tavoitteena on rakentaa ja käynnistää lisäävän valmistuksen toimintaympäristö, joka parantaa ja vahvistaa uuden tiedon ja osaamisen siirtämistä olemassa olevaan yritystoimintaan ja edistää innovaatioiden syntymistä sekä lisää työn tuottavuutta.

Tarkoituksena on myös saada LIVA-hankkeeseen tietoa hammasteknisten materiaalien ominaisuuksista. Lisäksi tutkimustuloksista on tarkoitus saada oikeasti hammasalan yrityksiä hyödyttäviä tuloksia. Mallihampaassa on havaittu vaikeuksia parentakiskojen valmistamisessa käytettävän materiaalin kestävyudessa. Tämän takia Mallihammas halusi, että materiaalin lujuusominaisuuksia testataan. Yksi osa työstä onkin selvittää, mitkä seikat vaikuttavat tulosteiden kestävyteen yleisesti. Sekä selvittää mistä tekijöistä mallihampaassa havaitut kestävyysongelmat voivat johtua. Tavoitteena on myös saada hyödyttäviä tuloksia yleisesti nesteen fotopolymerisointi-tekniikasta, koska hammasalan lisäksi tätä tekniikkaa käytetään lukuisiin muihinkin tarkoituksiin.

Työn tavoitteena on saada selkeä ja kattava tutkimustyö, jota voidaan käyttää jatkossa hyödyksi LIVA-hankkeessa ja fotopolymerisointitekniikkaa käyttävissä yrityksissä.

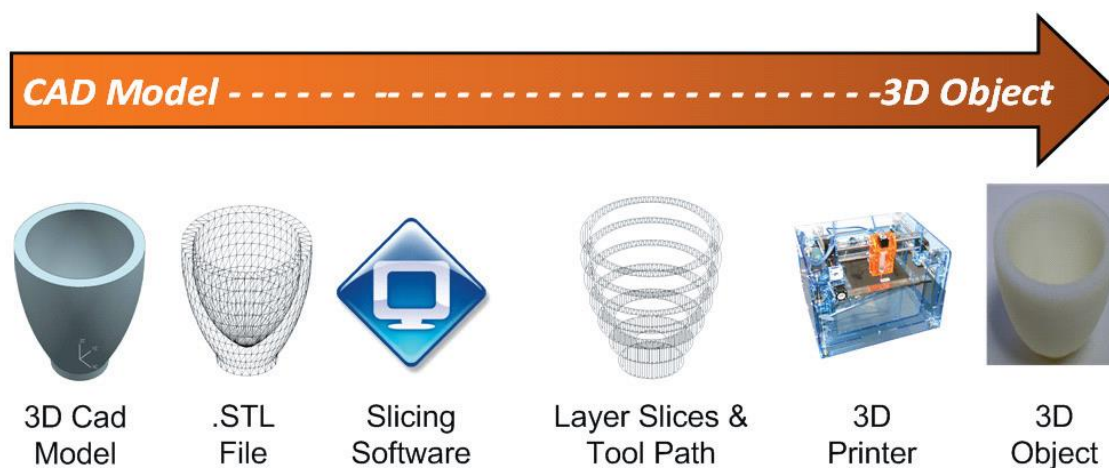
2 MATERIAALIA LISÄÄVÄT VALMISTUSMENETELMÄT

Additive manufacturing (lyhyesti AM) eli lisäävä valmistus on valmistusmenetelmä, jossa tietokoneella suunniteltu kappale valmistetaan materiaalia lisäämällä sen muovaamisen tai poistamisen sijaan. ASTM ja ISO -standardisoiemisjärjestöt suosittelevat käyttämään nimeä Additive manufacturing eli lisäävä valmistus. Muita käytettyjä termejä AM-menetelmistä ovat mm. 3D-printing eli 3D-tulostus ja rapid prototyping eli pikavalmistus. (ISO/ASTM 52900:2015)

Kappaleita aletaan tehdä jossain muodossa olevan 3D-mallin pohjalta, joka yleensä tehdään skannaamalla tai käyttämällä CAD-ohjelmistoa. 3D-malli pilkotaan tasoiksi, jotka valmistetaan kerros kerrokselta. Tämä mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden käytön, joiden valmistaminen perinteisillä menetelmillä on hankalaa ja hidasta. Menetelmä etenee seuraavalla tavalla: Aluksi luodaan tietokonepohjainen 3D-malli, joka muunnetaan tulostimen ymmärtämään tiedostomuotoon, joka yleisimmin on STL-tiedostotyyppi. STL-tiedosto pilkotaan siivutusohjelmalla halutun kerroskorkeuden mukaisiksi kerroksiksi. Eri AM-menetelmät käyttävät siivujen tulostamiseen hieman erilaisia tapoja. Materiaalin pursotus menetelmässä siivutusohjelmisto laskee myös jokaiselle siivulle tulostusreitit ja käytettävän materiaalin määrän, jotka tallennetaan gcode-konekoodiksi. Lopulta laite valmistaa tuotteen konekoodin pohjalta (kuva1). (Campbell, Williams, Ivanova, Garrett, 2011)

AM-menetelmillä pystytään valmistamaan monimutkaisia kappaleita vähillä työvaiheilla ja työkaluilla, mutta jos kappale vaatii tarkkoja toleransseja, se on koneistettava jälkikäteen. Lisäksi materiaalia käytetään kappaleen valmistamiseen huomattavasti vähemmän verrattuna perinteisiin menetelmiin, koska materiaalia käytetään vain siellä missä sitä tarvitaan. Ylimääräistä materiaalia voi syntyä liitospinnoissa ja tukimateriaaleissa, mikäli tukimateriaali ei ole osa kappaleen rakennetta. AM-tekniikan yhtä heikoimpana ominaisuutena voidaan pitää tulostusnopeuden hitautta. (Campbell, Williams, Ivanova, Garrett, 2011)

Tässä luvussa esitetään tunnetuimpien AM-menetelmien toimintaperiaatteita ja ominaisuuksia.

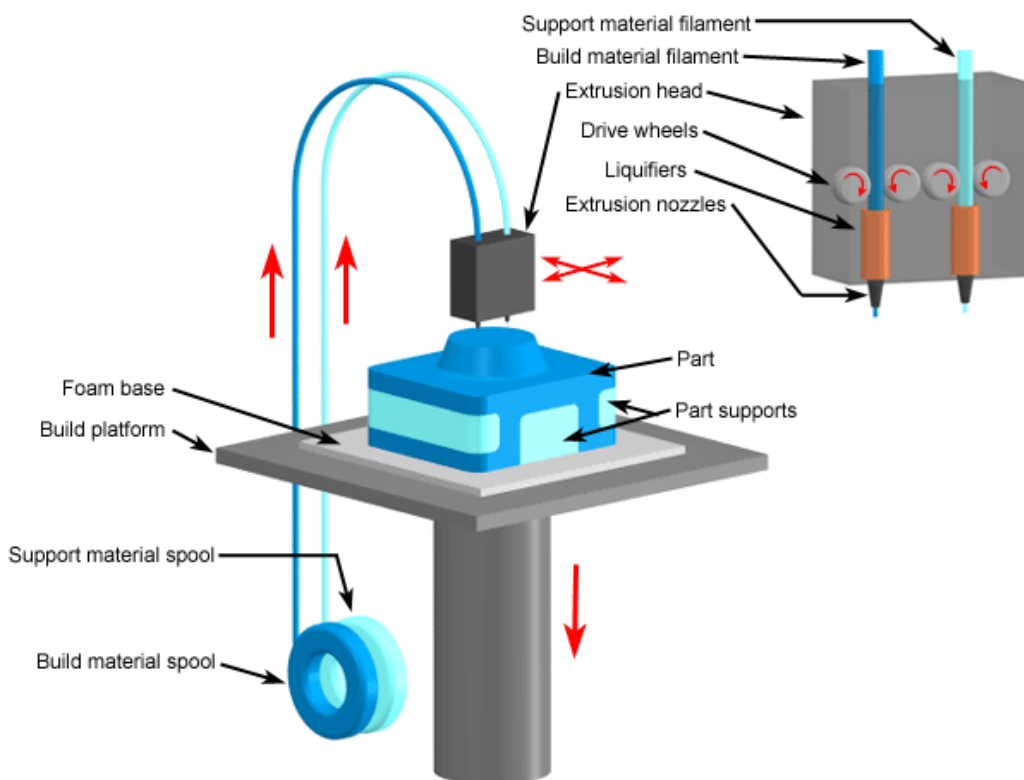


KUVA 1. Materiaalia lisäävän valmistuksen vaiheet (Campbell, Williams, Ivanova, Garrett, 2011.)

2.1 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotus (Material Extrusion) on yleisin kuluttajatasolla käytössä oleva muovia käyttävä AM-menetelmä. Tekniikka perustuu muovilangan syöttämiseen lämmitetyn suuttimen läpi (kuva 2). (Palermo, 2013)

Materiaalinpursotusmenetelmässä viipalointiohjelmassa 3D-malli viipaloidaan siivuiksi ja luodaan gcode-konekoodi siivuille. Tulostin käyttää konekoodia tulostimen X, Z ja Y -moottoreiden ohjaamiseen, materiaalin syöttöön ja lämpötilojen säätämiseen. Tulostusprosessissa tulostin pursottaa materiaalin kerroksittain lämmitettävän suuttimen läpi. Samaa konekoodin mukaista kerroksittaista prosessia toistetaan, kunnes koko kappale on valmis. Jos tulostettavassa kappaleessa on roikkuvia pintoja, siivutusvaiheessa on huomioitava tarvittavien tukirakenteiden parametrit. Kappaleen valmistusta tukimateriaali irrotetaan joko käsin tai liuottamalla. Joissakin tulostimissa on kaksi tulostussuutinta, joista toinen mahdollistaa vesiliukoisen tukimateriaalin käytön. Tällöin tukirakenne on oltava määriteltynä toiselle suuttimelle, jotta laite osaa lukea käskyn vaihtaa käytettävää suutinta. Tulostusaikaan vaikuttavat esim. kappaleen koko, tulostussuunta ja materiaaliominaisuudet. Pursotusmenetelmä on hidas verrattuna esimerkiksi nesteen fotopolymerisointimenetelmään. Materiaalin pursotusmenetelmällä pystytään tulostamaan varteenotettavia testikappaleita ja kappaleita, jotka eivät vaadi tarkkoja mittatoleransseja, koska pursotusmenetelmät ovat tarkkuudeltaan AM-menetelmien heikoimmasta päästä. (Palermo, 2013)



Copyright © 2008 CustomPartNet

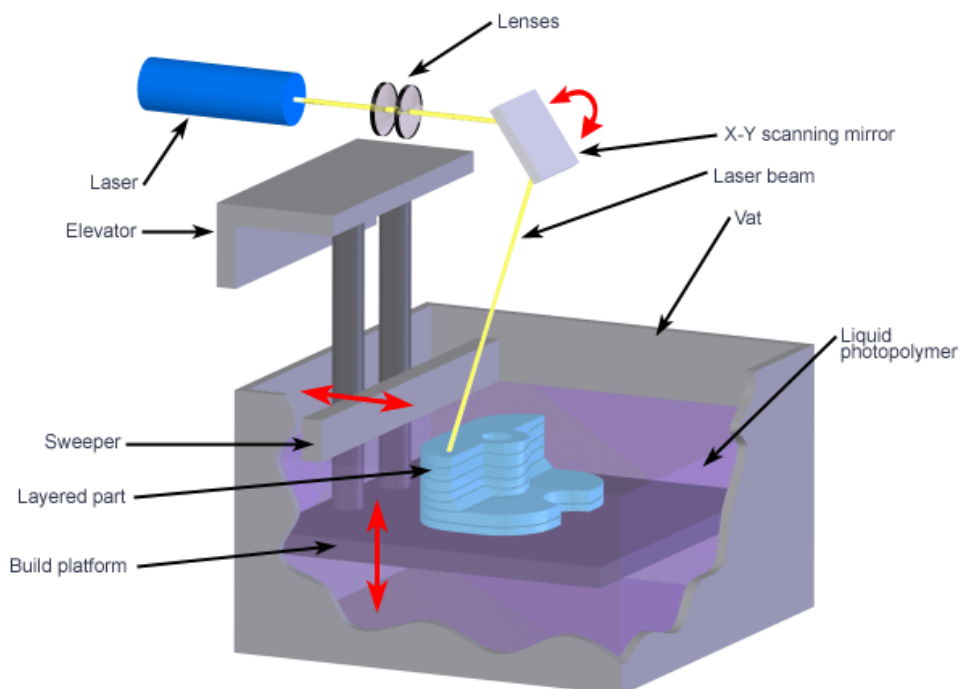
KUVA 2. Pursotusmenetelmän toimintaperiaate (Custompartnet, 2008.)

Yleisimmät käytettävät materiaalit ovat ABS (Akryliniiriilubutadieenistyreeni) ja PLA (Polylaktidi). Nämä kestopuovut sopivat hyvin tulostusmateriaaliksi, koska ne kestävät lämpöä, kemikaaleja ja mekaanisia rasituksia. Nykyään on saatavissa myös teknisiä erikoismuoveja, kuten nylonia ja PPSF (polyfenyyilisulfone). (Palermo, 2013; Stratasys)

Pursotusmenetelmän hyvä puoli on laitteiden ja materiaalien edullisemmat hinnat verrattuna muihin materiaalia lisääviin valmistusmenetelmiin. Laitteiden valmistajia on nykyään jo useita, ja niitä on tarjolla niin kuluttajille kuin teollisuuteen. Tekniikan huonoina puolina voidaan pitää valmistusprosessin hitautta ja valmiiden kappaleiden huonoa pinnanlaatua, mikäli kappaleelta vaaditaan jokin pintatoleranssi. (Palermo, 2013)

2.2 Nesteen fotopolymerisointi

Nesteen fotopolymerisointi (VAT Photopolymerization) on AM-menetelmä, joka perustuu nestemäisen fotopolymeerin kovettamiseen UV-laserin tai DLP-projektorin avulla (kuva 3). Materiaalina käytetään nestemäistä hartsia, joka kovettuu altistuessaan UV-valolle. Standardin mukainen nimitys suomen kielellä on valokovetus altaassa, mutta tässä työssä käytetään nimeä fotopolymerisointi. (Palermo, 2013; SFS-ISO/ASTM 52900:2017)



Copyright © 2008 CustomPartNet

KUVA 3. Nesteen fotopolymerisointi toimintaperiaate (Custompartnet, 2008.)

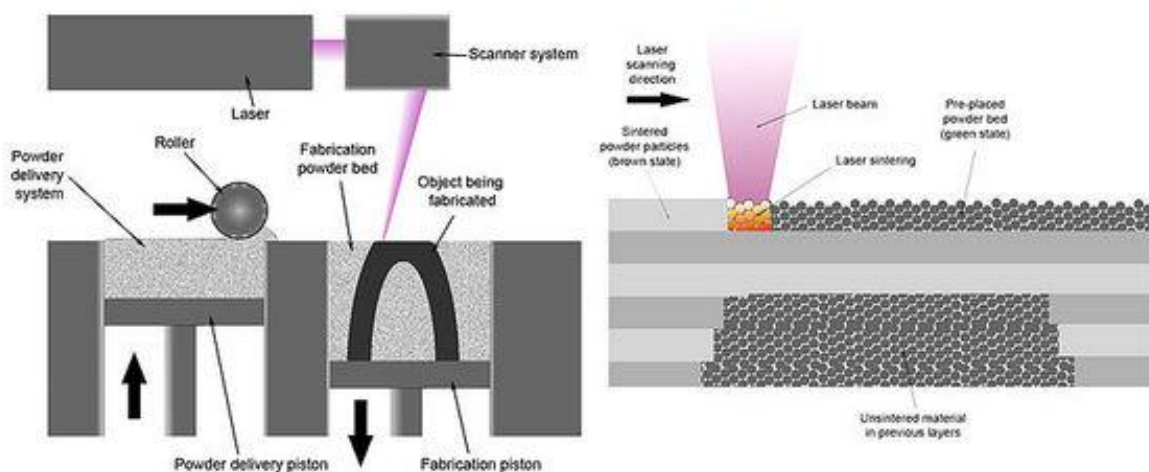
Nesteen fotopolymerisointilaitteet sisältävät säiliön, jossa on nestemäistä fotopolymeeriä. Säiliössä on alusta, johon haluttua kappaletta aletaan kovettaa. Laite kovettaa fotopolymeeriä ohut kerros kerrallaan kappaleen leikekuvaa vastaavan alueen verran. Kun yksi kerros on kovettunut, alusta nousee taas yhden kerrospaksuuden verran ja laite kovettaa kerroksen. Tämä toistuu yhä uudelleen,

kunnes kappale on täysin muodostunut. Valmis kappale irrotetaan alustasta ja lopullinen kovetus tehdään UV-valouunissa. (Palermo, 2013)

Menetelmän hyvä puoli on laitteiden tulostustarkkuus, joka mahdollistaa erittäin tarkkojen kappaleiden valmistamisen. Valmiit kappaleet ovat pinnanlaadultaan todella hyviä verrattuna esimerkiksi purrottavalla menetelmällä valmistettuihin kappaleisiin. Tarkkuuden takia menetelmää käytetään myös proteesien tekemiseen ja sitä käytetään hyväksi lääketieteessä. Menetelmää käyttäen on muun muassa tehty kuulolaitteen runkoja, jotka sopivat täydellisesti käyttäjän korvaan. Menetelmän heikkoutena voidaan pitää materiaalien korkeita hintoja. Lisäksi käytössä olevat materiaalit ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan heikompia kuin perinteiset kestopuovut. (Maxey, 2013)

2.3 Jauhepetimenetelmät

Jauhepetimenetelmä (Powder Bed Fusion) on AM-menetelmä, joka perustuu pienien muovi-, keraamikka-, lasi- tai metallipartikkeleiden sintraamiseen tai sulattamiseen suuritehoisen laserin avulla muodostaen kiinteän 3D-ulotteisen kappaleen (kuva 4). Standardin mukainen nimi menetelmälle on jauhepetisulatus. (SFS-ISO/ASTM 52900:2016)



KUVA 4. Jauhepetimenetelmän toimintaperiaate (PALERMO, 2013.)

Jauhepetimenetelmässä jauhemuodossa oleva raaka-aine sintrataan tai sulatetaan kiinteäksi kappaleeksi. Sintraus tehdään sulamispistettä alemmassa lämpötilassa, jolloin partikkelit ja niiden osat eivät sula prosessissa. Tehokkaammat laitteet pystyvät sintraamisen sijasta sulattamaan partikkelit täysin, jolloin on mahdollista saada 100 % kiinteitä kappaleita.

