

3D-TULOSTETTUJEN TEKNISTEN MUOVIEN MEKAANISET OMINAISUUDET

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan-ala
Materiaalitekniikka
Muovitekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Tuomas Salla

Lahden ammattikorkeakoulu
Materiaalitekniikka

SALLA, TUOMAS:

3D-Tulostettujen teknisten muovien
mekaaniset ominaisuudet

Muovitekniikan opinnäytetyö,

65 sivua, 8 liitesivua

Kevät 2015

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksen on selvittää tämänhetkisten lopputuotteisiin soveltuvien 3D-tulostettavien muovien ja 3D-tulostimien nykytila

Teoriaosuudessa käsitellään 3D-tulostamisen historiaa, saatavilla olevia tekniikoita, materiaaleille tehtäviä mekaanisia testejä sekä itse materiaaleja. Materiaalit ovat pääsääntöisesti teknisiä- ja erikoismuoveja, joita käytetään päivittäin koneenrakennussovelluksissa.

Materiaaleille suoritettiin vetokoe ISO 527 – standardin ja taivutuskoe ISO 178 – standardin mukaan. Lisäksi 3D-tulostetuille materiaaleille suoritettiin DSC-testit termisten ominaisuuksien selvittämiseksi.

Tuloksia verrataan vastaaviin koneistetuista kappaleista saatuihin tuloksiin, sekä valmistajien ilmoittamiin tietoihin. Osa tämän opinnäytetyön tiedoista on salattuja ja tarkoitettu vain Vink Finland Oy:n käyttöön.

Asiasanat: SLS, 3D-tulostaminen, koneistaminen, FDM, PEEK, PEI, Erikoismuovit

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in ...

Salla Tuomas:

Mechanical properties of 3D-printed
high-performance plastics

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering
appendices

65 pages, 8 pages of

Spring 2015

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to examine the current state of 3D printing materials and technologies that are suitable for end production.

The theoretical part of the thesis deals with the history of 3D printing, available technologies, and tests for determining mechanical properties of 3D printing materials.

Materials studied in this thesis were high-performance plastics, which are commonly used in mechanical engineering applications. Mechanical properties of materials were determined with tensile tests according to the ISO 527 standard and 3-point bend tests according to the ISO 178 standard. In addition, DSC-tests were conducted for 3D-printing materials to determine the thermal properties.

The results of those tests were compared to machined test objects as well as the information provided by material manufacturers.

Part of this thesis is classified and intended only for Vink Finland Oy internal use.

Key words: SLS, 3D printing, machining, FDM, PEEK, PEI, high-performance plastics

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	3D-TULOSTUSTEKNOLOGIAT	2
2.1	3D-tulostimet yleisesti	2
2.2	Saatavilla olevat materiaalit	4
2.3	FDM – Fused Deposition Modeling	5
2.4	SLS – Selective Laser Sintering	7
2.5	SLA – Stereolitografia aparatrus (Stereolitografia)	9
2.6	AKF- Arburg Kunststoff Freeforming	11
2.7	Muita AM-tekniikoita	12
2.7.1	LOM – Laminated object manufacturing	12
2.7.2	Material Jetting	13
3	TULEVAISUUDEN NÄKYMIÄ	14
4	TESTATTAVAT MATERIAALIT	15
4.1	PEEK – polyeetterieetteriketoni	16
4.2	PA 12 – Polyamidi 12	17
4.3	PEI – Polyeetteri-imidi	18
4.4	ABS	19
4.5	PA 6 G	19
5	TYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT 3D-TULOSTIMET	21
5.1	EOS – Electro Optic Systems GmbH	21
5.1.1	Formiga P 110	21
5.1.2	EOSINT P 800	22
5.2	Stratasys	22
6	TESTAUS	24
6.1	Vetokoe	24
6.2	Taivutuskoe	25
6.3	DSC – Differentiaali pyyhkäisykalorimetri	27
7	TULOKSET	30
7.1	DSC – Differentiaali pyyhkäisykalorimetri	30
7.1.1	PEEK HP3	30
7.1.2	ULTEM 9085 (PEI)	30
7.1.3	PA 2201	30

7.1.4	ABS M30	30
7.2	Vetokoe	30
7.2.1	PEEK	31
7.2.2	PEI	31
7.2.3	PA 12	31
7.2.4	ABS	31
7.3	Taivutuskie	31
7.3.1	PA 6	32
7.3.2	PEEK	32
7.3.3	PEI	32
7.3.4	PA 12	32
7.3.5	ABS	32
7.3.6	PA 6	32
8	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	34

SANASTO JA LYHENTEET

FDM	Fused Deposition Modeling. Stratasys Inc:n patentoima ekstruusiotulostus tekniikka.
SLS	Selective Laser Sintering. Lasersintraaminen
SLA	Stereolitography - Stereolitografia
AM	Additive Manufacturing. Lisäävä valmistus
PEEK	Polyeetterieetteriketoni.
ABS	Akryylnitriilibutadieenistyreeni
PEI	Polyeetteri-imidi
PA	Polyamidi
FFF	Fused Filament Fabrication. Ekstruusiotekniikka tulostukseen
DSC	Differential Scanning Calorimeter. Differentiaali pyyhkäisy kalorimetri

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee 3D-tulostusteknologian soveltuvuutta ja 3D-tulostettujen kappaleiden mekaanista kestävyyttä verrattuna perinteisillä koneistustekniikoilla valmistettuihin erikoismuovituotteisiin. Työssä käytetään ja tutkitaan kahta eri tulostusmenetelmää: FDM ja SLS. Verrokkikappaleet on valmistettu puolivalmistelevyistä koneistamalla.

Työhön on hankittu tietoa vieraillemalla Euromold-messuilla Frankfurtissa. Euromold on AM-tekniologioihin, ja muottivalmistukseen keskittynyt tapahtuma, jossa on noin 1000 näytteilleasettajaa ja 50000 vierailijaa. Messuilta kertyi arvokasta tietoa tulostustekniikoista, trendeistä sekä tulevaisuuden näkymistä.

Työssä tutkittavat materiaalit ovat PEI, PEEK, PA 12 sekä ABS. Materiaaleista valmistetaan vetosauvoja 3D-tulostamalla sekä koneistamalla puolivalmistelevyistä.

Materiaaleille tehdään veto- ja taivutuskoe, sekä mitataan termiset ominaisuudet DSC:llä

Työ koostuu teoriaosuudesta, jossa esitellään muovimateriaaleilla käytettäviä AM-tekniikoita, niiden historiaa, heikkouksia ja vahvuuksia sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta eri käyttökohteisiin. Osiossa käydään myös lyhyesti läpi muita AM-tekniikoiden käyttösovelluksiasekä trendejä. Osio pitää myös sisällään omaa pohdintaa.

Työn tavoitteet on selvittää tällä hetkellä markkinoilla olevilla laitteilla ja valmistusmenetelmillä valmistettujen kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia. Tuloksia verrataan vastaaviin koneistettuihin kappaleisiin. Testaus antaa kattavan kuvan laitteiden soveltuvuuksista tuotantolosuhteisiin.

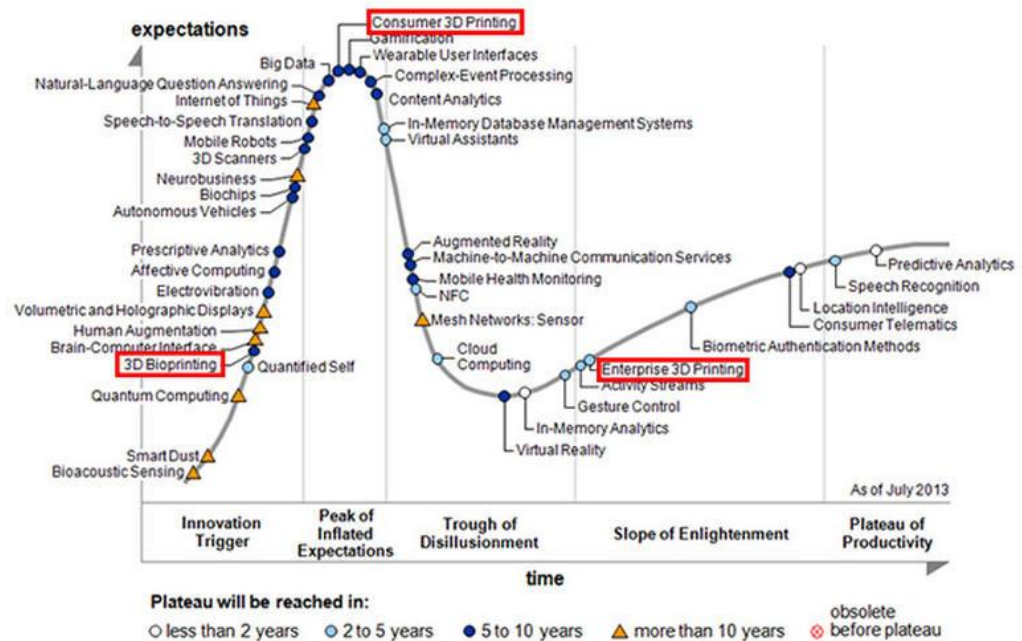
2 3D-TULOSTUSTEKNOLOGIAT

2.1 3D-tulostimet yleisesti

3D-Tulostaminen on tekniikka, joka luokitellaan lisävään valmistukseen (Additive manufacturing), jonka juuret ulottuvat 1980-luvulle. Vaikka tämä valmistusmuoto on noussut hiljattain suuren yleisön tietoisuuteen, on tekniikkaa kehitetty jo vuosia. Vuonna 1984 Chuck Hull kehitti ensimmäisen SLA-koneen sekä STL tiedostoformaatin, jota käytetään käytännössä kaikissa 3D-tulostuslaitteissa. STL on lyhenne STereo Litography –sanoista, ja se on kerroskuva 3D CAD-kuvasta. (3D-Printing Industry 2014.)

Koneet ovat alkaneet yleistyä vasta 2010-luvun alussa, ensin metallien tulostamisessa ja myöhemmin muovien. Tällä hetkellä markkinoiden kokonaisarvo on noin 3.8 mrd. dollaria ja vuosittainen kasvu on ollut noin 40 %.(Forbes 2014.)

Teknologiaa hyödynnetään erityisesti, lentokoneiden ja autojen valmistuksessa, lääketieteessä sekä sotateollisuudessa. Kuluttajalaitteet ovat alkaneet jo yleistyä, ja 3D-tulotuksesta voitaisiin jopa puhua trendinä (Kuvio 1.) Kuluttajalaitteet ovat kuitenkin hyvin yksinkertaisia ja hitaita, ja hyödyntävät FDM-tekniikkaa (Esitellään myöhemmin).



Kuvio 1. 3D-tulostamisen aikajana. (McLellan C. 2014)

Tammikuussa 2014 raukesi patenti, joka tuo SLS-tekniikan vapaasti hyödynnettäväksi kaikille laitevalmistajille.

Tekniikan mahdollisuudet on huomattu myös avaruusteollisuudessa. NASA:n insinöörit toimittivat ensimmäisen 3D-tulostimen kansainväliselle avaruusasemalle, ISS:lle marraskuussa 2014. Tarkoituksena on tutkia 3D-tekniikan soveltuvuutta avaruuskäytössä mikropainovoiman vaikutuksen alaisena. Koe liittyy vuonna 2010 aloitettuun ”Made in space” projektiin. Tulostettujen kappaleiden on tarkoitus saapua maahan tutkittavaksi 2015 alkuvuodesta. (Hubscher B. 2014)

3D-tulostamisen mahdollisuudet ovat herättäneet myös kiinnostusta lääketieteen piirissä. Ajatus räätälöityistä implanteista, tekonivelistä ja jopa tulostetuista kudoksista sekä elimistä on luonut yrityksiä, jotka soveltavat 3D-tulostustekniikkaa elävän kudoksen tulostamiseen, esimerkkinä 2007 perustettu Organovo, joka on listautunut New Yorkin pörssiin. Yritys kehittää tulostustekniikkaa, joka soveltuu elävän kudoksen tulostamiseen, sekä valmistaa myös tulostettuja kudoksia tutkimuskäyttöön. (Organovo 2014)

Aikaisemmin koneistamalla tehtyjä implantteja, kuten tekoniveliä sekä hampaiden kruunuja, voidaan toteuttaa tulostamalla. Hyvänä esimerkkinä on lonkkaimplanti, joka valmistettiin 13-vuotiaalle pojalle kasvaimen poistosta aiheutuneen lonkkavaurion korjaamiseksi. Poistettu luumäärä lonkasta oli suuri, joten tavallisilla menetelmillä valmistettu implanti ei ollut mahdollinen. Implanti päätettiinkin tulostaa titaanista SLS-menetelmää hyödyntäen, jolloin lopputuloksena toimiva lonkka. (Euromold 2014.)

Myös hammaslääketieteessä teknologiaa hyödynnetään tehokkaasti. SLS-tekniikka mahdollistaa keraamien tulostamisen jauheesta, ja tekniikka on korvaamassa keraameista koneistamalla valmistetut sillat, kruunut ja implantit. 3D-tulostin yhdessä 3D-kuvauksen kanssa mahdollistaa nopean ja tarkan implantin valmistuksen räätälöidysti ja helposti.

2.2 Saatavilla olevat materiaalit

Yleisesti tulostettavat materiaalit ovat sulamispisteeltään alhaisia, helposti prosessoitavia kestopuoveja, kuten PLA ja ABS. Materiaalivalikoiman suppeus, ja erikoismateriaalien vaikea saatavuus vaikeuttaa AM-tekniikoiden yleistymistä muoveja hyödyntävässä teollisuudessa. Etenkin erikoisemmissä muovityypeissä, joudutaan materiaaleille tekemään lukematon määrä testauksia, ja optimointeja ennen kuin materiaali voidaan kaupallistaa. (Euromold 2014)

FDM-tulostimien yleistymisen on edesauttanut materiaalikirjon kasvamista ja esimerkiksi Stratasys tarjoaakin tulostimilleen ABS-, ASA-, PC/ABS-, PC-, PA12- PPSU-, ja PEI-materiaaleja. FDM-koneilla voidaan käyttää myös kolmannen osapuolen materiaaleja, ratkaiseva tekijä on langan paksuustoleranssit. Epätasainen lanka tukkii laitteen suuttimet ja aiheuttaa tuotantokatkoja, sekä virheellisiä kappaleita.

Sen sijaan SLS-tekniikkaa hyödyntäville koneille materiaaleja on huomattavasti vähemmän. Suurin osa materiaaleista on PA 12- ja PA 11- materiaaleja ja niiden lujitettuja variaatioita. Esimerkiksi EOS tarjoaa PA 12-materiaalia seostettuna lasikuidulla, alumiinilla, hiilikuidulla, sekä

palonestoaineilla. Lisäksi EOS:n valikoimasta löytyvät PS-, PA11-, TPE- ja PEEK HP3- materiaalit. (Euromold 2014).

SLS-laitteille kolmannen osapuolen materiaalit eivät sovellu. Materiaalien termiset ominaisuudet ja hiukkaskoko tulee olla tarkoin tiedossa, jotta prosessi toimisi. Erikoismateriaalien vähäinen kysyntä ja asiakkaiden taipumus palata takaisin vanhoihin halvempiin materiaaleihin hidastavat SLS-prosessiin soveltuvien materiaalien kehitystä. (Euromold 2014).