Menetelmässä jauhetta levitetään määritetyn kerrospaksuuden verran työstöalueelle, jonka jälkeen laser sintraa kappaleen leikekuvaa vastaavan alueen. Työstöaluetta lasketaan kerrospaksuuden verran alaspäin ja alueelle levitetään uusi kerros jauhetta. Tämä toistuu yhä uudelleen, kunnes kappale on kokonaan muodostunut. (Wellington, 2014)

Jauhepetimenetelmän hyviä puolia ovat sen tarkkuus ja korkeita sulamislämpöjä vaativien materiaalien käyttö. Lisäksi menetelmä on kustannustehokasta, koska tulostettaessa ei tarvita tukimateriaaleja kappaleen tukemiseen, jolloin materiaalia käytetään vain tarvittava määrä kappaleen valmistamiseen. (Wellington, 2014)

2.4 Materiaalit

Tässä kappaleessa esitetään joitakin AM-menetelmissä käytettävien muovien tietoja ja ominaisuuksia.

2.4.1 ABS (Akryylinitriilibutadieenistyreeni)

ABS-muovin monomeerit ovat akryylinitriili, butadieeni ja styreeni. ABS on kevyt ja hyvin vahva lämpömuovattava muovilaatu. Muovia käytetään laajasti eri käyttökohteisiin, näitä ovat mm. putkistot, lelut, musiikki instrumentit ja jopa turvallisuusvälineet kuten kypärät ja suojat. Muovilla on hyvä sitkeyden sekä jäykkyyden yhdistelmä ja sillä on hyvä pinnanlaatu. Muovin lasittumislämpötila on noin 105 astetta. (Creativemechanism)

2.4.2 PLA (Polylaktidi)

PLA-muovin raaka-aineina käytetään maissitärkkelystä ja sokeriruokoa. PLA on biohajoava termoplastinen muovilaatu. Muovia kutsutaan "vihreäksi muoviksi" koska se on ympäristölle ei haitallinen muovi. PLA ei liukene veteen ja sen hajoaminen vaatii lämpökompostointia. Muovia käytetään laajasti pakkausmateriaalina, erityisesti elintarvikkeiden pakkaamisessa. PLA:n huonoja puolia ovat sen hauraus ja lämmönkestävyys, sen lasittumislämpötila on noin 50 astetta jolloin kappaleet alkavat menettää muotoaan. (Creativemechanism)

2.4.3 PP (Polypropeeni)

PP-muovi on termoplastinen muovi, jonka raaka-aine on propeeni. Muovi on hyvin lämmönkestävä, sen sulamispiste on 130 astetta. Lisäksi se on erittäin vastustuskykyinen liuottimille, hapoille ja emäksille. PP:a käytetään laajasti mm. kotitalousastioissa ja autoteollisuudessa komponenteissa. Se on lujuusominaisuuksiltaan suhteellisen vahva, mutta ei kovin elastinen. (Creativemechanism)

2.4.4 PA (Polyamidi)

PA-muovi on polymeeri, jossa ainesosat ovat yhdistyneet amidisidoksin. Polyamidit ovat keinotekoisia polymeerejä, joista tunnetuin tunnetaan nimellä nylon. Polyamidi luokitellaan teknisiin muoveihin ja siitä valmistetaan mm. vaatteita, köysiä ja pieniä koneenosia kuten hammaspyöriä. PA on ominaisuuksiltaan hyvin elastinen ja kestää korkeita lämpötiloja. Sulamispiste on 220 astetta ja muovin erikoinen ominaisuus on, että sitä voidaan lämmittää lähelle sulamispistettä, välillä jäädyttää ja lämmittää uudelleen ilman, että muovi hajoaa. PA-muovi imee paljon vettä itseensä muihin muoveihin verrattuna. (Creativemechanism)

2.4.5 PC (Polykarbonaatti)

PC-muovi on termoplastinen muovi, jonka merkittävin ominaisuus on sen iskulujuus. Siitä valmistetaan mm. kypäriä, suojalaseja, autoteollisuuden komponentteja ja iskunkestäviä muovilevyjä. Materiaalin hyvä ominaisuus on sen työstettävyys, sitä verrataan jopa alumiinin työstettävyyteen. Muovilla on hyvä lämmönkestävyys ja sitä voidaan jopa taittaa lämmittämällä. (Creativemechanism)

3 AM-TEKNIKALLA TUOTETTujen MUOVIEN MATERIAALITESTAAMINEN

Lisäävää valmistusta on käytetty jo vuosikymmeniä teollisuudessa muotoilijoiden ja suunnittelijoiden malli- ja prototyyppikappaleiden apuvälineenä. Laitteiden kehittyminen ja yleistyminen on johtanut siihen, että nykyään tulostettu kappale voi olla myös loppukäyttöön tarkoitettu tuote. Kun puhutaan loppukäyttöön tarkoitetusta tuotteesta, niin sen vaatimustasot nousevat korkeammalle. Tuotteilta vaaditaan erilaisia mekaanisia ominaisuuksia käyttötarkoitusten mukaan, näitä voivat esimerkiksi olla vetolujuus, taivutuslujuus, iskulujuus ja kovuus.

AM-tekniikalla tuotettujen kappaleiden materiaalitestaukset perustuvat ISO- ja ASTM-standardeihin. ISO ja ASTM ovat julkaisseet materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä koskevia standardeja. SFS-EN ISO 17296-1/-2/-3 ja ASTM 52921-13 -standardit perustuvat materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän materiaalitestaukseen, terminologiaan ja olosuhteisiin eri sovelluksissa. Standardit käsittelevät sekä muovi- että metallikappaleiden testausmenetelmät. Standardit eivät erottele käytettävää AM-tekniikkaa, vaan kaikille tekniikoille pätee samat testausmenetelmät. ISO- ja ASTM -standardit vastaavat teknisesti toisiaan, mutta ne eivät kuitenkaan tuota aivan samanlaisia tuloksia. Tämä johtuu standardeissa käytettävien koekappaleiden muodon, testinopeuksien ja testitapojen pienistä eroavaisuuksista. Tässä työssä keskitytään ISO 17296 -standardin menetelmiin, koska työn tutkimusosiossa käytetään niitä. (SFS-EN ISO 17296-1/-2/-3:2016, ASTM 52921-13)

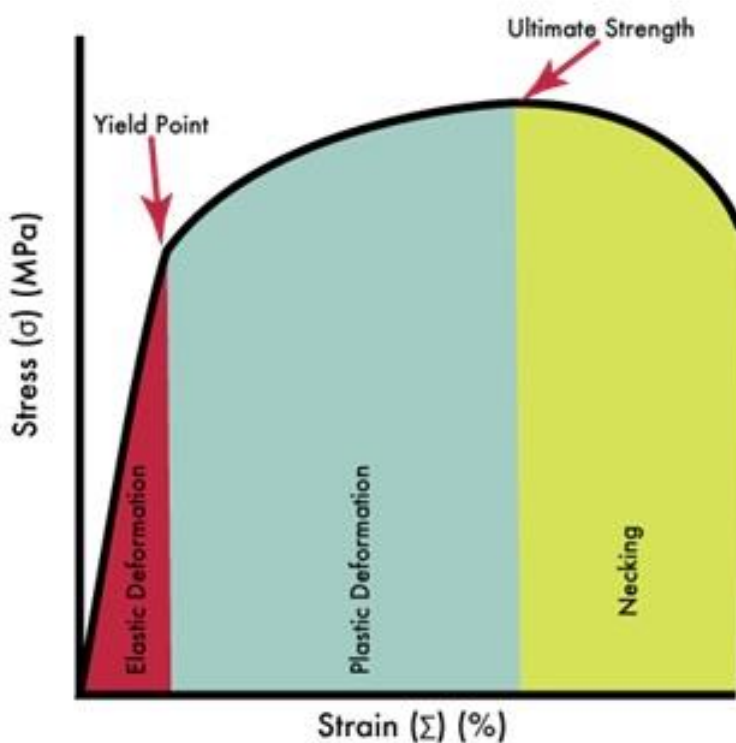
3.1 Testausolosuhteet

Testausolosuhteiden ottaminen huomioon materiaalitestauksia tehtäessä on tärkeää, koska olosuhteet vaikuttavat muovien mekaanisiin ominaisuuksiin. Muovien mekaaniset ominaisuudet riippuvat sisäisistä rakenneominaisuuksista ja ulkoisista tekijöistä. Sisäisiä rakenneominaisuuksia ovat kemiallinen koostumus, moolimassajakauma, ristisilloittaminen, kiteisyysaste, orientaatio ja lisäaineet. Ulkoisia tekijöitä ovat lämpötila, lämpökäsittelyt, paine, erilaiset kuormitukset, atmosfääri ja kuormituksen frekvenssi. Erityisesti lämpötila on otettava huomioon testauksissa, koska yleisesti muovit pehmenevät lämpötilan noustessa. (Hakala, 2014)

Testausolosuhteet määritellään testattavan materiaalin standardissa. Jos materiaalin omia standardi olosuhteita ei ole ollenkaan määritely, materiaalitestaus tehdään ISO 291 -standardin mukaan. ISO 291 -standardi käsittelee muovien testausolosuhteet. Testikappaleiden tulee olla n. 16 tuntia määritellyssä lämpötilassa ennen kokeita. Määritelty lämpötila on $23 \pm 2 \text{ C}^\circ$, ja suhteellinen ilmankosteus 50 %. Olosuhteista voidaan poiketa silloin, jos testauksen tarkoituksena on esimerkiksi testata muovin kestävyyttä alhaisissa tai korkeissa lämpötiloissa. On myös syytä muistaa, että huoneenlämmössä tehdyistä testeistä on vaikea arvioida materiaalin käyttäytymistä muissa lämpötiloissa. (ISO 291; Zwick Roell)

3.2 Vetolujuuskoe

Vetolujuuskokeella testataan kappaleen vetolujuutta. Vetolujuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä vastustaa eri suuntiin vetäviä voimia. Vetokokeen avulla määritetään materiaalin kimmomoduuli, murtolujuus, murtovenymä ja myötöraja. Eli kokeella saadaan tietoa kappaleen jäykkyys-, sitkeys- ja lujuusominaisuuksista. Vetolujuus voidaan jakaa eri raja-arvoihin, jotka ovat elastinen ja plastinen muodonmuutos sekä murtuminen. Kun kappaleelle aletaan tehdä vetokoetta, alle myötörajan rasi- tuksessa tapahtuu vain elastisia muodonmuutoksia eli ei pysyviä muodonmuutoksia. Myötörajan ylityessä kappaleeseen tulee plastisia muodonmuutoksia eli pysyviä muodonmuutoksia. Murtolujuuden ylittyessä kappale murtuu ja hajoaa (kuva 5). (SFS-EN ISO-527-1:1995, Rolledalloys)

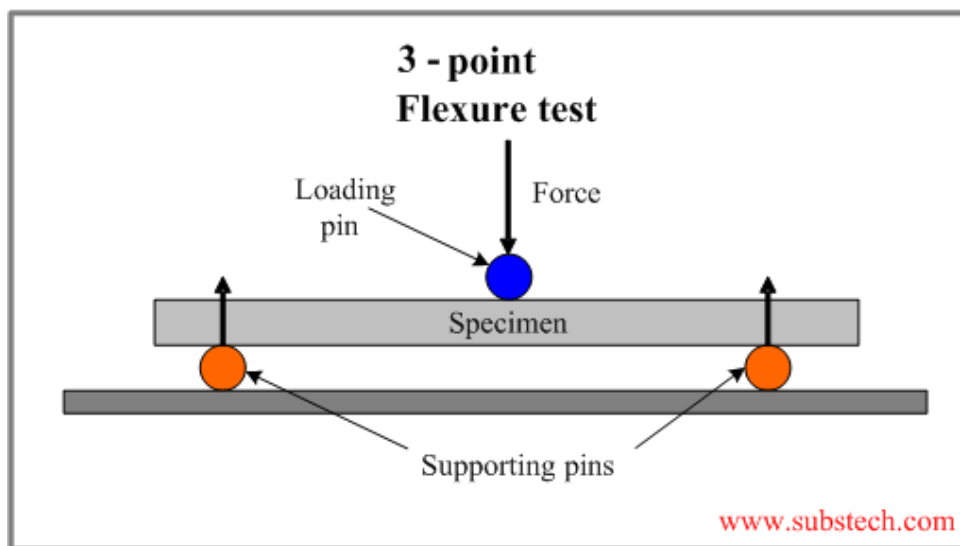


KUVA 5. Vetolujuuden raja-arvot (Rolledalloys.)

Vetokoe on yleisimmin käytetty standardoitu mekaaninen testausmenetelmä. Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä tuotettujen muovikappaleiden vetokokeissa käytetään standardia SFS ISO 527-1. Standardi käsittelee vetokokeen testimenetelmän testitavan ja sen parametrit. Varsinaisessa vetokokeessa koe tehdään vähintään viidelle standardin mukaiselle yleisvetosauvalle. Vetokokeessa koesauva asetetaan vetokoneen leukojen väliin ja sitä vedetään pituussuuntaisesti vakionopeudella, kunnes sauva katkeaa. (SFS-EN 527-1)

3.3 Taivutuskoe

Taivutuskokeella testataan kappaleen taivutuslujuuksia. Taivutuslujuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä vastustaa taivutusta. Kokeen avulla saadaan selville materiaalin taivutusjännitys ja taivutusmoduuli eli kimmokerroin. Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä tuotettujen muovien taivutuskokeissa käytetään standardia SFS-EN 178. Standardi käsittelee muovien taivutusominaisuuksia ja testimenetelmiä määritetyillä tavoilla. Kokeessa koesauvaa kuormitetaan tasaisella nopeudella käyttäen kolmipistetaivutusta. Koesauva asetetaan symmetrisesti kahden tuen päälle ja sauvaa alestaan kuormittaa sen keskikohdasta. Testi päättyy, kun koesauva katkeaa (kuva 6). (SFS-EN ISO 178)

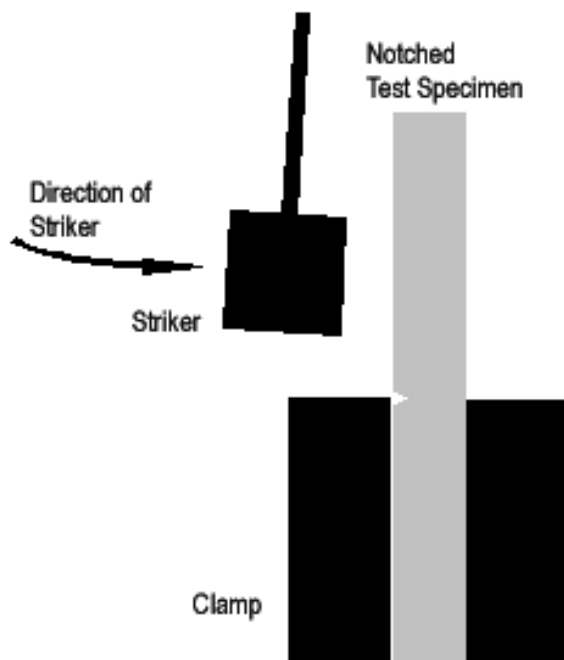


KUVA 6. Kolmipistetaivutuskoe (Substech.)

3.4 Iskulujuuskoe

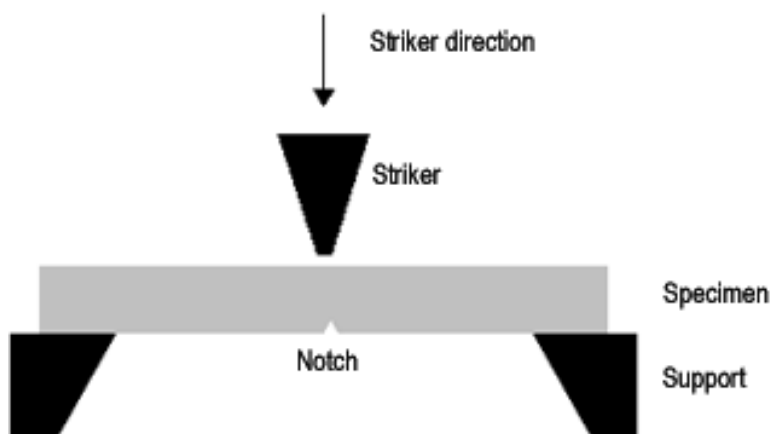
Iskulujuuskoe on suunniteltu mittaamaan vastustuskykyä tilanteissa, joissa kappaleeseen kohdistuu yhtäkkinen voima, kuten yhteentörmäys, putoaminen tai hetkellinen isku. Muovien iskulujuuden määrittämiseen käytetään yleisimmin heilahdusiskuvasarakoetta. Heilahdusvasarakokeissa alustalle asetettu testikappale lyödään poikki vapaasti omalla painollaan heilahtavalla iskuvasaralla. Testistä saadaan tulokseksi kappaleen murtamiseen vaadittava energiamäärä. Tulos ilmoitetaan energiana poikkipinta-alaa kohden, kJ/m^2 . Iskuenergialla tarkoitetaan energian määrää, jolla testikappale saadaan murtumaan. Heilurivasaran iskiessä testikappale alkaa absorboida energiaa. Kun testikappaleen plastinen muodonmuutosraja ylittyy, niin testikappale ei pysty enää absorboimaan iskuenergiaa ja kappale murtuu. (Hakala, 2014; Azom, 2005)

Materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä tuotettujen muovien iskulujuuskokeissa käytetään Izod- ja Charpy-iskulujuustestejä. Standardi SFS-EN ISO 180 käsittää Izod-iskulujuuden määrittämisen muovimateriaaleille. Kokeella pyritään selvittämään materiaalin iskulujuus ja loveamisherkyys. Kokeessa lovitettu tai loveamaton testikappale kiinnitetään pystysuoraan kohti heilurivasaraa (kuva 7). (SFS-EN ISO 180; Azom)



KUVA 7. Izod-iskulujuuskokeen kiinnitystapa ja vasaran iskuuunta (Azom, 2005.)

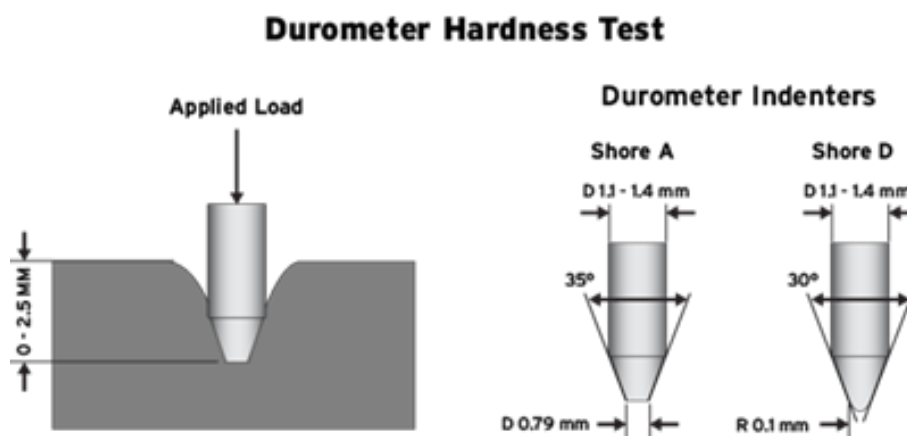
SFS-EN ISO 179-1 standardissa määritellään Charpy-iskulujuuden testautapa ja parametrit muovimateriaaleille. Charpy- ja Izod-kokeen eroja ovat koekappaleiden kiinnitystavat, vasaran iskuuunta ja loven suunta. Charpy-kokeessa testikappale on tuettu molemmista päistä ja vasaran isku kohdistuu kappaleen keskikohtaan. Izod-kokeessa testikappaleen lovi asetetaan kohti iskuuuntaa ja Charpyssa iskuuunnasta poispäin (kuva 8). (SFS-EN ISO 179-1; Azom, 2005)



KUVA 8. Charpy-iskulujuuden kiinnitystapa ja vasaran iskuuunta (Azom, 2005.)

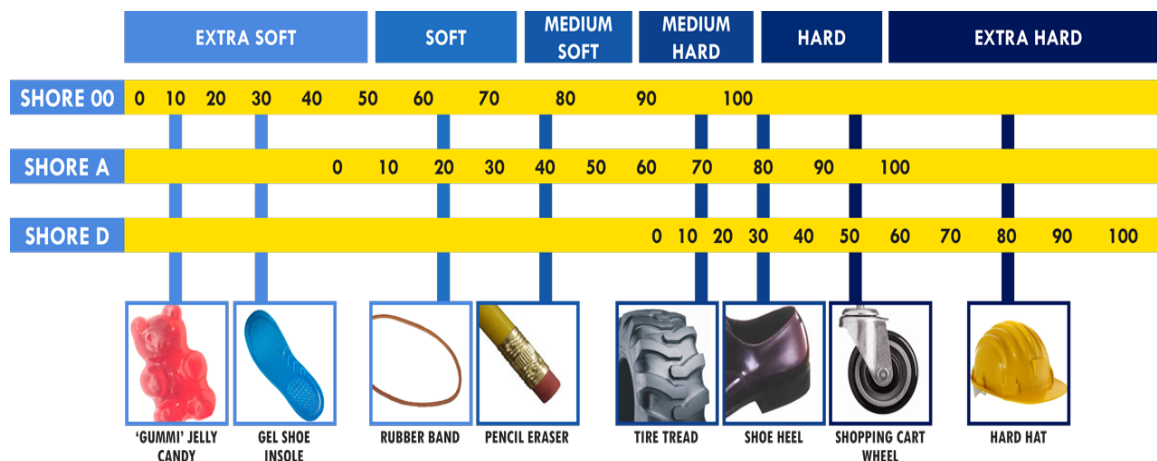
3.5 Kovuuskoe

Kovuus on materiaalin yksi mekaanisista ominaisuuksista. Kovuudella on kyky vastustaa muodonmuutoksia, joita ovat mm. naarmuuntuminen ja kuluminen. Standardi SFS-EN ISO 868 käsittelee muovien tunkeumakovuuden mittaamista durometrillä (Shore-Kovuus). Kokeessa määritelty mittapää painetaan testattavaan materiaaliin, ja tunkeuman syvyys mitataan. Tunkeumakovuus on kääntäen verrannollinen tunkeumaan, ja on riippuvainen materiaalin kimmomoduulista ja viskoelastisista ominaisuuksista. Standardi käsittelee A- ja D-tyyppin durometrit. A-tyyppi on tarkoitettu pehmeille materiaaleille ja D-tyyppi koville. Tyypit eroavat mittapään muodoistaan; D-tyyppin mittapää on terävämmän muotoiltu kuin A-tyyppin mittapää (kuva 9). (SFS-EN ISO 868)



KUVA 9. A- ja D-tyyppin durometrien mitat (Apache.)

Shore-kovuudet voidaan kategorioida pehmeistä todella koviin materiaaleihin. Shore-kovuuden asteikko on 0 – 100. Kuvassa 10 näkyy asteikot määriteltynä pehmeistä koviin ja esimerkki esineitä mitä kukin asteikko vastaa.



KUVA 10. Shore-kovuuksien asteikko (Smooth-On.)

4 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUSTAVAN KÄYTTÖ HAMMASHOIDOSSA

AM-tekniikoiden kehittymisen ansiosta tekniikoita voidaan nykyään käyttää apuvälineenä terveydenhuollossa ja lääketieteessä. AM-tekniikalla pystytään korvaamaan vanhanaikaisia työvaiheita ja nopeuttamaan hoitoprosessia (kuva 11).

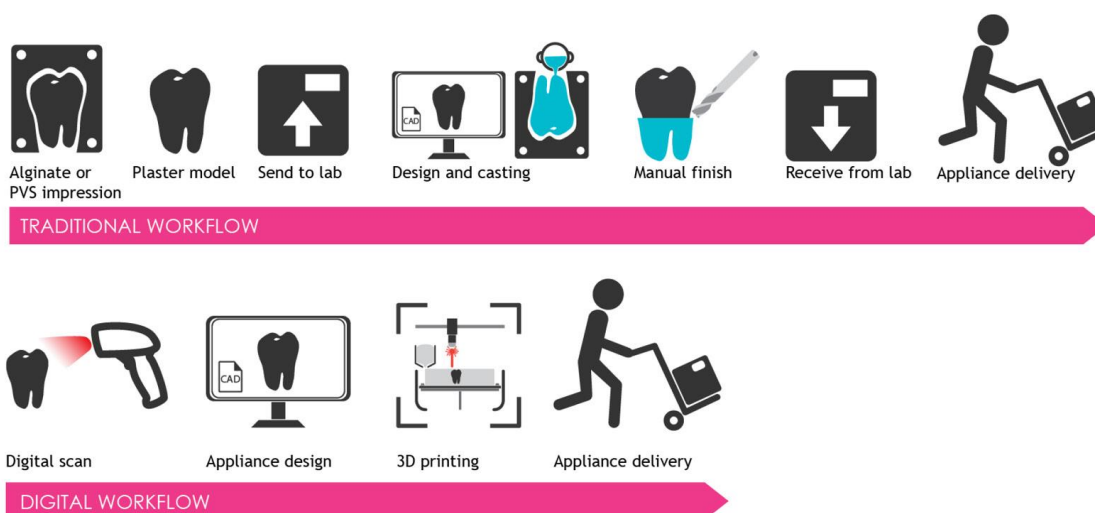
Hammashoidossa AM-tekniikka on otettu käyttöön apuvälineeksi diagnoosien tekemiseen. Hoidon suunnitteluun ja toteutukseen on otettu käyttöön kehittyneempi 3D-mallinnus ja AM-tekniikka perinteisen 2D-mallinnuksen ja kipsimallien rinnalle. Niiden hyödyntäminen auttaa yhteistyötä hammaslääkärien ja hammasteknikkojen välillä, kasvattaa potilasmääriä sekä mahdollistaa kätevän ja tehokkaan tiedon säilyttämisen, haun ja jakamisen. Erilaisten suun sisäisten ja kasvojen kuvauslaitteiden käyttöönotto on parantanut hoidon tarkkuutta ja tehokkuutta, sekä lisännyt hoidon onnistumisen ennustettavuutta hammashoidossa. Uusien materiaalien ja tekniikoiden käyttö hammashoidossa on mahdollista uusien 3D-kuvantamislaitteiden ja tulostimien ansiosta.

Hammaslaboratoriot ympäri maailmaa ovat jo ottaneet AM-tekniikan osaksi työnkulkua. Sen avulla luodaan tarkkoja anatomisia malleja hampaista ja ikenistä. Tulosteina voidaan tehdä myös oikomis-kojeita, hammasproteeseja ja hammasimplantteja kuten kruunuja, siltoja, väliosia ja ruuveja.

AM-tekniikalla tuotetut hammasmallit sekä esimerkiksi proteettiset ratkaisut ovat erittäin tarkkoja ja niiden valmistus säästää normaaleihin kipsimallien ja hammasproteesien valmistukseen verrattuna aikaa, materiaaleja, rahaa. Lisäksi se vähentää työvaiheita ja ammattitaitoisen työvoiman tarvetta.

(Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine, Heinonen, 2016)

Suomessa AM-tekniikalla käytettäviä laitteita on jo joillakin hammaslaboratorioilla, yksityisillä hammaslääkäriasemilla ja yliopistollisilla sairaaloilla, mutta niiden käyttö on vielä melko harvinaista. Muutama hammaslaboratorio on jo ottanut käyttöönsä AM-tekniikan esimerkiksi hammasproteettisten ratkaisuiden valmistukseen. Laitteita on kehitelty vastaamaan pienen klinikan tarpeisiin sekä laboratorioille massatuotantoa varten. Tekniikka on kuitenkin tulossa laajempaan käyttöön tulevien vuosien aikana, kun tieto 3D-tulostuksen mahdollisuuksista ja sen hyödyistä kantautuu alan ihmisten keskuuteen. (Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine, Heinonen, 2016)



KUVA 11. Perinteinen ja digitaalinen työnkulku (Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine, Heinonen, 2016.)

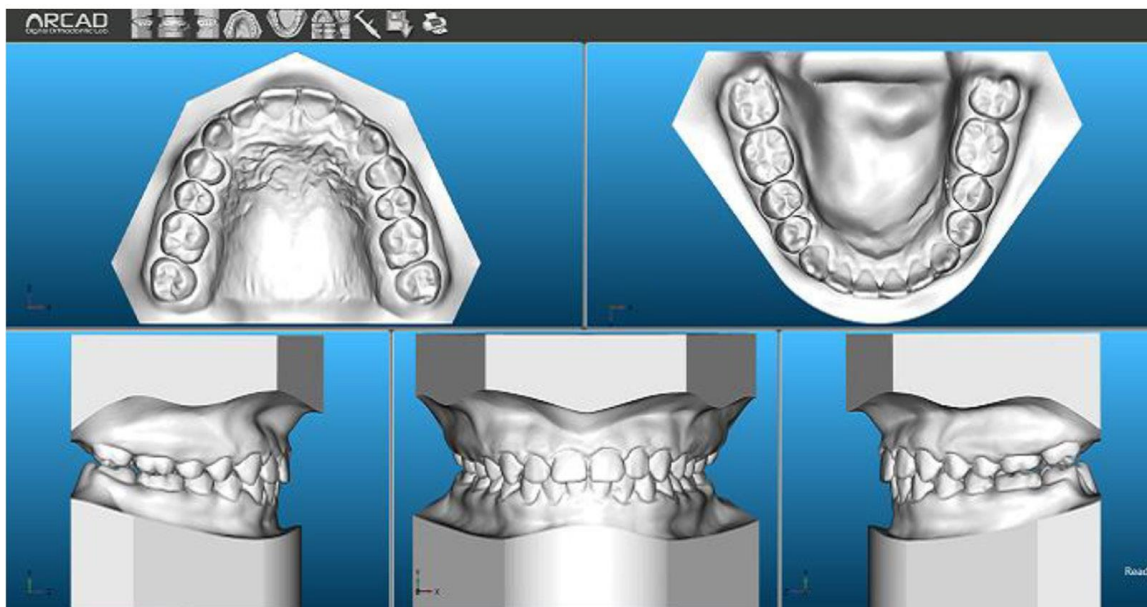
4.1 AM-tekniikan ja materiaalia poistavan menetelmän erot

Protetiikassa kruunujen, implanttien sekä inlay- ja onlay paikkojen valmistuksessa on jo pitkään ollut käytössä materiaalia poistava menetelmä. Kyseisessä menetelmässä materiaalia jyrsitään kerroksittain pois, esimerkiksi kokonaisesta keraamisesta kuutiosta, jolloin saadaan halutun muotoinen kappale valmistettua. Materiaalin poistamisen sijaan AM-menetelmässä kappale valmistetaan lisäämällä materiaalia kerroksittain. Proteettisen ratkaisun valmistuksessa hampaisto 3D-skannataan samalla tavalla, riippumatta siitä tapahtuuko lopullinen valmistus lisäävällä vai poistavalla menetelmällä. AM-tekniikka tuo jyrinnän hyötyjen lisäksi monipuolisempia käyttömahdollisuuksia hammashoitoon. AM-tekniikka mahdollistaa eri värien ja materiaalien tulostamisen samaan kappaleeseen yhdellä kertaa. Myös käytettävien materiaalien valikoima on tulostuksessa laajempi. Tämä on hyödyksi erityisesti erilaisten proteettisten ratkaisujen, kuten osaproteesien, valmistuksessa. Lisäksi ainetta lisäävässä menetelmässä materiaalia kuluu vain tarvittava määrä, toisin kuin jyrinnässä ylimääräinen, pois jyritytty, materiaali menee hukkaan.

AM-tekniikkaa voidaan hyödyntää jyritystä laajemmin hammashoidossa eri erikoisaloilla, esimerkiksi ortodontiassa oikomiskojeiden valmistuksessa, tai suu- ja leukakirurgiassa kirurgisten mallien tulostamisessa. (Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine, Heinonen, 2016)

4.2 Käyttökohteet ja valmistusprosessi

AM-menetelmä mahdollistaa monimutkaisten hammasproteettisten, hammasmallien, oikomiskojeiden, braketien, kaarilankojen ja purentakiskojen tulostamisen. Valmistusprosessi alkaa siitä, kun potilaalta otetaan digitaalinen 3D-hammasmalli (kuva 12). Digitaalinen hammasmalli otetaan potilaalta, joko suoralla tai epäsuoralla menetelmällä. Suorassa menetelmässä käytetään suun sisäistä skanneria, jolla kuvataan potilaan suu. Epäsuorassa menetelmässä hammasmallit saadaan skannattua erilaisilla skannereilla alginaattijäljennöksistä ja kipsimalleista. Digitaaliset hammasmallit tarjoavat luotettavan ja potilasystävällisen vaihtoehdon perinteisille kipsimalleille. Niiden avulla hoidon suunnittelu sekä hammasmallien tallennus, saatavuus ja fyysisen varastointi helpottuvat. Digitaaliset mallit voidaan tallentaa potilastietojärjestelmään valokuvien, röntgenkuvien ja potilastietojen mukana. Niitä voidaan käyttää vaivattomasti esimerkiksi yksittäisten hampaiden, purentavirheiden ja hammaskaarien tarkasteluun. Digitaalinen malli siirretään tietokoneelle ja sille tehdään tarvittaessa jälkikäsitteilyjä. Valmis digitaalinen malli tulostetaan lopulliseksi tuotteeksi. (Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine, Heinonen, 2016)



KUVA 12. Digitaaliset hammasmallit (ArcadLab.)

AM-menetelmä tarjoaa erinomaisen mahdollisuuden monimutkaisten oikomiskojeiden rakenteiden tulostamiseen. Tällä hetkellä suosituimmat oikomiskorjaukset, joiden valmistuksessa on hyödynnetty AM-tekniikalla tuotettuja hammasmalleja, ovat Clear Correct ja Invisalign. Kyseessä on kirkkaasta läpinäkyvästä muovista valmistettavia oikomismuotteja, jotka tehdään 3D-hammasmallien päälle. Hammasteknikko voi virtuaalisesti siirtää hampaita vaiheittain haluttuun asentoon ja valmistaa niistä sarjan hammasmalleja. Hammasmallien mukaan tehdään oikomismuotit, joista kutakin mallia potilas käyttää 2 - 3 viikon ajan. Näin oiottavat hampaat ohjataan muottien luoman kevyen paineen avulla haluttuun sijaintiin yksi vaihe kerrallaan. Kirkkaat oikomismuotit ovat käytännössä näkymättömät, ja ne voi ottaa pois ruokailun tai hampaiden pesun ajaksi toisin kuin kiinteät oikomiskojeet. (Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine, Heinonen, 2016)

AM-menetelmää voidaan hyödyntää myös hammasproteettisten kojeiden valmistuksessa. AM-menetelmä toimii apuvälineenä lopullisten proteesien valmistuksessa. Tulostamalla on tehty väliaikaisia ratkaisuja, kuten kruunuja, siltoja ja erilaisia sovituskappaleita, joista voidaan valmistaa valamalla lopullinen suuhun laitettava kappale. Lisäksi AM-tekniikkaa hyödynnetään kirurgisissa operaatioissa, esimerkiksi implanttileikkauksissa yksilöllisen ohjauskiskon tulostamiseen. Ohjauskiskon avulla implanttiruuvit saadaan asetettua täsmälleen oikeaan kohtaan, oikeassa kulmassa. (Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine, Heinonen, 2016)

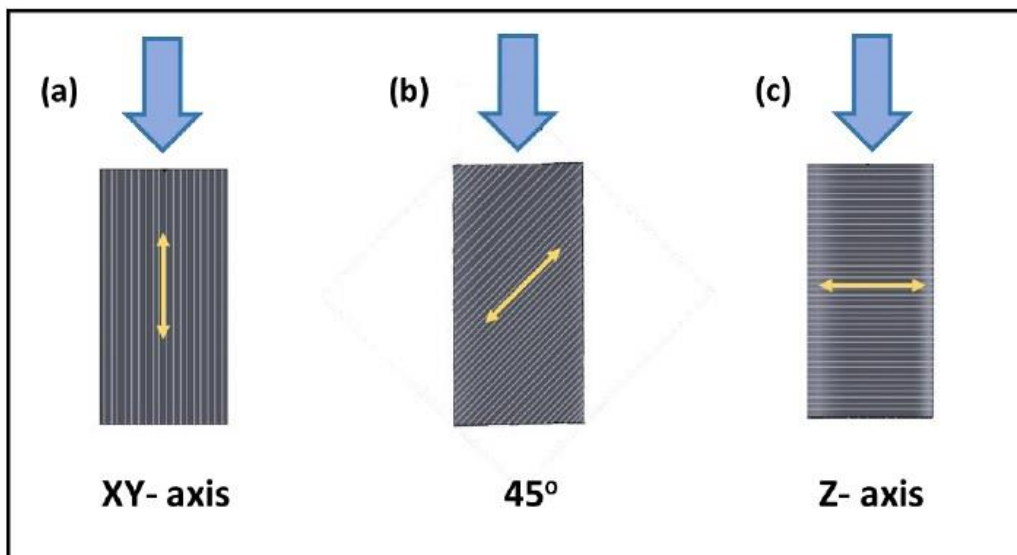
5 NESTEEN FOTOPOLYMERISOINTI-TULOSTEIDEN MATERIAALITESTAUS

Tämän työn tutkimusosiossa keskitytään nesteen fotopolymerisointitekniikalla valmistettujen muovikappaleiden materiaalitestauksiin. Tutkimuksessa käsitellään, kuinka fotopolymerisointi-tulosteita testataan, ja mitä seikkoja on otettava huomioon tulostettaessa ja testaamisessa. Työ on ajankoh- tainen, koska Mallihampaalla on havaittu vaikeuksia parentakiskoissa käytettävän materiaalin kestä- vyydessä. Työssä pyritään selvittämään, mitkä tekijät vaikuttavat tulosteiden kestävyys- yleisesti sekä mistä tekijöistä Mallihampaan kestävyysongelmat voivat johtua. Tutkimuksessa testataan ham- mastekniikkaan käytettäviä materiaaleja Varseo Wax:ia ja Dental SG:tä. Molemmista materiaaleista valmistetaan samanlaiset testisarjat, jotka sisältävät samoilla mitoilla valmistettuja koesauvoja. Ma- teriaalit ovat vertailukelpoisia, koska valmistajan ilmoittamat mekaaniset ominaisuudet eivät juuri- kaan eroa toisistaan ja molemmilla materiaaleilla on sama käyttötarkoitus. Varseo Wax:sta valmiste- tut koesauvat tulostetaan Mallihampaan Bego-tulostimella ja Dental SG:stä valmistetut sauvat Ma- ker3D:n Formlabs-tulostimella. Vertailu halutaan tehdä, koska Begon ja Formlabsin-laitteiden hinta- ero on n. 20 000 euroa. Tarkoitus on siis verrata sekä näitä kahta materiaalia että laitetta. Työn ta- voitteenä on saada hyödyllisiä tuloksia niin mallihampaalle kuin yleisesti nesteen fotopolymerisointi- tekniikkaa käyttäville.