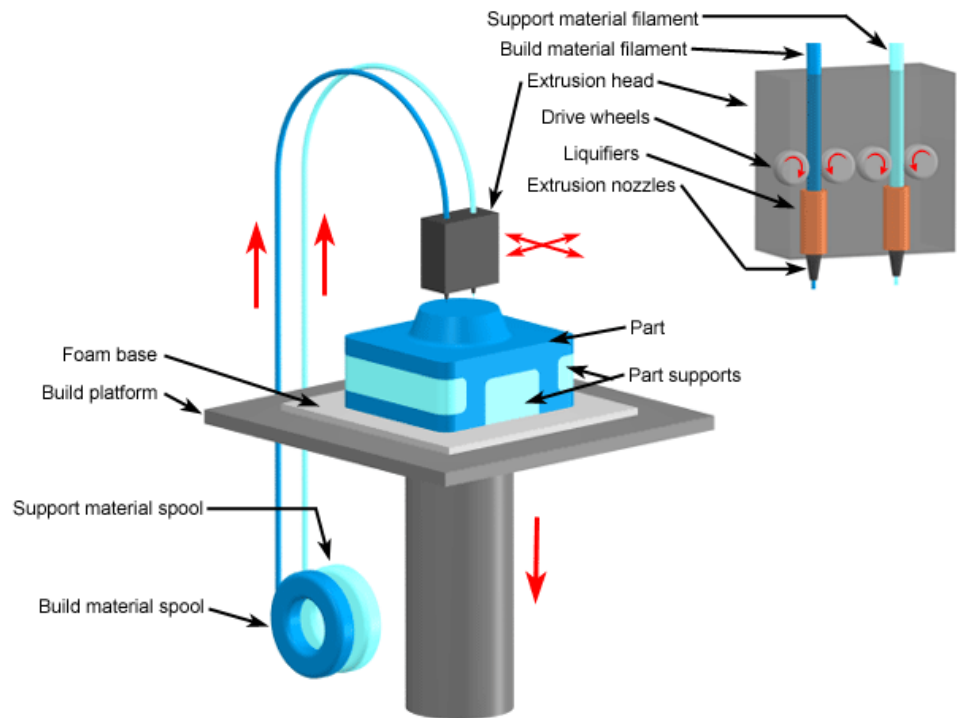
Arburg sen sijaan on tuomassa ratkaisua materiaaliongelmaan. Freeformer AM-laitteet hyödyntävät ruiskuvalutekniikkaa, ja materiaalina voidaan käyttää granulaattia. Teoriassa kaikki ruiskuvalulaatuiset materiaalit sopivat kyseisiin koneisiin, joten materiaalirajoituksia ei juuri ole. Ainoastaan seosteiset laadut eivät sovellu kyseiseen valmistustekniikkaan; Lujitekuidut tukkivat suuttimet ja prosessi pysähtyy. (Euromold 2014).

2.3 FDM – Fused Deposition Modeling

FDM on yleisin ja yksinkertaisin käytössä oleva tulostusmenetelmä. FDM-tekniikka on kehitetty jo 1980-luvun lopulla, Scott Crump'in toimesta. FDM-lyhenne on Stratysy:n tavaramerkki, ja tekniikasta käytetään myös lyhennettä FFF-(Fused Filament Fabrication). Tekniikka perustuu langan muodossa olevan muovin syöttämisen lämmitetyn suuttimen läpi. Muovi ei kuitenkaan saavuta sulamispistettään (Kuva 2).

Tulostimet toimivat yleensä kahdella suuttimella, jossa toinen on varattu raaka-aineelle ja toinen tukimateriaalille. Tukimateriaali on yleensä haurasta tai vesiliukoista materiaalia, joka lopuksi murretaan tai liuotetaan lopputuotteen ympäriltä.

Tulostinmateriaalit ovat kestopuoveja, yleisesti PLA:ta tai ABS:aa, mutta nykyisin on saatavissa myös teknisiä ja erikoismuoveja, kuten PA 12:sta, Polykarbonaattia, ja PEI:tä. (Euromold 2014)



Copyright © 2008 CustomPartNet

Kuva 2. FDM-prosessin toimintaperiaatteet. (CustomPartNet, 2008)

FDM-tekniikassa osittain sulanut muovimassa pursotetaan pieninä pisaroina kerroksittain avaruuskoordinaatistoon. Tekniikan heikkoutena on lujuusominaisuuksien riippuvuus valmistussuunnasta. Jos voima on kohtisuoraan valmistussuuntaan, ovat kappaleen lujuusominaisuudet heikommät kuin voiman kohdistuessa valmistussuunnan mukaisesti. Eroja voidaan tasata pursottamalla kerrokset toisiinsa nähden ristiin. FDM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden lujuusominaisuuksia voidaankin verrata kuitulujittettujen laminaattien ja hartsien ominaisuuksiin, jotka ovat hyvin riippuvaisia kuitujen orientaatiosta. (Stratasys 2014a)

FDM-tulostimet ovat verrattain halpoja, mutta haittapuolena on hitaus. Alimpien hintaluokkien koneet eivät siis sovellu tuotantokäyttöön. Tämän konetyypin koneita suositellaankin käytettäväksi mallien, ja protokappaleiden valmistamiseen.

FDM-tekniikan hyödyt:

-edullisin tekniikka, niin materiaalien kuin laitteistojen osalta

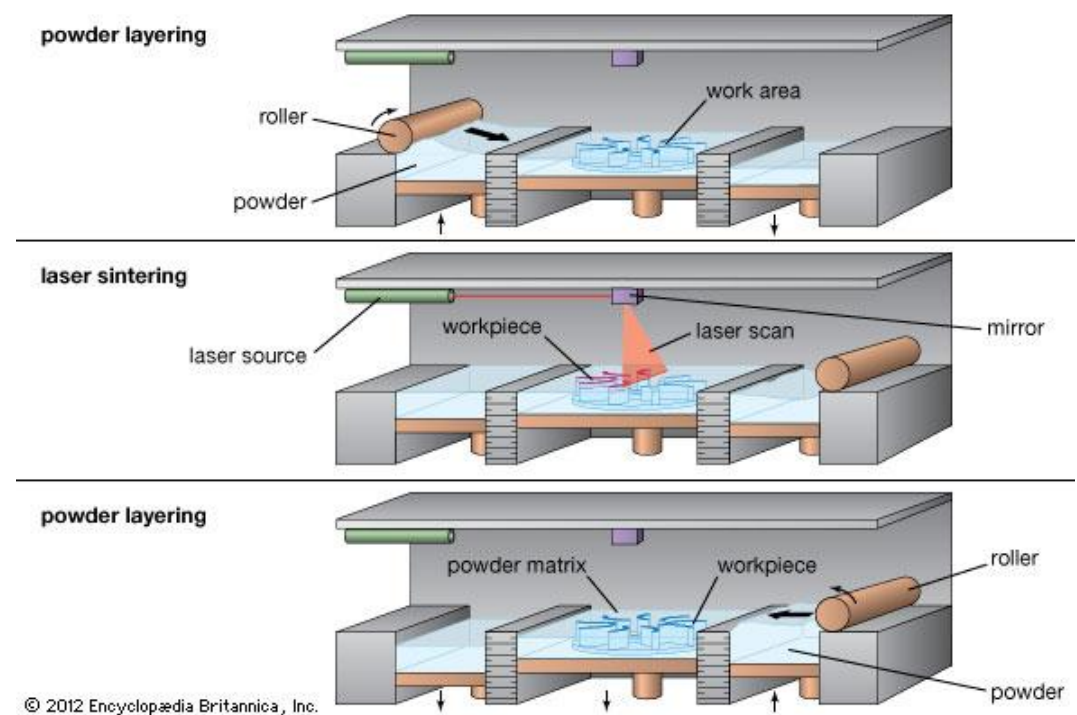
- materiaaleja laajasti saatavilla
- materiaalit suhteellisen halpoja
- useita laitevalmistajia

FDM-tekniikan haitat:

- valmistusprosessin hitaus
- kappaleiden "orientaatio"
- tukirakenteiden tuomat rajoitukset
- pinnanlaatu

2.4 SLS – Selective Laser Sintering

SLS-tekniikassa jauhemuodossa oleva materiaali sintrataan kerros kerrokselta laserin avulla. Järjestelmässä koostuu peilillä ohjatusta laserista, työstökammioista, jauhesäiliöstä, teloista sekä männistä. (Kuva 3.)



Kuva 3. SLS-prosessi (Munchow J. 2014)

Jauhemuodossa oleva raaka-aine tuodaan teloilla työstöalueelle, minkä jälkeen siihen kohdistetaan lasersäteitä, joilla materiaalikerros sintrataan edelliseen kerrokseen. Kappaletta lasketaan männällä kerroksen verran alaspäin, ja uusi jauhekerros telataan työstöalueelle. Kappale valmistuu hiljalleen jauhematriisiin, josta se työn valmistuttua kaivetaan pois, ja puhdistetaan. Prosessissa matriisina ollut jauhe voidaan käyttää uudestaan, mutta käytetyn jauheen sekaan on lisättävä noin 40 % neutseellistä raaka-ainetta, jotta pinnanlaatu ja kappaleen dimensiot pysyvät halutuilla tasoilla. Kappaleiden valmistaminen käytetystä raaka-aineesta aiheuttaa kappaleeseen kutistumia, sekä heikon pinnanlaadun. (Formitech 2014).