Neste- en fotopolymerisointi-tulosteiden materiaalitestaus ei eroa testaustavoiltaan muista AM- tekniikalla valmistettujen muovien testaamisesta. Useat materiaalin valmistajat ilmoittavat käyttä- neensä materiaalin mekaanisten ominaisuuksien testaamisessa ASTM- tai ISO-standardisointisjärjes- tön suositeltuja standardeja. Tässä työssä käytetään ISO-standardin suosittamia menetelmiä, koska myös työssä käytettyjen materiaalien valmistajat ovat käyttäneet niitä. Työssä tehdään mate- riaaleille veto-, isku-, taivutus- ja kovuuskokeet. Monissa tutkimuksissa halutaan tietää, miten paljon ulkoiset ja sisäiset tekijät vaikuttavat kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin. Näitä asioita tutkimalla saadaan yksityiskohtaisempia tutkimustuloksia, joilla pystytään mahdollisesti ratkaisemaan esimer- kiksi kappaleen kestävyysongelma. Tässä työssä testataan kappaleen tulostusasennon, veden imey- tymisen ja UV-jälkikäsittelyn vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin. Nämä kolme asiaa ovat olennai- sia testauskohteita, kun testataan parentakiskoihin käytettävän materiaalin ominaisuuksia. Vedellä simuloidaan ihmisen sylkeä, kun parentakisko on suussa. UV-käsittelyä käytetään fotopolymerisointi- tulostettujen kappaleiden kovettamiseen. UV-käsittelyn vaikutuksia kokeillaan pitämällä kappaletta UV-uunissa lyhyempiä ja pidempiä aikoja kuin mitä valmistaja suosittelee. (3DSystems; Väyrynen, Tanner, Vallittu, Valtteri, 2016)

5.1 Tulostuskulman vaikutus

Tässä työssä testataan tulostuskulman vaikutusta kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin. Testi- sauvoja tulostetaan 0°, 45° ja 90° kulmissa. Eri kulmissa tulostaminen aiheuttaa sen, että tulostetta- vat kerrokset testisauvoissa ovat eri asennoissa ja jyrkemmissä kulmissa tulee enemmän roikkuvia pintoja, jolloin pinnanlaatu voi heikentyä. Yleensä kappaleet tulostetaan vaakatasossa tulostusalu- etta kohti, eli 0° kulmassa, jolloin kerrokset on tulostettu vaakatasossa.



KUVA 13. Puristuskoesauvat tulostettu eri kulmissa, voiman suunta (sininen nuoli) ja tulostuskerrosten asennot (keltainen nuoli) a) 0° kulmassa b) 45° kulmassa c) 90° kulmassa (Leon, Ling, Lease, 2016.)

Structon tekemän tutkimuksen mukaan 0° kulmassa tulostettu puristussauva kestää enemmän voimaa kuin 45° ja 90° kulmassa tulostetut sauvat. Kuvasta 13 nähdään, että 0° kulmassa tulostetun puristussauvan kerrokset ovat samansuuntaisia puristavan voiman kanssa, jolloin sauvalla on korkeampi puristuslujuus kuin 45° ja 90° kulmissa tulostetuilla puristussauvoilla. Eli jos kappaleelta halutaan hyvää puristuslujuutta, se on tulostettava asennossa, jossa tulostettavat kerrokset ovat mahdollisimman samansuuntaiset kappaleeseen kohdistuvan voiman kanssa. Lisäksi samassa tutkimuksessa todettiin, että 90° kulmassa tulostettu kappale kestää paremmin taivutuslujuutta kuin 0° ja 45° kulmassa tulostetut kappaleet. Tässä työssä kuitenkin selvitetään optimaalista tulostusasentoa ja jälkikäsitteilyn menetelmiä purentakiskolle, johon käytössä kohdistuu puristuslujuuden lisäksi myös taivutusvoimaa, vetovoimaa ja iskuvoimaa. (Structo, 2016)

5.2 Veden vaikutus materiaaliin

Lähes kaikki muovit imevät itseensä vettä ja kosteutta. Kosteuden imeytyminen vaikuttaa kappaleen ulkomittoihin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Erityisesti muovit, jotka imevät kosteutta suurempia määriä, eivät sovi mittatarkkuutta vaativiin käyttökohteisiin. Imeytyneen kosteuden määrää kuvaa kosteuspitoisuus, joka on materiaaliin imeytyneen veden massa suhteutettuna kuivan kappaleen massa. Kosteuspitoisuus ilmoitetaan prosenttilukuna, joka määritelmän mukaan on

$$c = \frac{(m - m_0)}{m_0} \cdot 100 \% \quad (1)$$

jossa m on kosteutta absorboineen materiaalin massa ja m_0 kuivan materiaalin massa. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifvars, Komppa, 2007; MET, 2001)

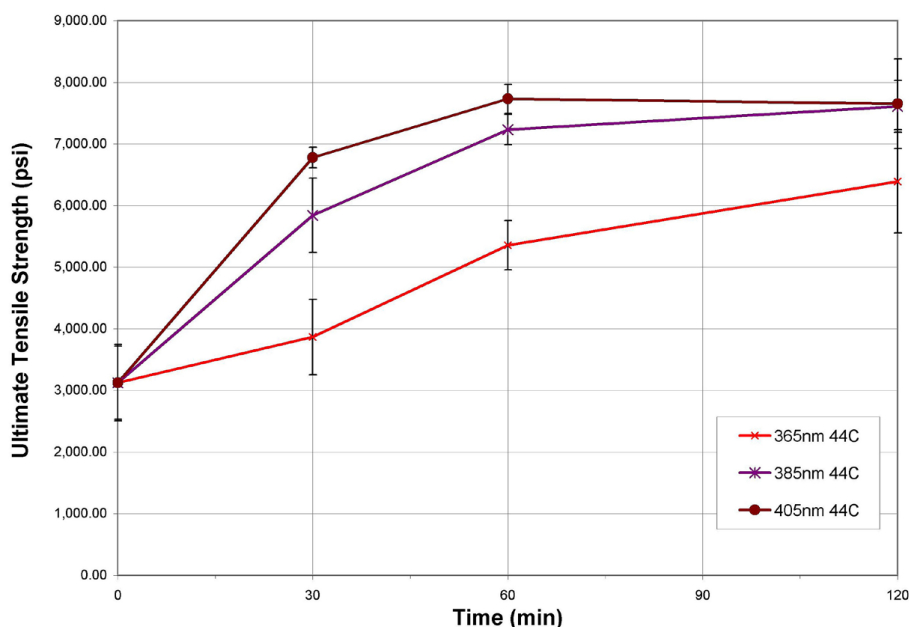
Nesteen fotopolymeerisoinnissa käytetään epoksipohjaisia fotopolymeerimateriaaleja. Materiaalit koostuvat UV-kovetettavasta hartsista ja erilaisista sidosaineista, joilla pystytään tekemään erilaisia ominaisuuksia omaavia fotopolymeerimateriaaleja. Osa fotopolymeerimateriaaleista vastaavat ominaisuuksiltaan ABS-, PC- ja PP-muoveja. Näiden muovien kosteuspitoisuus vedessä on 0,2 ja 1,0 %:n välillä. Vaikka näiden muovien kosteuspitoisuus on hyvin pieni, sillä voi olla silti vaikutusta kappaleen ominaisuuksiin, jos kappale altistuu vedelle pitkiksi ajoiksi. Esimerkiksi kosteuspitoisuudeltaan 0,35 % materiaalin altistuminen 14 päivän ajaksi vedelle pienentää lujuusominaisuuksia jopa 30 %. (Stratasys; Väyrynen, Tanner, Vallittu, Valteri, 2016)

Tässä työssä kosteuden vaikutusta purentakiskoon testataan liuottamalla osaa testisauvoista vedessä standardin SFS EN-ISO 20795 suosittelemalla tavalla. Standardi käsittelee hammasteknisten komponenttien testausolosuhteita ja -tapoja. Testisauvoja liuotetaan huoneenlämpöisessä vedessä 50 tuntia ennen materiaalitestejä. Vedellä on tarkoitus simuloida ihmisen syljestä imeytyvää kosteutta, kun purentakisko on suussa. Veden vaikutus halutaan testata, koska Varseo Wax - ja Dental SG -materiaalien tiedoissa ei kerrota kosteuspitoisuutta ja ohjeiden mukaan kappaleita tulisi säilyttää kuivassa tilassa, kun niitä ei käytetä. Testillä halutaan selvittää, aiheuttaako näin lyhyt altistuminen kosteudelle merkittäviä vaihteluita lujuusominaisuuksissa. (SFS EN-ISO 20795-1; BEGO; Formlabs)

5.3 UV-jälkikäsittely

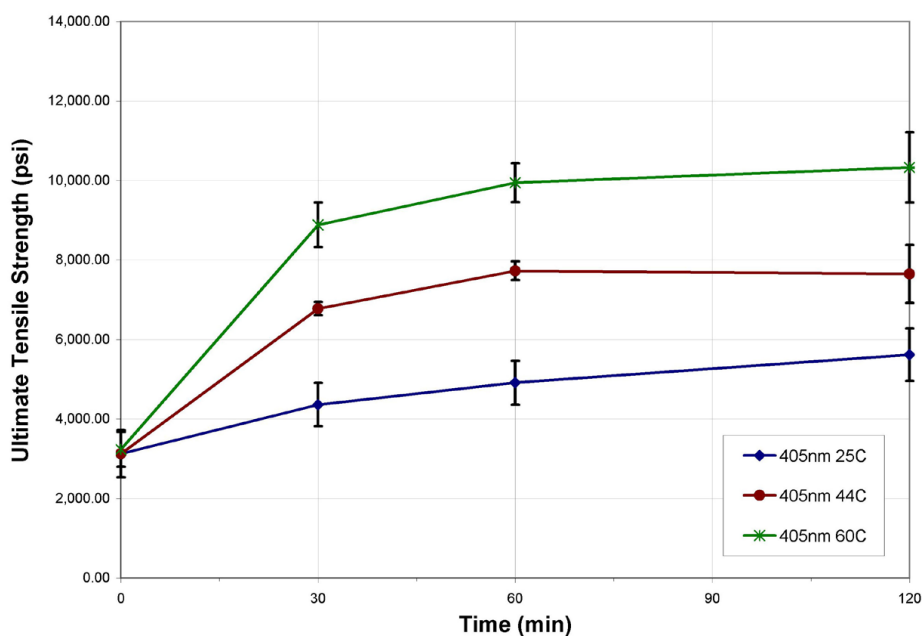
Nesteen fotopolymeerisoinnilla tuotetut muovikappaleet jälkikäsitellään tulostamisen jälkeen UV-valouunissa. Ennen UV-jälkikäsittelyä tulostettu kappale on pehmeä ja heikko lujuusominaisuuksiltaan. Tämän takia kappaleet kovetetaan ultraviolettilamppujen avulla, jotta kappaleesta saadaan kestävämpi.

UV-jälkikäsittelyssä vaikuttavat parametrit ovat kovetusaika, lämpötila, säteilyteho ja UV-lamppujen aallonpituus. Kaikki nämä parametrit vaikuttavat kappaleen lopullisiin mekaanisiin ominaisuuksiin. Yleisimmin käytetyt lamput UV-kovetusuneissa ovat aallonpituuksiltaan 365 - 405 nm. Mitä isompi aallonpituus lampussa on, sitä lujempi kappaleesta tulee. Suurempi säteilyteho vaikuttaa siihen, kuinka hyvin materiaalin monomeerit polymerisoituvat eli karkeasti sanottuna yhdistyvät. Eli isompi aallonpituus ja säteilyteho tekevät kappaleesta kestävämmän. Formlabs on tehnyt tutkimuksen, jossa testattiin kolmea eri aallonpituudeltaan olevaa lamppua. He kovettivat vetosauvoja 365-, 385- ja 405 nm lampuilla 120 minuutin ajan. 405 nm lampulla he saivat aikaiseksi kovimman vetolujuuden (Kuvio 1). (Formlabs)



KUVIO 1. Kolmen eri UV-lampun vaikutukset kappaleen vetolujuuteen (Formlabs.)

Kovetus aika vaikuttaa myös paljon kappaleen lujuuteen. Mitä pidempään kappaletta kovetetaan UV-uunissa, sitä lujempi kappaleesta tulee. Kappale kuitenkin jossain vaiheessa saavuttaa maksimilujuu- tensa, jonka jälkeen ylimääräinen kovetus aika tekee kappaleesta vain hauraamman. Riippuen mate- rialista, sopivan lujuuden saavuttaminen voi kestää jopa 30 - 120 minuuttia. Lämpötilalla voidaan kuitenkin nopeuttaa kovetus aikaa. Korkeampi lämpötila kovetus uunissa lyhentää kovetus aikaa, jol- loin haluttu lujuus saavutetaan nopeammin. Sen lisäksi, että korkeampi lämpötila nopeuttaa kovetta- mista, se tekee myös kappaleesta lujemman. Formlabsin tutkimuksessa kovetettiin vetosauvoja 25-, 44- ja 60 C° asteen lämpötiloissa 120 minuuttia. Testissä todettiin, että lämpötilalla voidaan nopeut- ta kovetus aikaa sekä tehdä kappaleesta lujempia (Kuvio 2). (Formlabs)



KUVIO 2. Lämpötilan vaikutus kovetus aikaan ja kappaleen vetolujuuteen (Formlabs.)

5.3.1 Varseo Wax -testisauvojen UV-jälkikäsittely

Varseo Wax:lle valmistaja kehottaa n. 7,5 minuutin kovetusaikaa UV-uunissa 390 - 540 nm lamppuilla. Kovetuslämpötilaa valmistaja ei ilmoita. Mallihampaalla on tällä hetkellä ollut kovetusaikana n. 15 minuuttia. Mallihampaalla käytössä oleva UV-uuni on varustettu kahdeksalla UV-lampulla, joista neljä on 18W/71 lamppuja ja toiset neljä 18W/78 lamppuja. Lamput ovat 4,2 W ja 4,7 W säteilytehoaltaan olevia lamppuja, jotka laitevalmistaja Bego on hyväksynyt Varseo Wax:n kovettamiseen. Tässä työssä testataan kovettamalla Varseo Wax:sta valmistettuja koesauvoja myös 7,5 ja 22,5 minuuttia. Tällä pyritään löytämään optimaalinen kovetusaika, jolloin materiaalille saataisiin mahdollisimman hyvät lujuusominaisuudet.

5.3.2 Dental SG -testisauvojen UV-jälkikäsittely

Dental SG:stä valmistetut koesauvat kovetettiin Maker3D:llä käytössä olevalla NextDentin LC 3DPrint Box -uunilla. Koesauvoja kovetettiin 10 minuutin ajan UV-uunissa, jossa on käytössä samantyyppiset ja tehoiset lamput kuin Mallihampaan uunissa. Erona vain, että lamppuja on 12 kappaletta eli neljä enemmän kuin Mallihampaan uunissa. Tästä johtuen Dental SG:sta ja Varseo Wax:sta valmistetut koesauvat eivät ole keskenään täysin verrattavissa UV-kovetuksen osalta. UV-kovetuksen erot näiden materiaalien välillä antaa kuitenkin hyödyllistä tietoa siitä, kuinka paljon kovetus vaikuttaa materiaalien lujuusominaisuuksiin.

5.4 Testisarjat

Työn materiaalitestauksissa selvitetään tulostusasennon, UV-kovetuksen ja veden imeytymisen vaikutuksia Varseo Wax ja Dental SG -materiaalien mekaanisiin ominaisuuksiin. Testeinä käytetään taiputus-, isku-, veto- ja kovuuskokeita. Kovuuskoetta varten ei erikseen valmisteta testikappaleita, vaan kovuustestit voidaan tehdä iskukovuussauvoille. Testissä käytetään tulostusasentoina 0°, 45° ja 90° kulmissa tulostettuja koesauvoja. Kaikissa tulostusasunnoissa valmistetaan 10 kappaletta jokaista koesauvaa, joista viidelle sauvalla tehdään vedenimeytyskäsittelyt.

Mallihampaalla on käytetty nyt UV-kovetusaikana 15 minuuttia. Joten UV-kovetuksen vaikutuksen testaamiseksi koesauvoja pidetään sekä 7,5 ja 22,5 minuuttia UV-uunissa, eli normaalia kovetusaikaa 50 % vähemmän ja 50 % enemmän. Molemmille kovetusojoille valmistetaan viisi kappaletta kukin koesauvaa. Varseo Wax ja Dental SG -testisarjat eroavat hieman toisistaan. UV-kovetusajan vaikutusta ei erikseen testata Dental SG:lle, koska tarkoituksena on löytää Mallihampaalle optimaalinen kovetusaika. Lisäksi Dental SG:stä valmistetut koesauvat UV-kovetetaan eri tavalla kuin Varseo Wax:sta valmistetut koesauvat, joten niitä ei voida edes verrata keskenään. Taulukossa 1 on Varseo Wax -testisarjan koesauvojen määrät eriteltynä, ja taulukossa 2 Dental SG -testisarja.

TAULUKKO 1. Varseo Wax -testisarjan koesauvojen määrät eriteltynä.

Tulostusasento	Vetosauva/kpl	Taivutussauva/kpl	Iskukovuussauva/kpl
0° (Kuiva)	5	5	5
0° (Vesiliuotus)	5	5	5
45° (Kuiva)	5	5	5
45° (Vesiliuotus)	5	5	5
90° (Kuiva)	5	5	5
90° (Vesiliuotus)	5	5	5
90° (UV- 7,5 min)	5	5	5
90° (UV- 22,5 min)	5	5	5
yht.	40	40	40
Kaikki yht.	120		

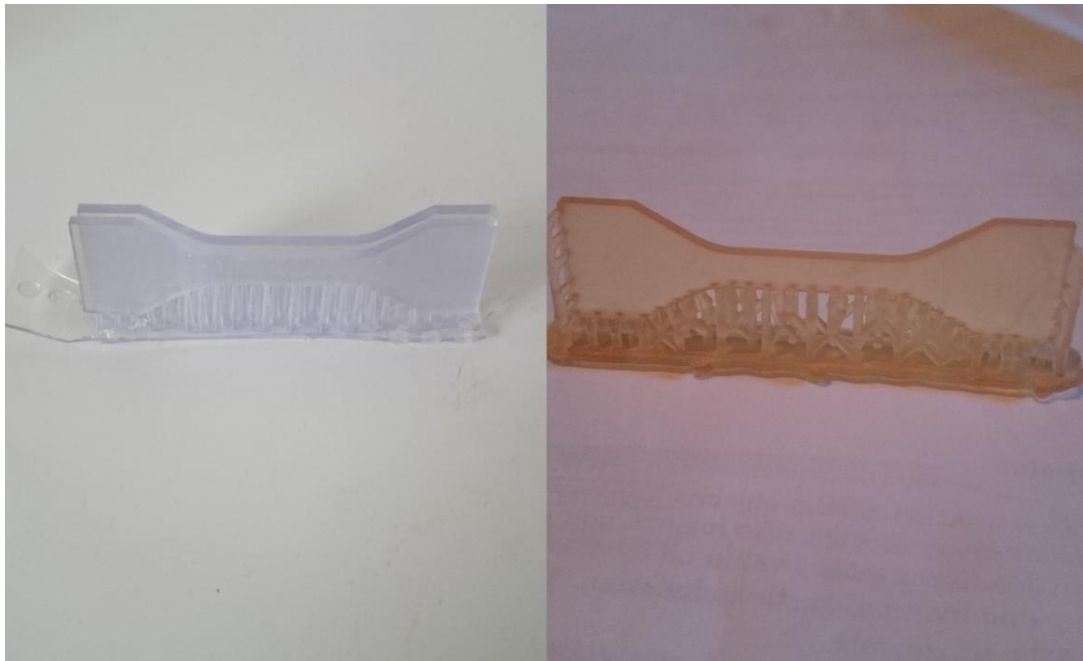
TAULUKKO 2. Dental SG -testisarjan koesauvojen määrät eriteltynä.

Tulostusasento	Vetosauva/kpl	Taivutussauva/kpl	Iskukovuussauva/kpl
0° (Kuiva)	5	5	5
0° (Vesiliuotus)	5	5	5
45° (Kuiva)	5	5	5
45° (Vesiliuotus)	5	5	5
90° (Kuiva)	5	5	5
90° (Vesiliuotus)	5	5	5
yht.	30	30	30
Kaikki yht.	90		

5.5 Koesauvojen valmistus

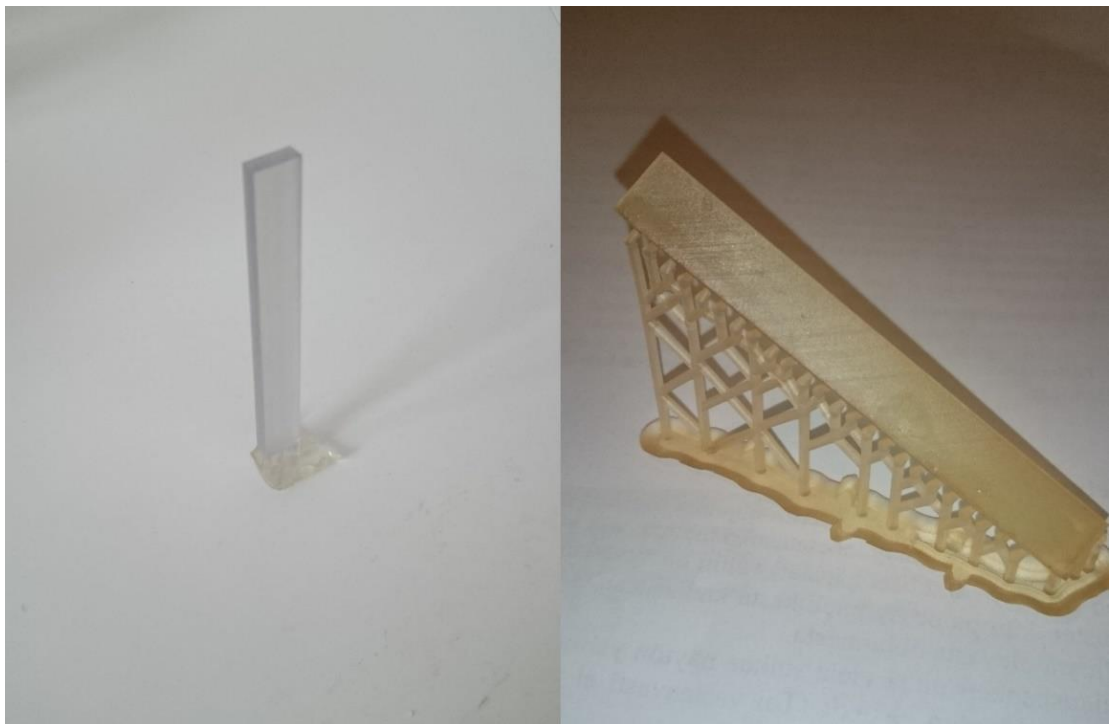
Koesauvojen valmistuksessa käytetään ISO-standardien mukaan määriteltyjä mittoja ja muotoja. Mittoja joudutaan kuitenkin vähän muuttamaan, johtuen tulostimen tulostusalueen koosta. Tulostusalue on melko pieni, vain 96 x 54 x 85 mm. Koesauvojen valmistamisessa käytetään standardia SFS-EN ISO 17296, joka käsittelee materiaalia lisääviä valmistustekniikoita muoveille ja metalleille. Standardissa on määriteltynä kaikille testaustavoille omat standardit.

Vetosauvojen valmistamisessa käytetään standardia SFS-EN ISO 527-3 muovin vetolujuuden määrittäminen kalvoille ja levyille. Standardin mukaan vetosauvan paksuus tulisi olla 1 mm, mutta parempien ja järkevämpien tulosten saamiseksi sauvoista tehtiin 3 mm paksuisia. Lisäksi sauvaa piti lyhentää, jotta se mahtuu tulostimen tulostusalueeseen. Sauvaa lyhennettiin lyhentämällä sauvan kiinnityskohdan pituutta. Kuvassa 14 on molemmista materiaaleista tulostetut vetosauvat.



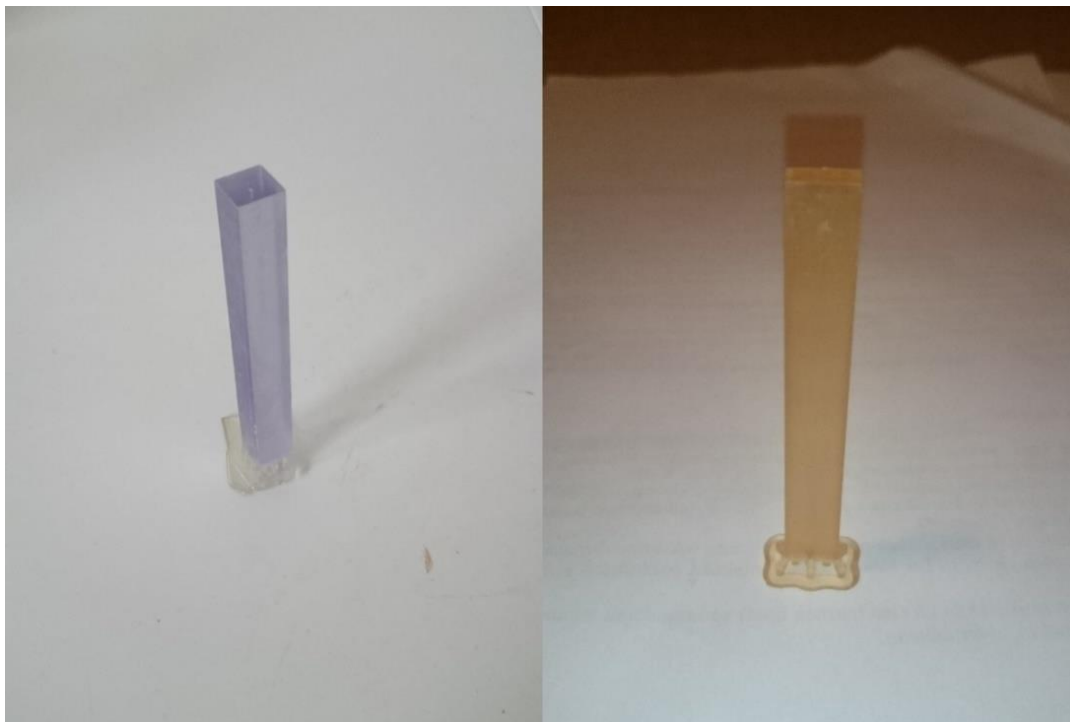
KUVA 14. Varseo Wax:sta ja Dental SG:sta 0° kulmassa tulostetut vetosauvat. Kuvassa näkyy myös tukirakenteet, jotka ovat vielä kiinni vetosauvoissa.

Taivutussauvojen valmistamisessa käytetään standardia SFS-EN ISO 178 muovien taivutuslujuuden määrittäminen. Standardin mukaista taivutussauvaa ei tarvitse muokata millään tavalla tässä työssä, koska taivutussauva mahtuu tulostettavaksi tulostusalueelle. Taivutussauvan mitat ovat 80 x 10 x 4 mm. Kuvassa 15 on molemmista materiaaleista tulostetut taivutussauvat.



KUVA 15. Varseo Wax:sta 90° kulmassa tulostettu taivutussauva, ja Dental SG:sta 45° kulmassa tulostettu taivutussauva.

Iskulujuussauvojen valmistamisessa käytetään standardia SFS-EN ISO 179 Charpy-iskulujuuden määrittäminen muoveille. Standardin mukaan koesauvan paksuuden tulisi olla 4 mm, mutta tässä työssä sauvoista tehtiin 10 mm paksuisia järkevempien tulosten saamiseksi, koska käytössä oleva testilaitteisto on suunniteltu metallikappaleiden iskulujuuden testaamiseen. Kuvassa 16 on molemmista materiaaleista valmistetut iskukovuussauvat.



KUVA 16. Varseo Waxsta ja Dental SG:sta 90° kulmassa tulostetut iskukovuussauvat.

5.6 Testattavat materiaalit

Varseo Wax ja Dental SG on tarkoitettu käytettäväksi parentakiskojen valmistamisessa. Valmiiden kappaleiden säilyttämisessä on otettava huomioon kosteus, valo ja lämpötila. Kappaleita tulee pitää suojassa valolta ja säilyttää huoneenlämmössä sekä käytön jälkeen ne on kuivattava huolellisesti. Näiden seikkojen laiminlyönti voi heikentää kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Materiaalien valmistajat eivät ilmoita kovin kattavasti materiaalin ominaisuuksia, mutta taulukossa 3 on muutamia arvoja, jotka tiedetään. Molempien materiaalien lujuusominaisuudet valmistajien mukaan ovat samanlaiset. Materiaaleista annettuja arvoja voi verrata PP-muoviin, jonka arvot ovat hyvin samaa luokkaa. (Bego; Formlabs; MatWeb)

TAULUKKO 3. Varseo Wax:n ja Dental SG:n mekaanisia ominaisuuksia (Bego; Formlabs; MatWeb.)

	Varseo Wax	Dental SG	Polyprepeeni
Taivutuslujuus	≥ 50 MPa	≥ 50 MPa	≥ 40 MPa
Taivutusmoduuli	≥ 1500 MPa	≥ 1500 MPa	≥ 1500 MPa
Shore-kovuus	80 - 88	80 - 88	80
Charpy-iskulujuus (Loveamaton)	--	12 - 14 kg/m ²	--

5.7 Laitteisto

Varseo Wax:n testisarja tulostetaan Mallihammas OY:n Bego Varseo 3D-tulostimella, joka on suunniteltu hammasteknisten komponenttien valmistamiseen (kuva 17). Dental SG:n testisarja tulostetaan Formlabs Form -tulostimella, joka on suunniteltu kaikenlaisten kappaleiden tulostamista varten (kuva 18). Varseon laserin tarkkuus on $90 \pm 30 \mu\text{m}$, eli hieman parempi kuin Formin $140 \mu\text{m}$ tarkkuus. Isoin ero on kuitenkin laitteiden hinta; Begon tulostin maksaa n. 30 000 euroa, Formlabsin tulostimen saa n. 5 000 eurolla. (Bego; Formlabs)



KUVA 17. Bego Varseo 3D-tulostin (BEGO.)



KUVA 18. Formlabs Form 2 3D-tulostin (Formlabs.)

5.8 Materiaalitestaus

Materiaalitestaukset suoritettiin Itä-Suomen yliopiston ja Savonia-ammattikorkeakoulun laitteistoilla. Osa testeistä tehdään yliopistolla, koska Savonian laitteet on pääosin suunniteltu metallin testaamista varten, eikä niissä riitä tarkkuus muovien testaamista varten.

Ennen kokeiden alkamista huomattiin virhe valmiissa koesauvoissa. Tukimateriaalien poistaminen aiheutti koesauvoihin huonon pinnanlaadun. Tukimateriaali tulostusvaiheessa uppoaa hieman tulostettavan kappaleen sisälle ja tukien irrottaminen jättää kappaleeseen pieniä koloja (kuva 19). Nämä pienet kolot vaikuttavat suuresti testien tuloksiin, koska pienetkin säröt pinnanlaadussa helpottavat kappaleen murtumista. Tämä ongelma vaikuttaa vain 0° kulmassa tulostettuihin koesauvoihin, koska niissä tukimateriaalia on paljon enemmän koko kappaleen pinta-alalta. Tämän vuoksi 0° kulmassa tulostettujen sauvojen tulokset eivät ole tieteellisesti vertailukelpoisia.



KUVA 19. Kuvassa ylempänä 90° kulmassa tulostettu iskusauva ja alempana 0° kulmassa. Kolot, johtuivat tukimateriaalin huonosta irrottamisesta.

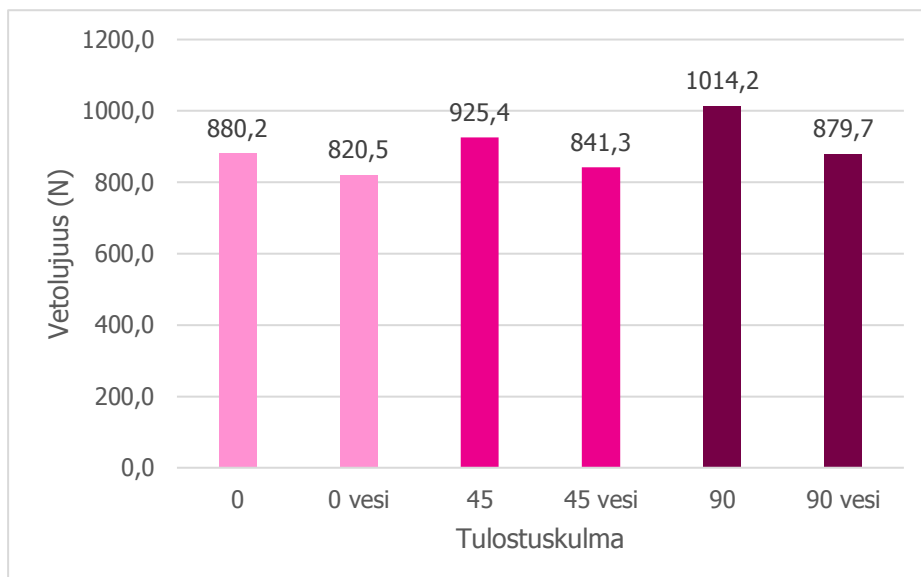
5.8.1 Vetokokeet

Vetokokeet suoritettiin Itä-Suomen yliopiston Instron 8874-aineenkoetuslaitteella (kuva 20). Laitte sopii hyvin muovien materiaalitestaukseen tarkkojen antureiden ansiosta. Ennen kokeita laitteen laskeentasoitus piti alustaa sopivaksi testiä varten. Sovellukseen asetettiin testisauvan mitat ja vetonopeus. Vetonopeudeksi valittiin 5 mm/min, koska materiaali vaikutti hauraalta ja halusimme mahdollisimman tarkat tulokset.



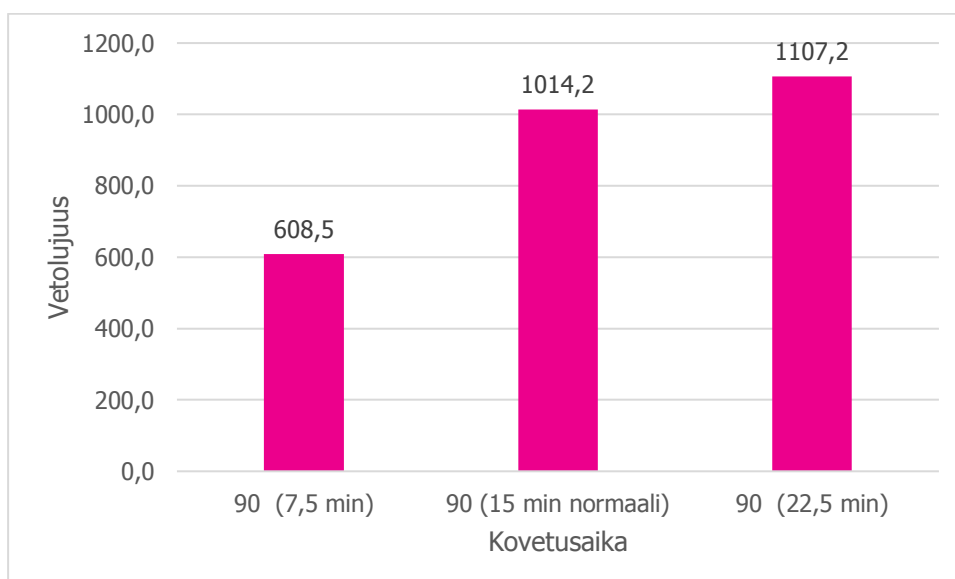
KUVA 20. Vetosauva kiinnitettynä Instron 8874-aineenkoetuslaitteeseen.