Tekniikan etuna on tarkkuus sekä korkeita sulamislämpöjä vaativien materiaalien käyttömahdollisuus. Muovimateriaaleista yleisimmin käytetään PA 11:sta ja PA 12:sta, joita on saatavilla seostettuina mm. alumiinilla ja lasikuiduilla, mutta myös PEEK:iä sekä polystyreeniä. Tekniikan kehitystä ovat jarruttaneet useat patentit, joista tärkein raukesi tammikuussa 2014, sekä muovimateriaalien ominaisuus- vaatimukset. Käytettävien materiaalien tasalaatuisuus täytyy olla todella korkea, jotta prosessiparametrit saadaan määriteltyä tarkoin. (EOSa 2014).

SLS-menetelmällä päästää kohtuullisen suuriin kappalekokoihin. Esimerkiksi EOS P 396 -koneella kappaleen maksimimitat ovat 340 x 340 x 600 mm. Verrattuna FDM-tekniikkaan SLS-tekniikalla valmistetuissa kappaleissa ei ole vaihtelua lujuusominaisuuksissa. Myöskään kappaleiden valmistus suunta ei vaikuta ominaisuuksiin. Jos tuotteessa/kappaleessa on pinnanlaatutoleransseja, vaativat kappaleet pintakäsittelyn ennen kuin niitä voidaan käyttää (EOSa 2014).

SLS-tekniikan hyödyt:

- mekaanisesti kestävämmät kappaleet
- nopeampi verrattuna FDM-prosessiin
- kappaleitten orientoitumattomuus
- raaka-aine tehokkuus

SLS-tekniikan haitat:

- laitteet kalliita
- laitevalmistajia vähän
- materiaali valikoima pieni.

DMLS- Direct Metal Laser Sintering

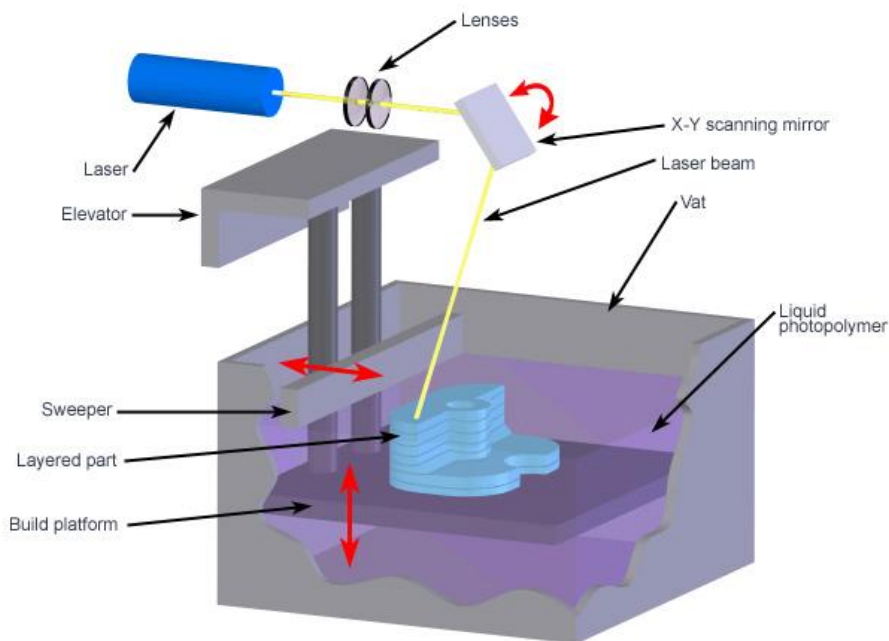
Metalleja ja keraameja käytettäessä puhutaan DMLS-tekniikasta. DMLS on lyhenne sanoista Direct Metal Laser Sintering. Prosessi on pääpiirteittäin sama kuin muovimateriaaleja työstettäessä, mutta laserin teho on suurempi ja työstökammiossa käytetään inerttiä kaasua. Vaikka koneiden toimintaperiaatteet ovat samanlaiset, eivät DMLS koneet sovellu muovien työstämiseen eivätkä muovimateriaaleille tarkoitetut SLS-koneet metalleille (EOSa 2014).

DMLS-tekniikka on kehittynein ja tutkituin valmistusmenetelmä ja sitä hyödynnetään jo laajasti. Esimerkiksi saksalainen monialayritys Siemens hyödyntää tekniikka varaosien valmistuksessa. Etuna on, ettei varaosia tarvitse varastoida, vaan ne voidaan valmistaa asiakkaan tarpeeseen. Toimintamalli tuo säästöjä varastointikustannuksissa (EOSa 2014).

2.5 SLA – Stereolitography aparatus (Stereolitografia)

SLA-tekniikassa lähtöaineet ovat UV-säteilyn vaikutuksesta kovettuvia nestemuodossa olevia hartseja, jotka kovetetaan haluttuun muotoon UV-laserin avulla. Hartsit voivat sisältää hienojakoista kertamuovi jauhetta. Laitteisto koostuu SLS-laitteiston tavoin peilillä suunnattavasta laserista, raaka-ainesäiliöstä ja männästä. Hartsisäiliössä oleva mäntä tuodaan kerrospaksuuden päähän nesteen pinnasta, ja UV-laser kohdistetaan geometrian mukaisille kovetettaville alueille. Alueiden kovetuttua laserin vaikutuksesta, lasketaan mäntää uuden kerroksen verran alaspäin, jotta uusi kerros nestemäistä hartsia pääsee valumaan kovetettujen alueiden päälle. Kappale alkaa rakentua kerros kerrokselta. Kun kappale on valmis, nostetaan se nesteestä, puhdistetaan, ja siirretään loppukovetukseen

uuniin, jossa kappale saavuttaa lopulliset mekaaniset ominaisuutensa. (3D-Systems 2014).



Copyright © 2008 CustomPartNet

Kuva 4. SLA-tekniikan toimintaperiaatteet. (Zare, 2014)

Tekniikkaa hyödynnetään etenkin näköismallien valmistuksessa sen helppouden ja nopeuden takia. Funktionaalisia kappaleita valmistettaessa hartsin sekaan sekoitetaan jauhemuodossa olevaa muovimateriaalia. Tällöin periaate on hyvin samanlainen kuin SLS-prosessissa erotuksena raaka-aineen olomuoto. Kappaleet kuitenkin vaativat uunituksen, ennen kuin ne saavuttavat lopulliset ominaisuutensa. Materiaalivalikoima on hyvin samanlainen kuin SLS-tekniikkaa hyödyntävissä tulostimissa (3D-Systems 2014).

SLA-tekniikan hyödyt

- halvat raaka-aineet
- palveluntarjoajia on jo saatavilla
- näköismallien tarkkuus

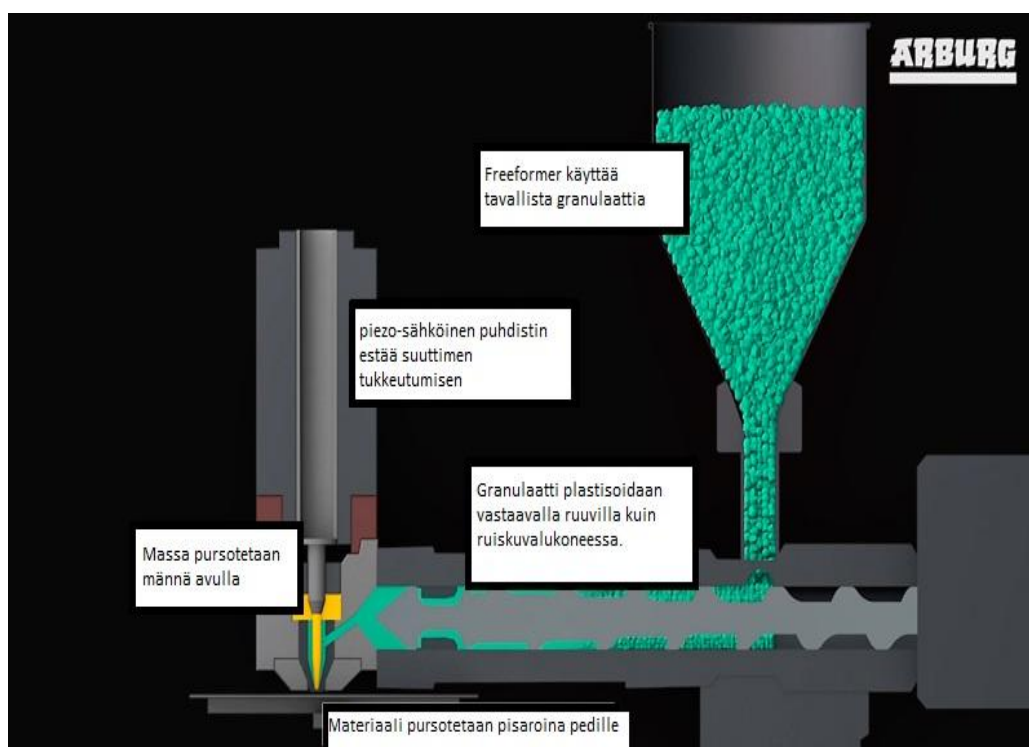
SLA-tekniikan haitat:

- materiaalit eivät sovellu mekaanisesti vaativiin sovelluksiin
- kappaleet vain näköismalleja

-kappaleet uunitettava

2.6 AKF- Arburg Kunststoff Freeforming

AKF on Arburg:n kehittä AM-tekniikka, joka perustuu ruiskuvaluprosessiin. Raaka-aineena prosessissa käytetään tavallista granulaattia, joka plasitsoidaan ruuviin avulla. Muovimassa ruiskutetaan pisaroina kappaleen kuljettimelle. Pisaroiden koko materiaalista riippuen on 0,15–0,25 mm ja rakennusnopeus on 5-21 cm³/h. Laitteessa on kaksi ruuvia ja suutinta, jotka pysyvät paikallaan prosessissa (Kuva 5.). Kappaletta liikutetaan suuttimien alla kuljettimen avulla. Laitteita on saatavana 5- ja 3- aksiaalisella kappaleen kuljettimella. Yleisesti koneista on pyritty rakentamaan helppokäyttöisiä ja mahdollisimman huoltovapaita. Valmistaja myös ilmoittaa, ettei koneen käyttöön vaadita juurikaan koulutusta (EM-Kone Oy, 2014).



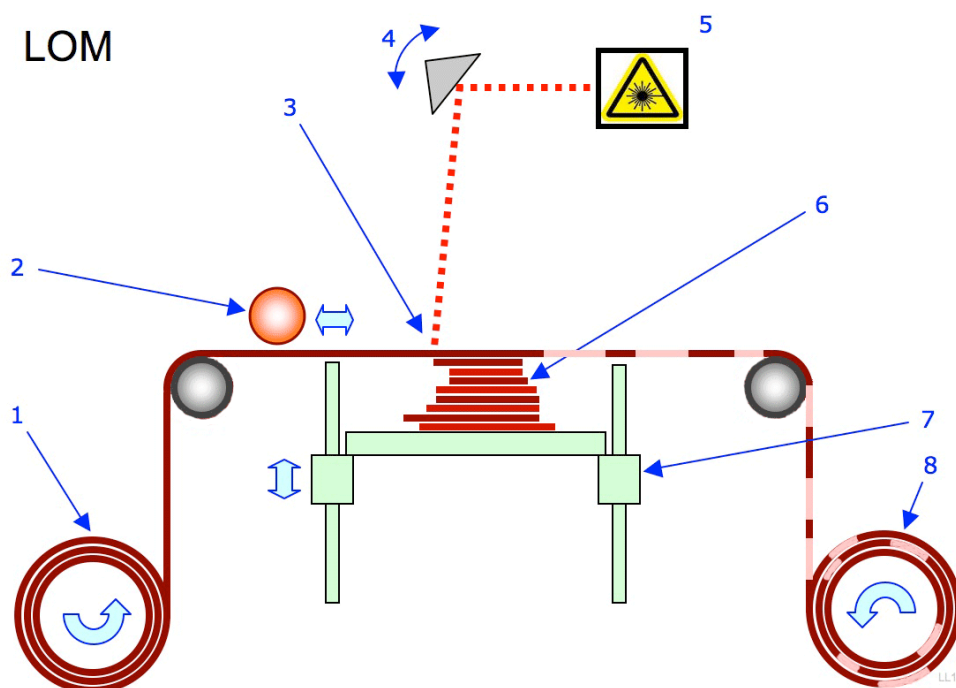
Kuva 5. AKF-Prosessin toimintakaavio (RT journal, 2014)

Kahden suuttimen tekniikka mahdollistaa monimutkaisten kappaleiden valmistamisen ja tuotteen rakentamisen esim. kovasta matriisimuovista ja pehmeästä elastomeeristä. (EM-Kone Oy, 2014).

2.7 Muita AM-tekniikoita

2.7.1 LOM – Laminated object manufacturing

LOM – tekniikassa kappale muodostetaan päällekkäin asetetuista paperi- tai muovikalvokerroksista. Materiaali on rullalla, joka kelataan työstöalueelle. Materiaalista ajetaan kerroksen muotoinen profiili, joko terällä tai laserilla ja kiinnitetään edelliseen kerrokseen lämmön ja paineen avulla.



Kuva 6. LOM – Tekniikan toimintaperiaate (Wikipedia, 2014)

1. Materiaalirulla
2. Lämmitetty tela
3. Laser-säde
4. Kohdistus prisma

5. Laser yksikkö
6. Laminoidut kerrokset
7. Liikkuva alusta
8. Käytetty materiaali

Tekniikkaa käytetään näköismallien valmistukseen, eikä se sovellu lopputuotteiden valmistukseen. Sillä ei myöskään voida valmistaa onttoja kappaleita. Tekniikkaa voidaan hyödyntää esimerkiksi arkkitehtuuristen näköismallien valmistuksessa.

2.7.2 Material Jetting

Tekniikan perusidea on hyvin samanlainen kuin mustesuihkutulostimessa. Materiaali suihkutetaan suuttimesta pinnalle kerros kerrokselta ja kovetetaan UV-valolla. Kerrokset muodostavat lopulta halutunlaisen kappaleen. Materiaali voi olla joko nestemäisessä tai geelimäisessä muodossa. Tekniikka on suhteellisen nopea tapa valmistaa pikamalleja. Tulostin valmistaja Hewlett-Packard on ilmoittanut aloittavansa Material Jetting tulostimien kehittämisen ja satsaavansa suuren summan tulostimien saamiseen kuluttaja käyttöön (HP 2014).

3 TULEVAISUUDEN NÄKYMIÄ

Lähitulevaisuudessa alalle odotetaan useita uusia toimijoita.

Viimeisimpänä laitevalmistukseen onkin lähtenyt paperitulostimistaan tunnettu HP, joka päätti investoida useita miljardeja Multi Jet Fusion laitteiden kehitykseen. Laitteet perustuvat Material Jetting tekniikkaan. Taustalla on SLS-tekniikan patenttien raukeaminen tammikuussa 2014. Juurikin patenttien raukeaminen tulee kasvattamaan laitekehittäjien määrää radikaalisti. HP:n ajatus on tuoda laite, jolla voidaan tulostaa nopeasti ja tarkasti niin kotona kuin yritysten tuotannossa (Lehto 2014).

Suurimmat odotukset kuitenkin kohdistuvat laitteiden monipuolisuuden kasvamiseen. Tällä hetkellä selkeä ongelma on materiaalien puute. Koneet ovat kehittyneet todella paljon ja soveltuvat jo osaksi teollista prosessia, materiaalit sen sijaan rajoittavat koneiden käyttöä monilla toimialoilla. Vaikka tämä työ käsittelee AM-tekniikoita muovien näkökulmasta, täytyy myös huomioida muut materiaalit joita hyödynnetään. Metallien työstäminen AM-tekniikoilla tulee yleistymään ja jopa mahdollistavan yritysten varastojen pienentämisen, koska varaosat voidaan valmistaa tilauksesta nopeasti ja edullisesti. Varaosia ei myöskään tarvitsisi kuljettaa asiakkaalle, vaan ne voitaisiin tulostaa paikallisen yhteistyökumppanin laitteilla.