Ensimmäisenä suoritettiin vetokokeet Varseo Wax:sta valmistetuille vetosauvoille. Kuviosta 3 huomaa, että 90° kulmassa tulostetut vetosauvat kestivät suurimman kuorman. Vetolujuudet olivat noin 1 kN. 0° kulmassa tulostetut sauvat olivat heikoimpia vetolujuuksiltaan. Tämä saattoi johtua sauvojen huonosta pinnanlaadusta. Huonon pinnanlaadun vaikutuksen huomasi siitä, kun sauvat katkeilivat useista eri kohdista hyvin pian kuormittamisen jälkeen. Sauvojen murtumakohdat risteytyivät pinnassa olleiden virheiden kanssa (kuva 23). Lisäksi hajonta oli 480 – 977 N, joka oli paljon isompi verrattuna muista kulmissa tulostettuihin sauvoihin. Vaikka 0° kulmassa tulostetut sauvat eivät ole vertauskelpoisia, testistä sai selville, kuinka tärkeä hyvä pinnanlaatu on muovimateriaaleissa. Pienikin särö voi helposti aiheuttaa kappaleen murtumisen. Veden vaikutus heikensi materiaalin vetolujuuksia hieman, vaikka materiaalin kosteuspitoisuuden pitäisi olla hyvin pieni. Vesi heikensi vetolujuuksia noin 50 – 100 N, mikä on noin 10 % materiaalin maksimivetolujuudesta.



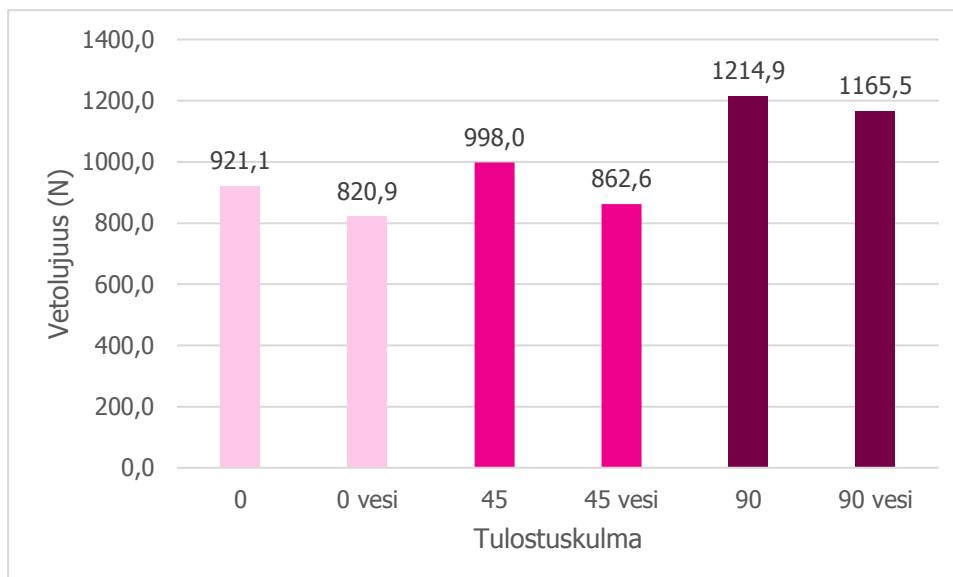
KUVIO 3. Varseo Wax:n vetolujuuden keskiarvot.

UV-kovetusajan muutos vaikutti Varseo Wax:n vetolujuuteen huomattavasti. UV-kovetusajan puolittaminen 7,5 minuuttiin heikensi vetolujuutta noin 40 %. Kovetusajan kasvattaminen 7,5 minuuttia puolestaan paransi vetolujuutta vain noin 10 %. Kuvion 4 kaaviosta huomaa, että materiaalin koveneminen hidastuu huomattavasti 15 ja 22,5 minuutin välillä. 22,5 minuutin kohdalla materiaalin koveneminen alkaa olla huipussaan, ja ylikoveneminen eli materiaalin haurastuminen on siis lähellä 22,5 minuutin kovetusaikaa.



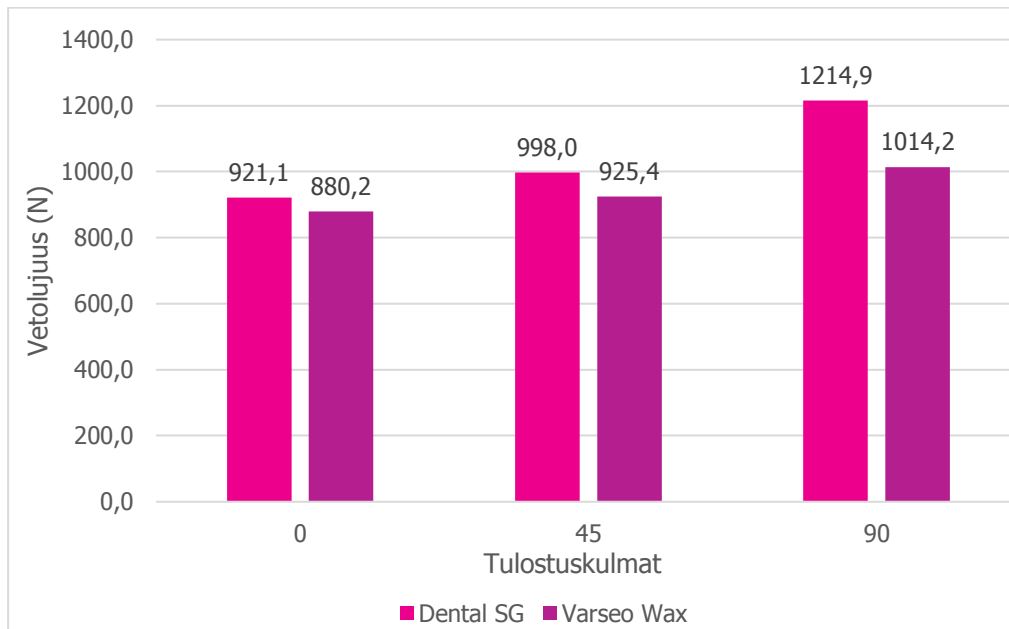
KUVIO 4. UV-kovetusajan vaikutus Varseo Wax:n vetolujuuteen.

Seuraavaksi suoritettiin vetokokeet Dental SG:stä valmistetuille vetosauvoille. Kuvion 5 huomaa, että myös Dental SG:stä 90° kulmassa tulostetut vetosauvat kestävät suurimman kuorman. 0° kulmassa tulostetuilla vetosauvoilla oli sama ongelma kuin Varseo Wax:sta valmistetuilla vetosauvoilla, eli huonon pinnanlaadun takia sauvat katkeilivat helposti.



KUVIO 5. Dental SG materiaalin vetolujuuden keskiarvot.

Dental SG on lujempi kaikissa kolmessa asennossa tulostettuna, kuin Varseo Wax (kuvio 6). 0° ja 45° kulmissa tulostettuna vetolujuudet ovat lähes samaa luokkaa molemmissa materiaaleissa. 90° kulmassa tulostetut sauvat ovat parhaiten verrattavissa, koska niiden pinnanlaatu on paljon parempi verrattuna muissa kulmissa tulostettuihin sauvoihin. 90° kulmassa Dental SG:llä on noin 200 N korkeampi vetolujuus.



KUVIO 6. Dental SG ja Varseo Wax vetolujuuksien keskiarvot.

Siitä huolimatta, että Dental SG kestää suurempia vetolujuuksia, sen venymä vetokokeissa oli pienempi. Dental SG:n venymien keskiarvo oli 0,83 mm, kun Varseo Wax:illa se oli 1,64 mm.

Vaikka vesi heikensi kummankin materiaalin vetolujuus ominaisuuksia, niin se samalla kasvatti venymiä. Dental SG:llä vesikäsitteilyn jälkeen sauvojen venymän keskiarvo oli 1,43 mm ja Varseo Wax:illa 1,79 mm.

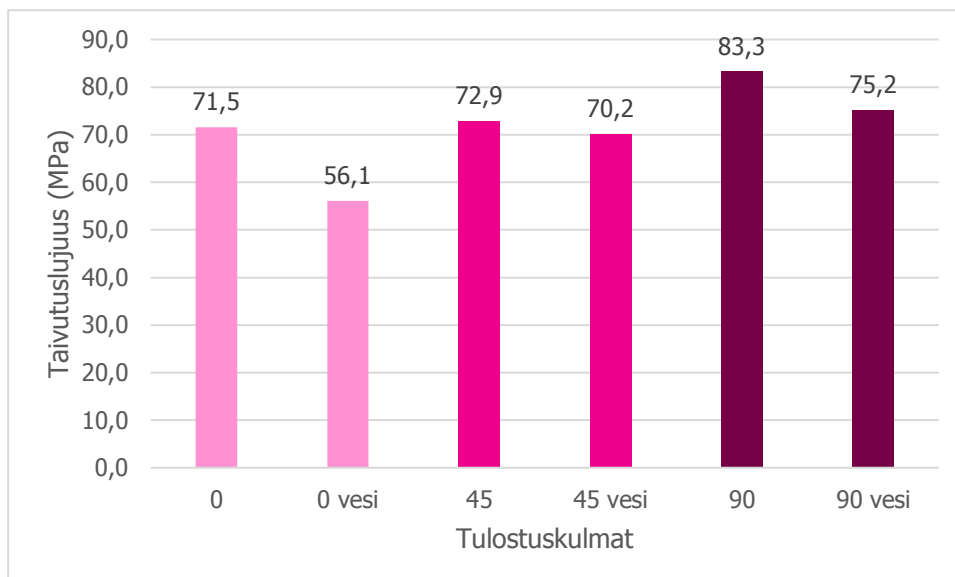
5.8.2 Taivutuskokeet

Taivutuskokeet tehtiin myös Itä-Suomen yliopiston Instron 8874-aineenkoetuslaitteella. Laite soveltuu hyvin myös taivutuskokeiden tekemiseen, koska se on hyvin modulaarinen. Laitteeseen voidaan asentaa monia erilaisia ja kokoisia taivutustukia ja kuormitustappeja. Laitteeseen asennettiin ISO 178 -standardin mukaiset taivutustuet ja kuorimitustappi (kuva 21). Standardin mukaan tukien pitää olla pyöreät ja yli 3 mm paksuisille testikappaleille tuen säteen on oltava 5 mm. Nopeudeksi asetettiin 5 mm/min.



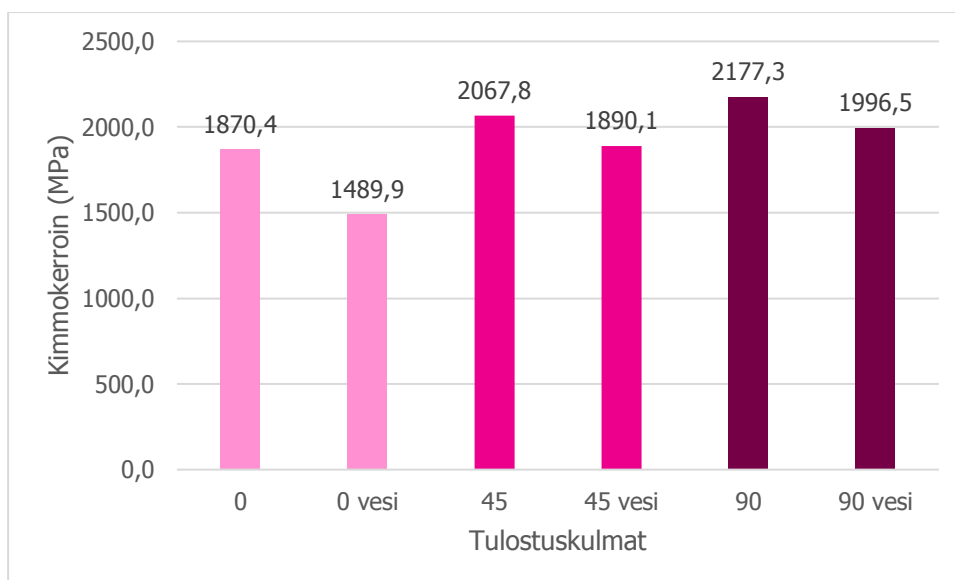
KUVA 21. Instron 8874-aineenkoetuslaitteeseen asennettu kolmipistetaivutus järjestelmä.

Taivutuskokeissa jatkui sama kaava, kuin vetokokeissa. Kuviosta 7 huomaa, että Varseo Wax:sta 90⁰ kulmassa tulostetut taivutussauvat kestävät eniten taivutusta. Vesi vaikutti myös taivutuslujuuksiin, mutta ei kuitenkaan niin paljoa kuin vetokokeissa. Vesi heikensi taivutuslujuutta keskimäärin noin 8 %. Materiaalin keskimääräinen taipuma oli noin 10 mm. Kappaleet murtuivat hyvin siististi, yleensä murtuminen tapahtui kappaleen keskikohdassa.



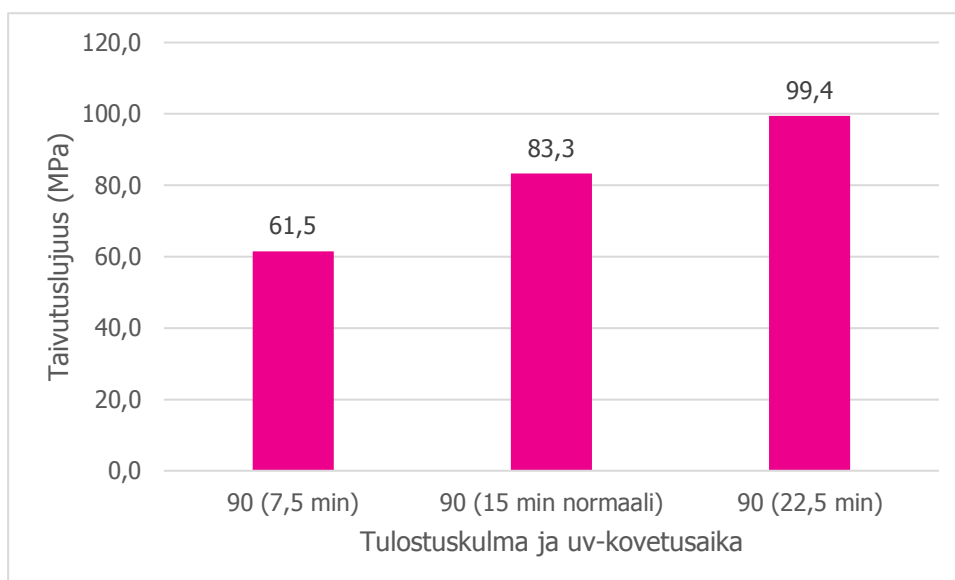
KUVIO 7. Varseo Wax:n taivutuslujuuksien keskiarvot.

Varseo Wax:n kimmokerroin taivutuskokeissa oli noin 2000 MPa, joka on hyvin tyypillinen arvo useille muoveille (kuvio 8). Veden vaikutus kappaleeseen heikensi kimmokerrointa keskimäärin noin 150 MPa, eli noin 10 % kuivien kappaleiden maksimi kimmokertoimesta.

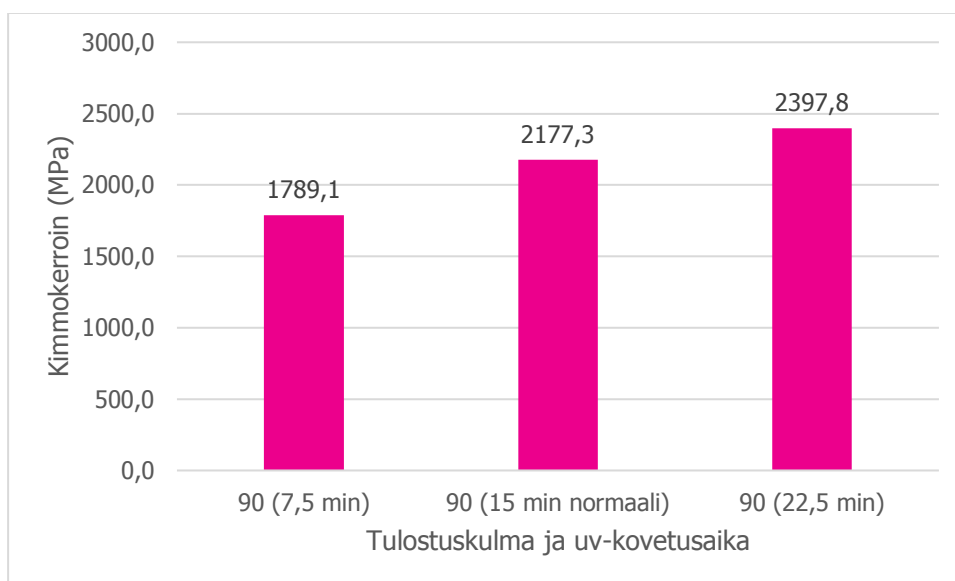


KUVIO 8. Varseo Wax:n kimmokerrointen keskiarvot.

Kuvioissa 9 ja 10 näkyy UV-kovetusajan vaikutukset taivutuslujuuteen ja kimmokertoimeen. 22,5 minuutin kovetus aika kasvatti materiaalin taivutuslujuutta noin 100 MPa, mikä on noin 7 % suurempi verrattuna 15 minuutin kovetusajan taivutuslujuuteen.



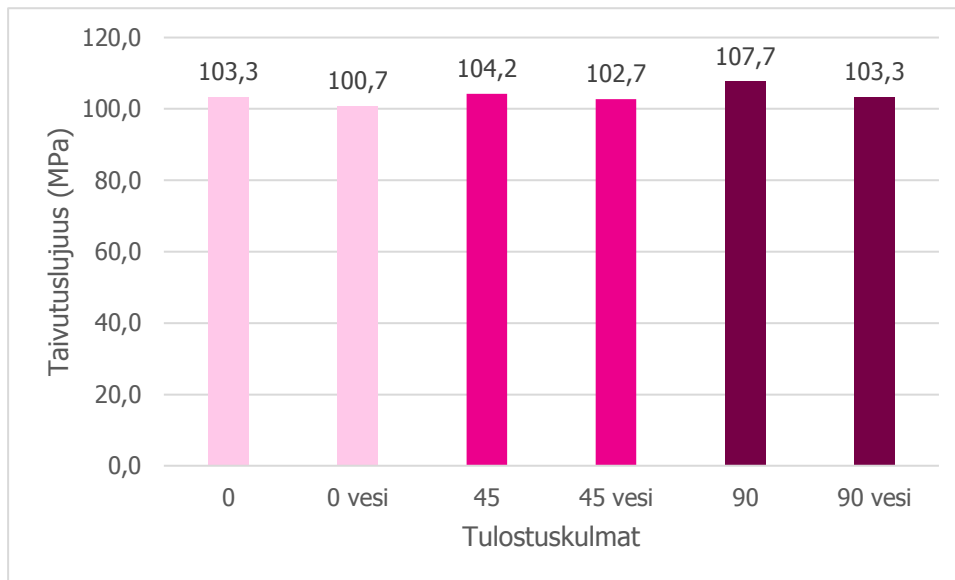
KUVIO 9. UV-kovetusajan vaikutus Varseo Wax:n taivutuslujuuteen.



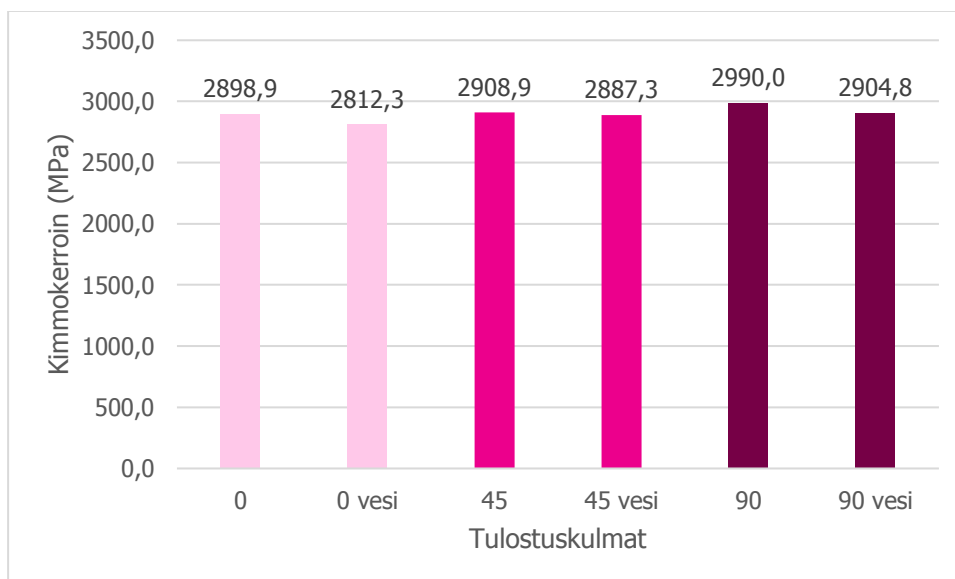
KUVIO 10. UV-kovetusajan vaikutus Varseo Wax:n kimmokertoimeen.

Dental SG:n taivutuslujuudet olivat kaikissa asennoissa tulostettuina yli 100 MPa (kuvio 11). Suurin taivutuslujuus saatiin 90° kulmassa tulostetuille sauvoille. Veden vaikutus on hyvin pieni materiaalin taivutuslujuuteen, vesi heikensi materiaalin taivutuslujuutta noin 2 – 4 MPa. Murtuessa kappale hajosi hyvin epätasaisesti ja yleensä todella moneen osaan.

Dental SG:n kimmokertoimet ovat keskimäärin 2900 MPa (kuvio 12). Veden vaikutus pienensi kimmokerrointa noin 20 – 80 MPa.

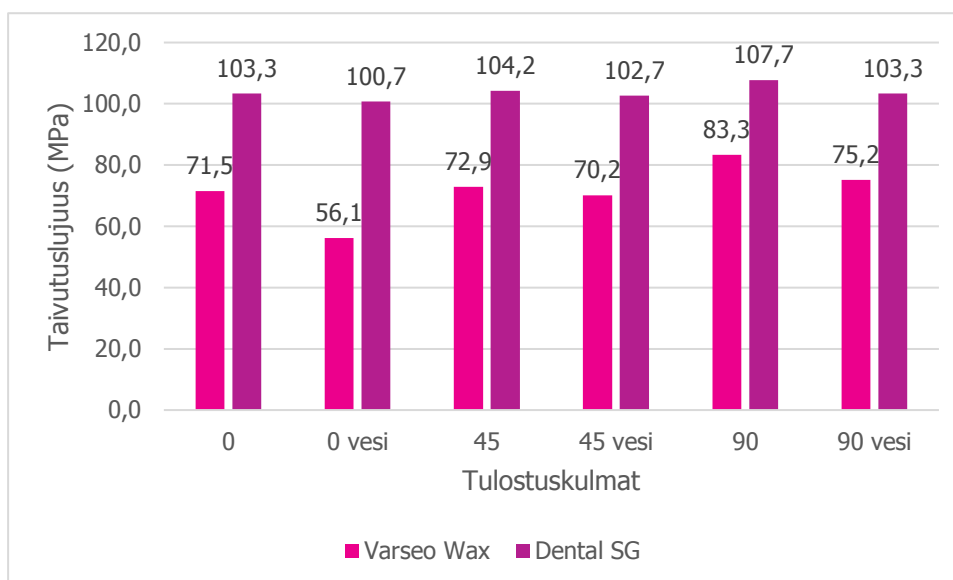


KUVIO 11. Dental SG:n taivutuslujuuksien keskiarvot.

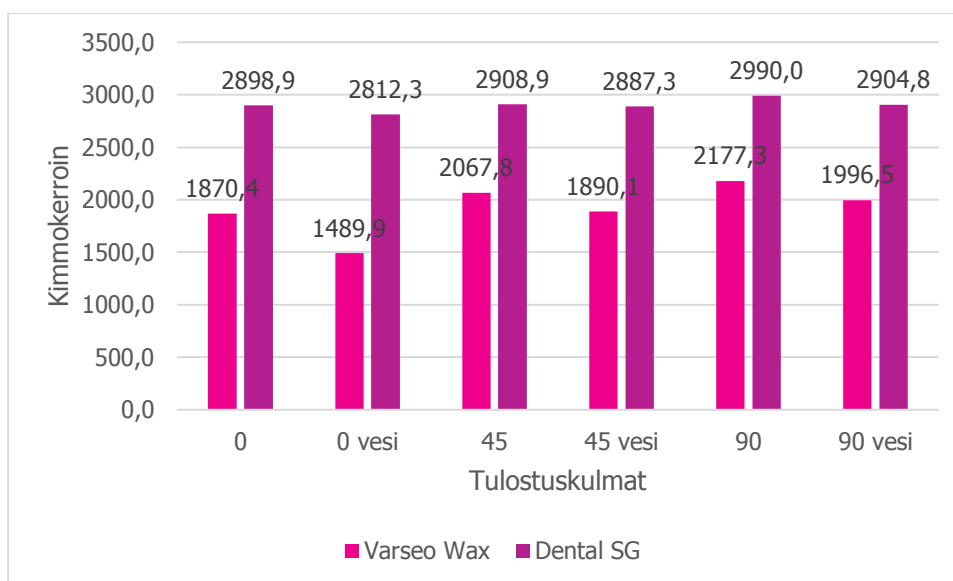


KUVIO 12. Dental SG:n kimmokerroimien keskiarvot.

Dental SG kesti huomattavasti enemmän taivutusta kuin Varseo Wax. Keskimäärin Dental SG:n taivutuslujuus on isompi noin 30 MPa (kuvio 13). Kimmokerroin on keskimäärin noin 1000 MPa enemmän kuin Varseo Wax:lla (kuvio 14).



KUVIO 13. Varseo Wax:n ja Dental SG:n taivutuslujuuksien keskiarvot.



KUVIO 14. Varseo Wax:n ja Dental SG:n kimmokertoimien keskiarvot.

5.8.3 Iskulujuuskokeet

Iskulujuuskokeet epäonnistuivat täysin, mikä tekee työn tutkimuksesta hieman vajaan. Iskulujuuskokeen tulokset olisivat olleet tärkeitä, kun verrataan materiaalien kestävyysominaisuuksia.

Kokeet eivät onnistuneet, koska Savonialla oleva Charpy-iskulujuusvasara on liian järeä muovikappaleille. Vasara antoi tuloksiksi testisauvoille 0 – 1 J. Vasaraa kokeiltiin myös ilman testikappaleen vastusta, tulokset olivat myös 0 – 1 J suuruisia. Eli vasaran mittatarkkuus ei riittänyt iskusauvojen testaamiseen. Tiedossa ei ollut muovien testaukseen soveltuvia iskuvasaroita Kuopion alueella, joten iskulujuuskokeet jätettiin tekemättä.

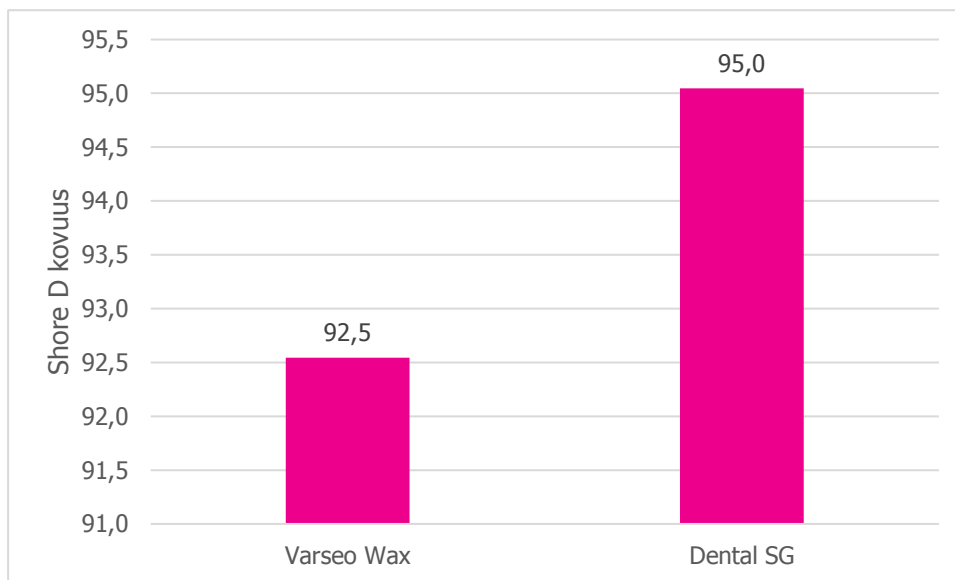
5.8.4 Kovuusmittaus

Kovuusmittaukset suoritettiin Savonian Shore D -durometrilla (kuva 22). Kovuusmittari on hyvin helppokäyttöinen. Mittari painetaan mitattavaan kappaleeseen, kunnes anturiipikki on uppoutunut koko pituudeltaan. Mittari näyttää tuloksen digitaalinäytöltä. Mittari on suunniteltu Shore D kovuuk-sien mittaamiseen, eli kovien muovimateriaalien mittaamiseen. Kovuusmittaukset tehtiin iskukoesau-voille, koska mitattavan kappaleen paksuus pitää olla vähintään 6 mm. Kovuuden yksikkö on Shore-kovuus.



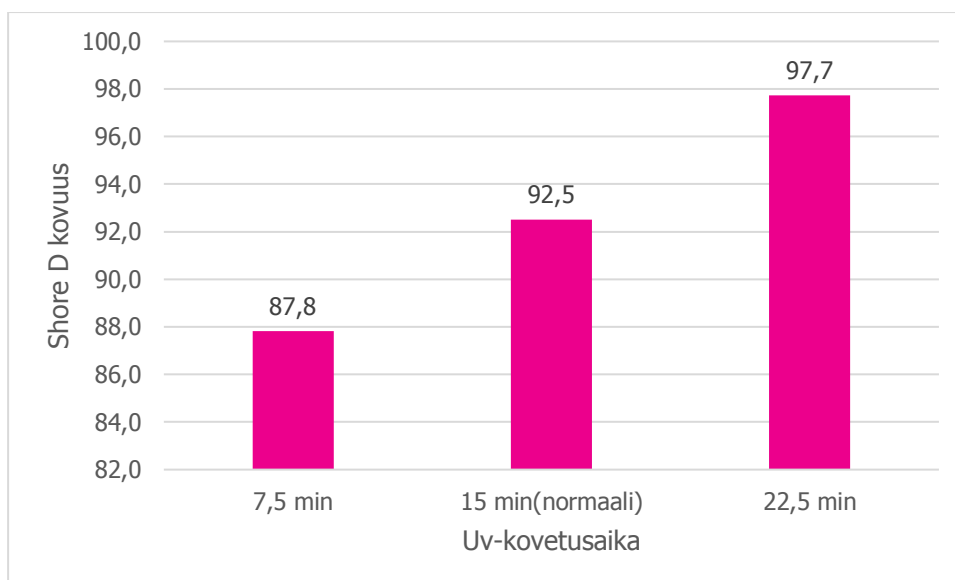
KUVA 22. Shore D -durometri.

Kovuusmittausten tuloksista ilmeni, ettei tulostusasennolla ja vedellä ole juuri mitään vaikutusta kummankaan testattavan materiaalin kovuuteen. Joten kovuuden keskiarvo laskettiin kaikista saaduista tuloksista, ottamatta huomioon tulostusasentoa tai veden imeytystä. Kuvioista 15 huomaa, että Dental SG:n Shore D-kovuus on keskimäärin 2,5 yksikköä kovempi kuin Varseo Wax:n Shore kovuus.



KUVIO 15. Shore D kovuuksien keskiarvot.

UV-kovetus aika vaikutti Varseo Wax:n kovuuteen muutamien kovuusyksikköjen verran. 22,5 minuutin kovetus teki materiaalista 5,2 yksikköä kovemman, kuin 15 minuuttia kovetetut kappaleet (Kuvio 16).



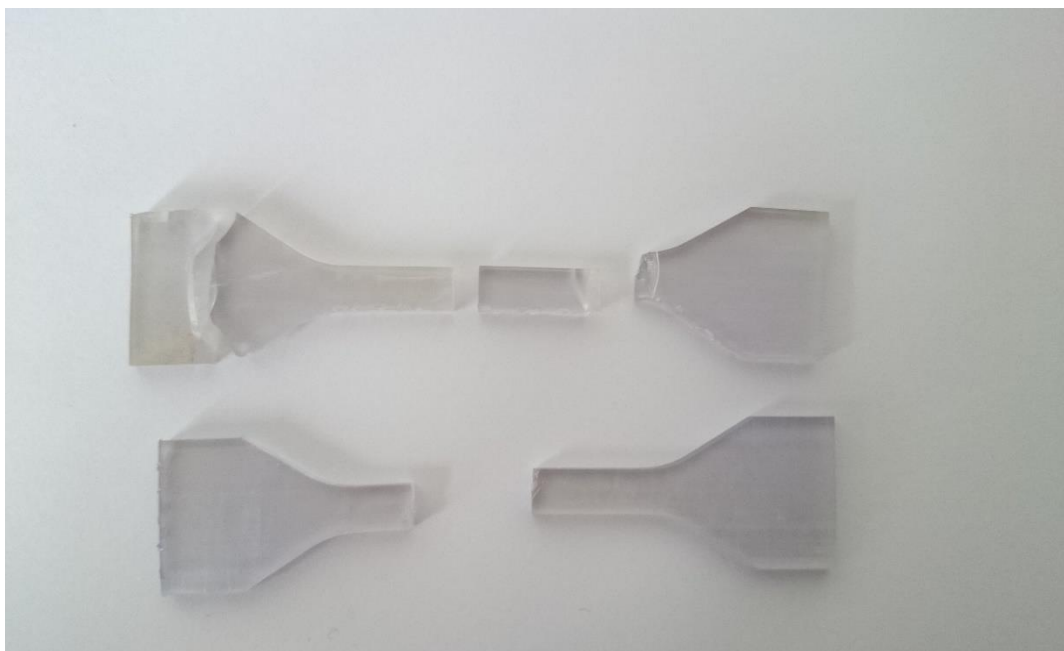
KUVIO 16. UV-kovetusajan vaikutus Varseo Wax:n kovuuteen.

6 LOPPUTULOKSET JA PÄÄTELMÄT

Nesteen fotopolymeerisoinnilla valmistettujen muovikappaleiden materiaalitestaaminen onnistuu hyvin Savonian ja Itä-Suomen yliopiston laitteilla. Poissulkien iskulujuustestit, koska siihen ei löydy sopivaa laitetta muovien testaamista varten. Iskulujuusvasaran sopivuus tätä testiä varten olisi pitänyt tarkastaa perusteellisemmin, niin ei olisi tarvinnut turhaan tilata 3DMakerilta ja Mallihampaalta iskukovuussauvoja. Iskukovuustesti olisi voitu korvata vääntökokeilla, jotka olisi pystytty suorittamaan yliopiston laitteilla. Vääntökokeista olisi voinut saada muutenkin todella mielenkiintoisia tuloksia, koska Mallihampaan purentakiskojen kestävyyttä, mutta vääntökokeiden mahdollisuus selvisi vasta ensimmäisten materiaalitestien yhteydessä yliopistolla.