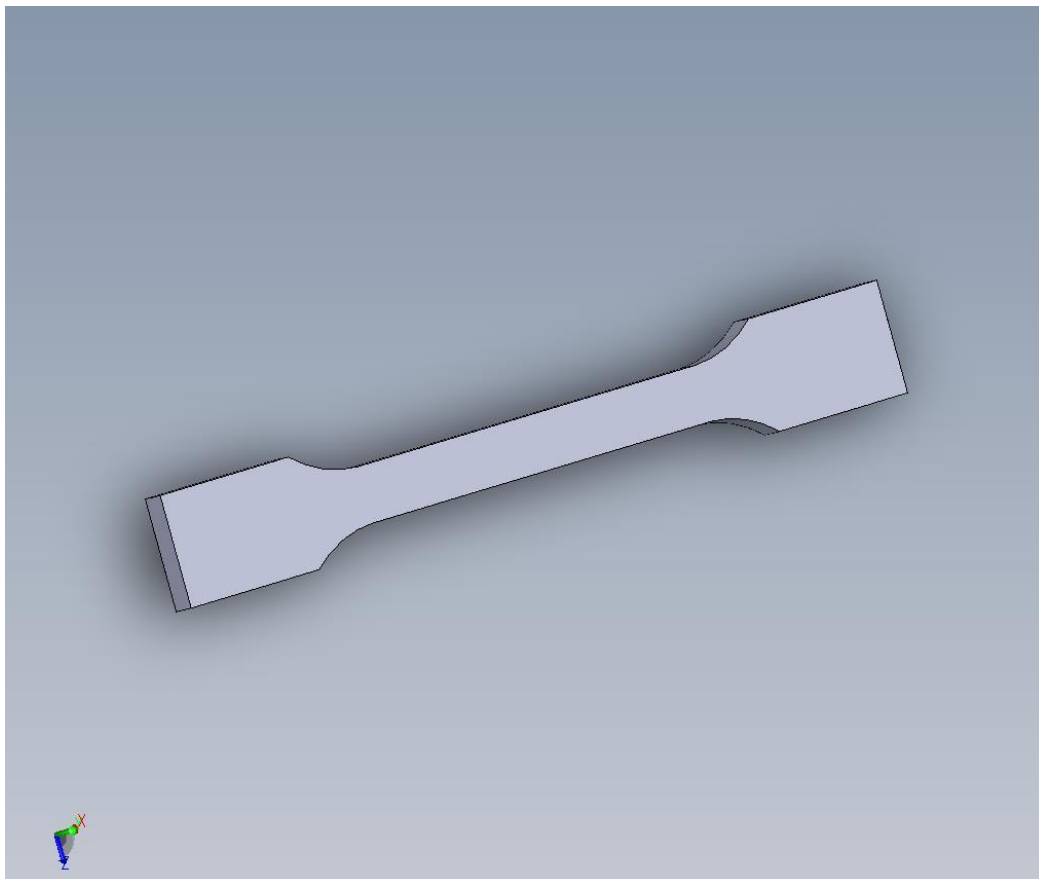
Suurimmat odotukset kohdistuvat kuitenkin lääketieteeseen. Materiaalien kehittyessä voidaan tulostusteknologioita hyödyntää implanttien valmistamiseen. Teoriassa jokaisessa leikkaussalissa olisi tulostin jolla voidaan valmistaa leikattavalle potilaalle vaikkapa uusi lonkkanivel 3D-mallista joka tehdään leikkauksen aikana. Edellä mainittua hyödynnetään jo hammaslääketieteessä; potilaan suusta tehdään 3D-malli, ja sen perusteella voidaan tulostaa keraameista tai metalleista hammasimplantti. AM-tekniikoita kehitetään myös elävän kudoksen tulostamiseen. Ajatuksena on tulostaa toimivia elimiä ihmisten tarpeisiin. Tämä ratkaisisi elinsiirto-ongelman, koska luovuttajia ei enää tarvittaisi.

4 TESTATTAVAT MATERIAALIT

Tässä työssä käytettävät materiaalit ovat suurimmaksi osaksi erikoismuoveja, joiden mekaaniset, kemialliset, sekä erikoisominaisuudet ovat muovimateriaalien parhaimmista.

Yhteistä testattaville materiaaleille on niiden käyttökohteet. Työssä tutkittavia materiaaleja käytetään yleisesti koneenrakennuksessa ja erikoissovelluksissa. Normaalisti näitä materiaaleja työstetään koneistamalla CNC-koneella. Levyistä tehtävät vetosauvat valmistetaan 3-akselisella työstökeskuksella.

Testauksessa on myös PA 6-materiaali, josta ei kuitenkaan tulosteta sauvoja. Materiaalin tarkoitus on toimia referenssimateriaalina, koska se on yksi yleisimmistä koneenrakennuksessa käytetyistä materiaaleista. Samalla tutkitaan PA 12:n eroja PA 6 materiaaliin verrattuna, voidaan todeta millaisiin sovelluksiin PA 12 soveltuu ja mahdollisia tilanteita, jossa AM-tekniikoita voidaan hyödyntää, perinteisen koneistamisen sijasta.



Kuva 7. Solidworksilla piirretty vetosauva.

Puolivalmisteet toimittaa Röchling Sustaplast GmbH. Tulostetut kappaleet valmistetaan Stratasys:in ja EOS:n koneilla, puolivalmisteita vastaavista materiaaleista.

4.1 PEEK – polyeetterieetteriketoni

PEEK eli polyeetterieetteriketoni on erikoismuoveihin kuuluva muovimateriaali, jonka mekaaniset, kemialliset ja termiset ominaisuudet ovat muovien parhaimmista. PEEK:in loistavista ominaisuuksista huolimatta sen käyttöä rajoittaa korkea hinta. PEEK:in käyttökohteita ovat eristeet, lentokoneiden osat, ja aseollisuuden sovellukset. PEEK:iä voidaan työstää perinteisillä lastuavan työstön menetelmillä, mutta se soveltuu myös ruiskuvalu- ja suulakepuristusprosesseihin (Vink 2015a).

Lyhyt listaus PEEK:in ominaisuuksista:

- Kimmomoduli: 4000 MPa
- Käyttölämpötila: -60..250 °C
- Pinnankovuus: 88 Shore D
- UL 94 -paloluokitus: V0

Lähde: (Sustaplast 2015).

Työssä käytetään kahta eri PEEK laatua: SUSTAPEEK ja EOS PEEK HP3. SUSTAPEEK suulakepuristettu PEEK puolivalmiste, josta koneistetaan ISO 527-2 standardin mukaisia vetosauvoja mekaanisten ominaisuuksien toteamiseksi.

EOS PEEK HP3 on VICTREX:n valmistama SLS-prosessiin soveltuva PEEK-laatu joka on lähtömuodossaan jauheena. Materiaalista valmistetaan SLS-menetelmällä vetosauvoja.

Materiaalien dataheetit ovat liitteissä 1 ja 2

4.2 PA 12 – Polyamidi 12

PA 12 on polyamideihin kuuluva muovimateriaali jolle on ominaista sitkeys. Muihin polyamideihin verrattuna se kuitenkin imee itseensä kaikista vähiten vettä. Heikkoutena muihin polyamideihin on PA 12:a korkea hinta. Materiaalin lujuusominaisuudet ovat heikommat kuin yleisimmällä PA 6 materiaalilla. Siksi PA 12 ei sovellukaan suoraan korvaamaan sitä mekaanista lujuutta vaativissa sovelluksissa. (Sustaplast 2015).

Lyhyt listaus PA 12:a ominaisuuksista:

- Kimmomoduli: 1800 MPa
- Käyttölämpötila: -50..80 °C
- Pinnankovuus: 78 Shore D
- UL 94 -paloluokitus: HB

Lähde: (Sustaplast 2015).

Työssä käytetään kahta eri PA 12 laatua: SUSTAMID 12 ja PA 220x. SUSTAMID 12 on suulakepuristettu puolivalmiste laatu, joka toimitetaan levynä.

PA 2200 on SLS-prosessiin soveltuva laatu joka on lähtömuodossaan jauheena. Materiaalista valmistetaan vetosauvoja SLS-menetelmällä.

Materiaalien dataheetit ovat liitteissä 3 ja 4

4.3 PEI – Polyeetteri-imidi

Polyeetteri-imidi on erikoismuoveihin kuuluva materiaali, jonka ominaisuudet ovat hyvin samankaltaiset kuin PEEK:illä. PEI ei kuitenkaan ole mekaanisesti ja termisesti yhtä kestävää. PEI:lle tunnusomaista on hyvät mekaaniset, kemialliset, ja termiset ominaisuudet. Levymateriaalina PEI on läpikuultava punaruskea materiaali, 3D-tulostettava PEI sen sijaan on väriltään hiekan värinen ja kiiltävä. Materiaalia käytetäänkin sovelluksissa jossa ei tarvita PEEK:in korkeaa lämpötilankestoa, tai PEEK:in mekaaniset ominaisuudet ovat ylimitoitettuja. Polyeeteri-imidin heikkoutena on loviherkkyys. (Sustaplast 2015).

Lyhyt listaus PEI:n ominaisuuksista:

-Kimmomoduli:	3100 MPa
-Käyttölämpötila:	-50..170 °C
-Pinnankovuus:	86 Shore D
-UL 94:	V0

Lähde: (Sustaplast 2015).

Työssä käytetään kahta eri PEI laatua: SUSTAPEI ja ULTEM 9085. ULTEM 9085 on Sabic Innovative Plastics:n valmistama FDM-prosessiin soveltuva laatu.

Materiaalien dataheetit ovat liitteissä 5 ja 6

4.4 ABS

ABS on yksi yleisimmistä materiaaleista 3D-tulostuksessa, ja sitä käytetään myös laajasti kotelointimateriaalina ja työstetään lämpömuovaamalla. ABS:lle ominaista on suuri iskutikeus ja pinnankiiltävyys, siksi sitä käytetäänkin henkilösuojaus materiaalina mm. suojakypärinä.

Työssä käytetään kahta eri ABS laatua: ABS M30 ja Athlone extrusions:in general purpose puolivalmiste-laatua. ABS M30 on Stratasys:n FDM-prosesille räätälöity yleislaatu.

Datasheet liitteessä 7.

4.5 PA 6 G

PA 6 on yleisin käytössä oleva polyamidi. Sen hyvinä puolina mainittakoon edullinen hinta, hyvä saatavuus, ja hyvät mekaaniset ominaisuudet. Materiaali soveltuu koneenrakentamiseen korkean pintakovuuden takia, ja sen takia sitä käytetäänkin useasti liukumateriaalina. PA 6 on yksi yleisimmistä koneenrakennuksessa käytettävistä teknisistä muoveista, ja siksi käytän sitä referenssi materiaalina PA 12 materiaalille.

Työssäkäyttettävä laatu PA 6G on valettu polyamidilaatu (Vink 2015b).

Lyhyt listaus PA 6 ominaisuuksista:

-Kimmomoduli:	3200 MPa
-Käyttölämpötila:	-20..85 °C
-Pinnankovuus:	82 Shore D
-UL 94 -paloluokitus:	HB
-Veden absorbio:	3,0 %

Lähde: (Sustaplast 2015).

Työssä käytetään SUSTAMID 6 – materiaalia, joka on Röchling Sustaplastin valettu PA 6 laatu.

Datasheet liitteessä 8.

5 TYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT 3D-TULOSTIMET

5.1 EOS – Electro Optic Systems GmbH

EOS – eli Electro Optic Systems GmbH on Saksalainen AM-laitteita valmistava yritys. Se on keskittynyt SLS-tekniikkaa hyödyntäviin laitteisiin, jotka käyttävät raaka-aineena niin muoveja kuin metalleja. Yritys on perustettu 1989, ja sen laitteita on käytetty kohta kaksi vuosikymmentä apuna suunnittelussa, ja erikoiskomponenttien valmistuksessa.

5.1.1 Formiga P 110

Formiga P 110 on SLS-tekniikkaa hyödyntävä kompakti 3D-tulostin. Laitevalmistaja kuvailee konetta hyväksi ensihankinnaksi ja hintalaatusuhteeltaan loistavaksi koneeksi.



Kuva 8. EOS Formiga P 110 (EOSb)

Koneelle soveltuvia materiaaleja ovat PA12:a peruslaatu ja tekninen laatu, polystyreeni, sekä lujitetut PA 12 laadut. Kappaleen maksimitat ovat:

200x 250x330 mm, ja kerrospaksuus 0.06-0.12 mm. Laitteen hinta on noin 200000 €

5.1.2 EOSINT P 800

EOSINT P 800 on järeä teollisuuskäyttöön suunniteltu SLS-tulostin. Se on suunniteltu erityisesti korkean sulamispisteen materiaaleille. Raaka-aineina kone käyttää samoja materiaaleja kuin Formiga P110, mutta sille on myös saatavilla alumiinilujitettu PA 12 -laatu sekä PEEK-materiaali. Kone on ensimmäinen erikoismuoveille kehitetty SLS-laite.



Kuva 9 EOSINT P 800 (EOSc)

EOSINT P 800-laitteella voidaan valmistaa huomattavasti suurempia kappaleita kuin Formiga P 110:llä. Kappaleen maksimitat ovat: 700x380x560 mm. tosin materiaalin kerrospaksuus on kiinteä 0.12 mm. Laitteessa on käytössä 2x50 W CO₂- Laser. Laitteen hinta on n. 900000 €.

5.2 Stratasys

Stratasys on amerikkalainen AM-laitevalmistaja, joka on keskittynyt FDM-laitteisiin. Yritys tarjoaa laajan kirjon erikokoisia tulostimia niin protoihin kuin lopputuotteisiin. Koska tulostimet hyödyntävät FDM-tekniikkaa, on tulostimille saatavissa laajin valikoima erilaisia materiaaleja, alkaen

perinteisestä tulostusmateriaalista ABS ja päättyen erikoismateriaaleihin, kuten amorfinen ja tavallinen PEI.

Fortus 400mc

Fortus 400mc on monipuolinen FDM-tekniikkaa hyödyntävä kone jolla voidaan valmistaa, malleja, prototyypppejä, ja lopputuotteitakin. Se tukee kahtatoista eri kestopuovia, mm. ABS, PC, PEI ja PPS/PPSU. Koneetta ei voida verrata suoraan EOS:n koneisiin sen erilaisen valmistustekniikan takia.



Kuva 10. Fortus 400mc (Stratasys, 2014b)

Koneella valmistettujen kappaleiden maksimitat ovat jopa 406x355x406 mm, ja kerrospaksuudet vaihtelevat materiaalin mukaan. Malli on jo saanut päivityksen: Fortus 450mc. Laitteen hinta on noin 200000 € ja Fortus 450mc:n noin 250000 €. Kuva 10. Fortus 400mc (Stratasys, 2014b)

6 TESTAUS

Tässä työssä materiaaleille suoritettiin kaksi eri testiä mekaanisten ominaisuuksien määrittelemiseksi sekä yksi testi termisten ominaisuuksien määrittämiseksi. Kokeiden tarkoitus oli tutkia AM-tekniikoilla valmistettujen vetosauvojen ominaisuuksia verrattuna koneistettuihin sauvoihin. Testien tarkoitus on kuvata olosuhteita, joille koneenrakennuksessa käytettävät muovimateriaalit altistuvat sekä selvittää mahdolliset eroavaisuudet termisissä ominaisuuksissa.

Kokeiden tuloksien on myös tarkoitus toimia referenssinä 3D-tulostimen hankinnan suunnittelussa. Jos AM-tekniikoilla valmistettujen kappaleiden mekaanisten ominaisuuksien huomataan olevan heikompia kuin koneistettujen, on tällä suuri vaikutus laitehankinnan kannattavuuteen.

6.1 Vetokoe

Vetokokeella määritellään materiaalin mekaanisia ominaisuuksia, kuten kimmomoduli, myötörajat sekä murtovenymä. Edellä mainittuja suureita tulkitsemalla voidaan määrittää materiaalien lujuusominaisuudet ja verrata niitä raaka-ainevalmistajien antamiin tietoihin, sekä AM-tekniikoilla valmistettujen koekappaleiden ominaisuuksia koneistamalla valmistettuihin kappaleisiin.



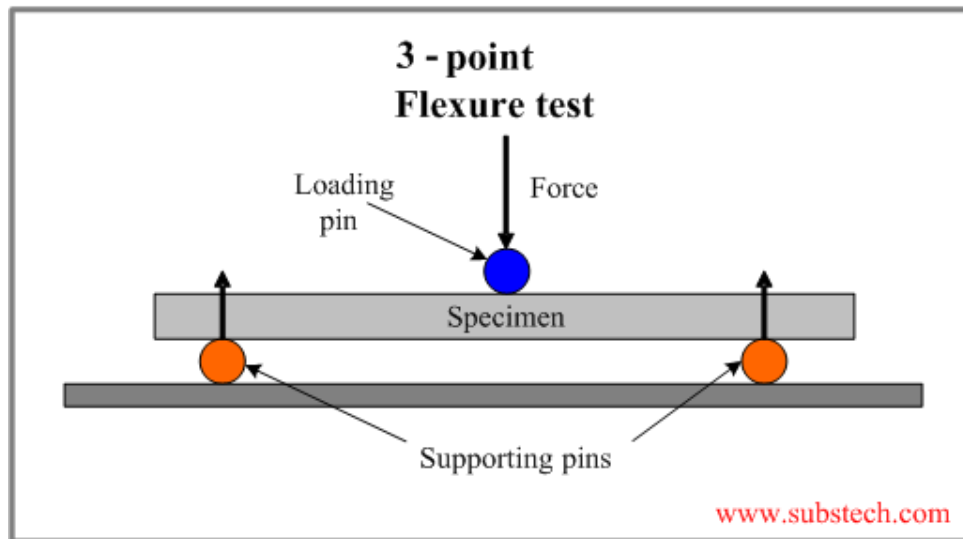
Kuva 11. Shimadzu vetokoelaitteisto. (Shimadzu 2014.)