Pinnanlaatu ongelmat vaikuttivat merkittävästi 0° kulmassa tulostettujen koesauvojen testituloksiin. 0° kulmassa tulostetut koesauvat saivat kaikissa testeissä pienimmät arvot. Sauvat murtuivat yleensä useista eri kohdista ja välillä lähes heti testin alkamisen jälkeen (kuva 23). Structon tutkimuksen mukaan kappaleen pitäisi kestää enemmän kuormitusta, kun tulostuskerrokset ovat yhdensuuntaiset kuormittavan voiman kanssa. Vaikka vetokokeessa 0° kulmassa tulostetun koesauvan kerrokset ovat täysin yhdensuuntaiset voiman kanssa, niin sauvat kestivät kaikista vähiten vetolujuutta. Pinnanlaatuongelmista johtuen 0° kulmassa tulostettujen koesauvojen tuloksia ei voida pitää vertailukelpoisina. Tulokset kuitenkin kertovat, kuinka tärkeä hyvä pinnanlaatu on kappaleen kestävyiden kannalta. (Structon, 2016)

Yksi syy Mallihampaan purentakiskojen rikkoutumiseen voi olla juuri nämä pienet säröt kappaleessa. Tukirakenteiden poisto väärällä tavalla voi aiheuttaa säröjä, joita ei ole jälkikäsitteystä huolimatta saatu täysin poistettua. Säröjä voi syntyä myös vasta käyttövaiheessa, esim. tulostusmateriaalin epäpuhtauksista tai hammaskiskojen geometriasta johtuen. Toinen syy voi olla huonolaatuinen digitaalinen hammasmalli, joka siirretään viipalointiohjelmaan. Huono digitaalinen hammasmalli voi viipalointiohjelmassa aiheuttaa tyhjän välin tulostuskerroksiin. Kun kappale laitetaan tulostumaan, niin tulostin jättää yhden kerroksen välistä, jolloin kerrosten väliin voi jäädä pieni särö. Tämä särö toimii niin sanottuna murtumispesäkkeenä, jos purentakiskoon kohdistuu iso voima esim. lattialle pudotessa. Vika voi olla myös Mallihampaan käyttämässä viipalointiohjelmistossa. Mallihampaan mukaan näitä tyhjiä "välejä" on tullut muutamia kertoja tulosteisiin, mutta ne eivät ole olleet kokonaisia kerroksia, vaan pieni osa kerroksesta. Yleensä valottamaton kohta on jatkunut useamman kerroksen, jolloin virheet tulosteissa ovat erottuneet selkeästi. Mahdollista kuitenkin on, että jossain kiskoissa on voinut jäädä puuttumaan kerros tai osa kerroksesta, mutta näitä ei ole ainakaan vielä havaittu Mallihampaalla. Mikäli jatkossa halutaan testata tulostuskulman vaikutusta nesteen fotopolymeerisoinnilla tuotettuihin kappaleisiin, niin 0° kulmassa tulostettujen koesauvojen kohdalla kannattaa itse ennen tulostamista asettaa manuaalisesti tukimateriaalit. Vaakasuurassa tulostetuilla kappaleilla tukimateriaalia tuskin voi asettaa siten, että ne eivät tulisi testialueelle, mutta tukien määrää pystyy varmasti vähentämään. Esimerkiksi vetosauvojen ohut keskikohta, josta sauvan on määrä katketa pitäisi olla pinnanlaadultaan mahdollisimman hyvä, jotta tulokset olisivat luotettavia. Erityisesti pitää kiinnittää huomiota tukien poistamiseen siten, etteivät ne vaurioita kappaleen pintaa.



KUVA 23. Ylempänä 0° kulmassa tulostettu murtunut vetosauva ja alempana 90° kulmassa tulostettu vetosauva.

Lukuun ottamatta 0° kulmassa tulostettujen vetosauvojen arvoja, vetokokeet onnistuivat hyvin. Saa-
 dut arvot olivat hyvin järkeviä, eli sauvojen mitat ja testiparametrien asetukset olivat sopivia. Kor-
 kein vetolujuus saatiin 90° kulmassa tulostetuille vetosauvoille; jolloin Varseo Wax:n vetolujuuden
 keskiarvo oli 1014,2 N, ja Dental SG:n 1214,9 N (kuvio 6). Eli Dental SG:n vetolujuus oli noin 200 N
 suurempi. Vetokokeiden tuloksia voidaan verrata ABS-muoviin, joka on hyvin luja ja jäykkä muovi-
 laatu. ABS-muovista valmistetaan muun muassa kypäriä ja putkia. Joten vetolujuuden pitäisi olla
 riittävä purentakiskojen käyttöön. (MatWeb)

Taivutuskokeissa molemmat materiaalit saivat myös parhaan tuloksen 90° kulmassa tulostetuilla
 koesauvoilla (kuviot 13 ja 14). Varseo Wax:n suurin taivutuslujuus oli 83,3 MPa ja kimmokerroin
 2177,3 MPa. Dental SG:n vastaavat arvot olivat 107,7 MPa ja 2990,0 MPa. Dental SG:n taivutusomi-
 naisuudet olivat siis huomattavasti paremmat kuin Varseo Wax:n. Murtumislujuuden ylittyessä Var-
 seo Wax -koesauvat murtuivat siististi keskeltä kahtia ja Dental SG -koesauvat räjähtävästi useisiin
 osiin (kuva 24). Varseo Wax:n ja Dental SG:n taivutusominaisuuksia voi verrata akryyliin, josta val-
 mistetaan muun muassa pleksiä. (MatWeb)



KUVA 24. Taivutussauvojen murtumat. Ylempänä Dental SG:sta valmistettu taivutussauva ja alempana Varseo Wax:sta valmistettu.

Kovuuskokeissa ilmeni, että veden imeytymisellä ja tulostusasennolla ei ole merkitystä kummankaan materiaalin kovuuteen. Dental SG:n suurin Shore-kovuus oli 95 ja Varseo Wax:n 92,5 (kuvio 15). Materiaalin voi siis luokitella erittäin kovaksi muoviksi. Materiaalien kovuutta voi verrata esimerkiksi rakennuskypärään (kuva 10).

90° kulmassa tulostetut koesauvat saivat parhaat arvot sekä vetokokeessa että taivutuskokeessa. Tulosten perusteella paras tulostuskulma on siis 90° kulmassa. 90° kulmassa tulostettaessa koesauvojen pinnanlaatu on parempi, koska tukimateriaalia ei tarvitse tulostaa muualle kuin kappaleen alaosaan. Tästä syystä sauvoissa ei ollut säröjä, joista murtuminen saisi alkunsa. Tämän tutkimuksen perusteella ei pysty kuitenkaan väittämään, että paras tulostusasento purentakiskojen ja muiden kappaleiden tulostamiselle olisi 90° kulma. Purentakiskot ovat todella paljon monimutkaisemman muotoisia kuin koesauvat. Jos purentakiskon tulostaisi 90° kulmassa, tukimateriaalia tulisi todella paljon ja sitä tulisi sellaisiin kohtiin, johon voi jäädä isoja säröjä tukien poistamisen jälkeen. Mielestäni purentakiskot tulisi tulostaa edelleen 0° kulmassa, jolloin tukimateriaalia tulisi vain purentakiskon paksuimpaan kohtaan eli sen pohjaosaan. Materiaalitestauksen kannalta 90° kulma on ehdottomasti paras ratkaisu, jos halutaan saada vertauskelpoisia tuloksia materiaalin ominaisuuksille. 90° kulmassa tulostettaessa, tukimateriaalia ei tule sauvojen testialueelle, jolloin sauvat ovat pinnanlaadultaan hyvin samanlaiset. Kun kappaleiden pinnanlaadut ovat hyvin samanlaisia, tulosten hajonta pienenee ja ne ovat kokeellisesti paremmin verrattavissa.

Veden imeytymisen vaikutus materiaalien ominaisuuksiin, ei ollut kovin merkittävä. Vetokokeissa vesi pienensi molempien materiaalien vetolujuutta noin 100 N. Taivutuskokeissa taivutuslujuus väheni noin 2-10 MPa, ja kimmokerroin noin 100 MPa. Vaikka vaikutus ei ole kovin iso niin pitää huomioida, että koesauvoja pidettiin vedessä vain 50 tuntia. Pidempi aika voi vaikuttaa enemmän materiaalin ominaisuuksiin.

UV-kovetusajan pidentämisen vaikutus Varseo Wax:iin ei ollut kovinkaan merkittävä. Kovetusajan kasvattaminen 50 %, kasvatti vetolujuutta noin 100 N, ja taivutuslujuutta noin 15 MPa. Kovetusajan lyhentäminen vaikutti paljon enemmän lujuusominaisuuksiin; lyhentämällä aikaa 50 % pienensi vetolujuutta noin 400 N ja taivutuslujuutta noin 20 MPa.

Dental SG:n lujuusominaisuudet olivat paremmat kaikissa testeissä verrattuna Varseo Wax:n lujuusominaisuuksiin, vaikka valmistajien mukaan lujuusarvot ovat lähes samanlaiset (taulukko 3). Testien perusteella voidaan päätellä, että Dental SG:n UV-kovetus on ollut tehokkaampi, jolloin materiaalista on tullut kestävämpää. Vaikka Varseo Wax:n vetosauvoja testattiin kovettamalla 22,5 minuuttia, eli yli kaksi kertaa pidempään kuin Dental SG:n vetosauvoja, silti Varseo Wax -vetosauvat olivat lujuudeltaan yli 100 N heikompia, kuin Dental SG -vetosauvat. Mallihammas voisi parantaa purentakiskojensa kestävyyttä päivittämällä heidän UV-kovetuslaitteistoaan. Pelkästään lamppujen lisääminen parantaisi lujuusominaisuuksia ja vähentäisi kovetusaikaa.

Formlabsin ja Begon tulostimien eroja on vaikea havaita materiaalitutkimuksen tulosten perusteella. Molempien tulostimien tulostusjälki vaikutti hyvältä, ja koekappaleet olivat laadukkaita ja pinnanlaadultaan hyviä ennen tukimateriaalien irrottamista. Tämän työn perusteella on vaikea päätellä, mikä tekee Begon tulostimesta niin paljon kalliimman. Laitteet olisivat paremmin verrattavissa, jos molemmilla laitteilla olisi tulostettu samaa materiaalia ja tehty samalaiset jälkikäsitellyt. Kun vertaa valmistajien ilmoittamia tietoja materiaalin ominaisuuksista, niin tämän testin tuloksien perusteella materiaalit ovat paljon kestävämpiä, kuin valmistaja väittää (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Testitulosten arvot verrattuna valmistajan arvoihin.

	Begon arvot	Testitulokset, Varseo Wax
Taivutuslujuus	≥ 50 MPa	83,3 MPa
Taivutusmoduuli	≥ 1500 MPa	2177,3 MPa
Shore-kovuus	80 - 88	92,5
	Formlabsin arvot	Testitulokset, Dental SG
Taivutuslujuus	≥ 50 MPa	107,7 MPa
Taivutusmoduuli	≥ 1500 MPa	2990,0 MPa
Shore-kovuus	80 - 88	95

Testien tulosten perusteella Varseo Wax:n lujuusominaisuudet ovat riittävät käytettäväksi purentakiskoissa. Tuloksia voidaan verrata ihmisen purentavoimaan, mikä on keskimäärin noin 800 N. Mallihammas voi parantaa purentakiskoissa käytettävän materiaalin kestävyysominaisuuksia UV-kovetusuunin päivittämisellä. Myös digitaalisten hammasmallien tarkistaminen viipalointiohjelmassa tarkemmin voi ehkäistä virheiden syntymisen valmiissa kappaleissa. (Scientific American)

7 YHTEENVETO

Iskulujuustestien epäonnistumisesta huolimatta, saatiin LIVA-hankkeeseen tietoa siitä, kuinka AM-tekniikalla valmistettuja muoveja testataan ja minkälaisilla laitteilla testit voidaan tehdä. Lisäksi työ toimii pohjatutkimuksena tuleville LIVA-hankkeessa tehtäville hammasteknisten materiaalien tutkimuksille. Työ toi uutta tietoa materiaalitestauksen mahdollisuuksista ja sen rajoituksista. Saadut tulokset antavat nesteen fotopolymerisointitekniikkaa käyttäville hyödyllisiä lisätietoja UV-kovetuksen ja pinnanlaadun vaikutuksista.

Työ antoi mahdollisuuden jatkotutkimuksille. Mielenkiintoista olisi tutkia näiden materiaalien väsymistä pitkän kuormitusyökin jälkeen ja sitä, menettääkö materiaali lujuusominaisuuksiaan väsymisen jälkeen.

LÄHTEET

3DSYSTEMS. Stereolithography (SLA) Material Properties. [Viitattu 2017-02-02.] Saatavissa: <https://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/stereolithography-sla/materials>

ALONEN, A. SUHONEN, M. HIETIKKO, E. VIHELÄ, S. GOLDSTEINE, Z. HEINONEN, T. 2016. Lisäävän valmistuksen käyttö terveydenhuollon ja lääketieteen sovelluksissa. Savonia Ammattikorkeakoulu. [Viitattu 2017-02-10.] Saatavissa: <http://portal.savonia.fi/amk/fi/tutkimus-ja-kehittaminen/julkaisu-toiminta/julkaisut-aloittain/tekniikka-ja-liikenne/lisaavan-0>

APACHE. Durometer Scales. [Digikuva] Saatavissa: [https://www.apache-inc.com/CMS/WSCentral.nsf/weblinks/AHBD-9GQRGK/\\$File/AHBD-9GQRGK.png](https://www.apache-inc.com/CMS/WSCentral.nsf/weblinks/AHBD-9GQRGK/$File/AHBD-9GQRGK.png)

ARCADLAB. Digital Study Model [Digikuva]. Saatavissa: <https://static1.squarespace.com/static/54c27adce4b0e39e5e17a1b5/t/54c47156e4b0ef5f4baba5e2/1422160215516/Photo+Jan+04%2C+10+31+06+AM.jpg?format=750w>

AZOM. 2005. Izod Tests - Determination of Impact Energy Using the Izod Test. [Viitattu 2017-02-06.] Saatavissa: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2765>

AZOM. 2005. Charpy Test - Determination of Impact Energy Using the Charpy Test. [Viitattu 2017-02-06] Saatavissa: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2763>

BEGO. BEGO 3D-printer. Saatavissa: <http://www.bego.com/3d-printing/3d-printer/>

CAMPBELL, T. WILLIAMS, C. IVANOVA, O. GARRETT, B. 2011. Could 3D Printing Change the World. Atlantic Council. [Viitattu 2016-12-18.] Saatavissa: <http://www.atlanticcouncil.org/publications/reports/could-3d-printing-change-the-world>

CREATIVEMECHANISM. Everything You Need To Know About Polypropylene (PP) Plastic. [Viitattu 2017-01-30.] Saatavissa: <https://www.creativemechanisms.com/blog/all-about-polypropylene-pp-plastic>

CREATIVEMECHANISM. Everything You Need To Know About Nylon (PA). [Viitattu 2017-01-30.] Saatavissa: <https://www.creativemechanisms.com/blog/3d-printing-injection-molding-cnc-nylon-plastic-pa>

CREATIVEMECHANISM. Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA). [Viitattu 2017-01-30.] Saatavissa: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>

CREATIVEMECHANISM. Everything You Need to Know About ABS Plastic. [Viitattu 2017-01-30.] Saatavissa: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>

CUSTOMPARTNET. 2008. Fused Deposition Modeling [digikuva]. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>

CUSTOMPARTNET. 2008. Stereolithography(SLA) [digikuva]. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/sla.png>

FORMLABS. ZGURIS, Z. How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints Are Affected by UV Curing. [Viitattu 2017-02-15.] Saatavissa: <https://formlabs.com/media/upload/How-Mechanical-Properties-of-SLA-3D-Prints-Are-Affected-by-UV-Curing.pdf>

FORMLABS. The Most Advanced Desktop 3D-Printer Ever Created. Saatavissa: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>

HAKALA, E. 2014. 3D-tulostettujen kappaleiden mekaaniset ominaisuudet. Lahden Ammattikorkeakoulu. Muovitekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2017-01-20.] Saatavissa: <http://theseus.fi/handle/10024/85807>

ISO. SFS ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus – Yleiset periaatteet ja terminologia.

ISO. SFS-EN ISO 17296. Additive Manufacturing – General Principles.

ISO. SFS-EN ISO 291. Plastics - Standard atmospheres for conditioning and testing.

ISO. SFS-EN ISO 527. Plastics - Determination of tensile properties.

ISO. SFS-EN ISO 178. Plastics - Determination of flexural properties.

ISO. SFS-EN ISO 179. Plastics - Determination of Charpy impact properties.

ISO. SFS-EN ISO 180. Plastics - Determination of Izod impact strength.

ISO. SFS-EN ISO 868. Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer.

LEON, R. LING, T. LEASE, J. 2016. Optimizing Layer Thickness and Print Orientation of 3D objects for Enhanced Mechanical Property using STRUCTO 3D Printers. STRUCTO. [Viitattu 2017-02-11.] Saatavissa: <https://structo3d.com/wp-content/uploads/2015/11/Optimizing-Layer-Thickness-and-Print-Orientation-of-3D-objects-for-Enhanced-Mechanical-Property-using-STRUCTO-3D-Printers.pdf>

MATWEB. Flexural Strength Testing of Plastics. [Viitattu 2017-03-15.] Saatavissa: <http://www.matweb.com/reference/flexuralstrength.aspx>

MATWEB. Tensile Property Testing of Plastics. [Viitattu 2017-03-15.] Saatavissa: <http://www.matweb.com/reference/tensilestrength.aspx>

MAXEY, K. 2013. 3D Printing For the Hearing Impaired. Engineerin.com. [Viitattu 2017-01-05.] Saatavissa: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/5128/3D-Printing-For-the-Hearing-Impaired.aspx>

MET. 2001. Muovit ja kumit. Metalliteollisuuden keskusliitto.

PALERMO, E. 2013. What is Stereolithography. LiveScience. [Viitattu 2017-01-03.] Saatavissa: <http://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>

PALERMO, E. 2013. Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. LiveScience. [Viitattu 2016-12-18.] Saatavissa: <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>

ROLLEDALLOYS. How to Measure Tensile Strength, Elastic Modulus, and Ductility. [Viitattu 2017-02-01.] Saatavissa: <https://www.rolledalloys.com/technical-resources/blog/how-to-measure-tensile-strength-elastic-modulus-and-ductility>

SAARELA, O. AIRASMAA, I. KOKKO, J. SKRIFVARS, M. KOMPPA, V. 2007. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys Ry.

SCIENTIFIC AMERICAN. The Power of the Human Jaw. [Viitattu 2017-03-20.] Saatavissa: <https://www.scientificamerican.com/article/the-power-of-the-human-jaw/#>

SMOOTH-ON. Durometer Shore Hardness Scale [Digikuva]. Saatavissa: <https://www.smooth-on.com/pw/site/assets/files/30090/durometerchart.png>

STRATASYS. FDM Thermoplastics. [Viitattu 2017-01-03.] Saatavissa: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>

STRATASYS. Stereolithography Materials. [Viitattu 2017-02-10.] Saatavissa: <https://www.stratasys-direct.com/materials/stereolithography/>

SUBSTECH. 3-Point Flexure Test. [Digikuva] Saatavissa: http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=3-point_flexure.png

VALTTERI, O. VÄYRYNEN, E. TANNER, J. VALLITTU, P. 2016. The anisotropy of the flexural properties of an occlusal device material processed by stereolithography. The Journal of Prosthetic Dentistry. [Viitattu 2017-02-10.] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.savonia.fi/science/article/pii/S0022391316300579>

WELLINGTON, M. 2014. How Does Selective Laser Sintering Works? 3D Print Headquarters. [Viitattu 2017-01-05.] Saatavilla: <http://3dprinthq.com/how-does-selective-laser-sintering-work/>

ZWICK ROELL. Tensile Tests on Plastics. [Viitattu 2017-02-01.] Saatavissa: <https://www.zwick.com/plastics/thermoplastic-and-thermosetting-molding-materials/tensile-test-iso-527-astm-d638>