Koeasetelmassa tutkittavasta materiaalista valmistetaan yleisvetosauvoja ISO 527-2 standardin mukaisesti (ISO 527, 2012). Sauva asetetaan laitteen leukojen väliin, siten että voima kohdistuu kohtisuorasti kappaleeseen. Jos kappale ei ole kohtisuorassa, syntyy kappaleeseen leikkaavaa kuormitusta, jonka seurauksena tulokset eivät ole luotettavia.

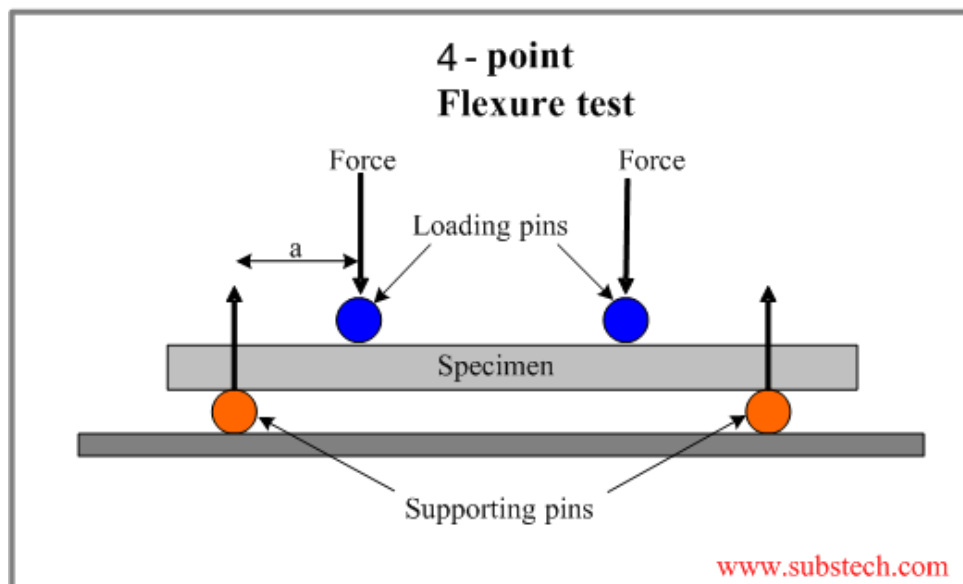
Vedon päätyttyä, eli kappaleen murruttua tai venymän raja-arvo ylityttyä, voidaan vetokoneeseen liitetyn tietokoneen näytöltä lukea tulokset.

6.2 Taivutuskoe

Taivutuskokeessa käytetään vetokonetta, johon on asetettu taivutukselle tarkoitetut rullamaiset tuet. Taivutus voidaan toteuttaa joko, kolmipistetaivutuksen (Kuvio 12) tai nelipistetaivutuksena (Kuvio 13)



Kuvio 12. Kolmipistetaivutuskoete (Kopeliovich D. 2012a)



Kuvio 13. Nelipistetaivutuskoete (Kopeliovich D. 2012b)

Kokeessa suositellaan käytettäväksi nelipistekuormitusta, jotta voima jakautuu tasaisesti testattavaan materiaaliin.

Sauvaa kuormitetaan tasaisella nopeudella, minkä seurauksena sauvaan syntyy yläpinnalle puristuskuormitus ja alapinnalle vetokuormitus. Lisäksi sauvaan syntyy leikkauskuormitus.

Testikappaleen mitat määräytyvät ISO 178 standardin mukaan. ja ovat 80 ± 2 mm x $10\pm 0,2$ mm x $4\pm 0,2$ mm. Testikappale voidaan katkaista ISO 527-2:n mukaisesta yleisvetosauvasta (ISO 178, 2010).

6.3 DSC – Differentiaali pyyhkäisykalorimetri

DSC eli differentiaalinen pyyhkäisykalorimetri on mittalaite joilla voidaan määrittää muovien termisiä ominaisuuksia. Laitteistolla saadaan selville, mitattavien materiaalien sulamispiste, lasisiirtymälämpötila (T_g), sekä, kidesulamispiste. Edellä mainituista pisteistä voidaan laskea materiaalin kiteisyysaste. Kiteisyys asteella on suuri merkitys materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Muovien kovuus ja jäykkyys kasvavat kiteysasteen noustessa. Testaukseen käytettiin TA Instrumentsin Q100 laitteistoa (Kuva 15). Testin tarkoituksena oli tutkia materiaalien käyttölämpötiloja sekä sulamispisteitä, jotka saadaan tulkitsemalla DSC-laitteen tuottamaa käyrää ja vertaamalla tuloksia raaka-ainevalmistajien ilmoittamiin arvoihin.



Kuva 15. TA Instruments Q100 DSC-laitteisto

Yksinkertaistetusti laitteisto koostuu näyte näytekupista, vertailukupista, lämmittimestä, diagnostiikkalaitteistosta, sekä tietokoneesta. Näyte asetetaan näytekuppiin, minkä jälkeen laitteisto kuumentaa/viilentää näytteen aloituslämpötilaan. Lämpötilan saavutettua laitteisto kuumentaa näytteen asetettuun lämpötilaan ja laite vertaa muutoksia tyhjiin vertailukuppiin. Jos halutaan tutkia kiteytymistä, materiaali viilennetään sulamispisteestä niin alhaiseen lämpötilaan, että kiteytyminen tapahtuu.

Lämpötilaskaalan säätäminen perustuu tietoon materiaalista tai oletukseen, mitä materiaali mahdollisesti voi olla. Laitteen kuumentaessa materiaalia tapahtuu siinä muodonmuutoksia, jotka ovat joko endo- tai eksotermisiä. Tutkittava materiaali siis sitoo tai vapauttaa energiaa, joka ilmenee kappaleeseen tulevan tai vapautuvan lämpömäärän muutoksina.

Kone muodostaa tietokoneelle asennetun ohjelmiston avulla graafisen kuvaajan lämpövirran muutoksista. Kuvaajasta saadaan selville ja

reaktioiden laatu sekä se; missä lämpötilassa reaktiot ovat tapahtuneet. Endotermiset reaktiot näkyvät piikkeinä alaspäin (esim. kiteiden sulaminen) ja eksotermiset reaktiot piikkeinä ylöspäin (esim. uudelleen kiteytyminen). Edellä mainitut tiedot kuvaajan muodosta perustuvat TA Q100- laitteen tietoihin ja voivat vaihdella laitevalmistajien ja mallien välillä.

7 TULOKSET

7.1 DSC – Differentiaali pyyhkäisykalorimetri

Koska koneistus ei aiheuta muutoksia materiaalien lämpötilan kestoon eikä tällä työllä ole suurempaa laadunvalvontaan liittyvää tarkoitusta, DSC-testausta ei suoritettu koneistetuille materiaaleille. Oletuksena on se että puolivalmiste- ja raaka-aineenvalmistajat pitävät huolen tuotteidensa laadun valvonnasta, eikä siksi ole tarkoituksenmukaista kyseenalaistaa ilmoitettuja tietoja. Poikkeuksena ovat kuitenkin PEEK-puolivalmisteet. Koska 3D-tulostettavan materiaalin ja puolivalmisteen sulamispisteet ja korkeimmat ilmoitetut käyttölämpötilat poikkesivat toisistaan myös SUSTAPEEK:ille DSC-testaus.

7.1.1 PEEK HP3

7.1.2 ULTEM 9085 (PEI)

7.1.3 PA 2201

7.1.4 ABS M30

7.2 Vetokoe

Vetokokeessa materiaaleille määritettiin vetolujuus sekä kimmomoduli. Koejärjestelyssä materiaalit vedettiin poikki tai vaihtoehtoisesti myötörajaan asti. Koe suoritettiin edellisessä kappaleessa kuvatulla vetokoneella.

Materiaalien kimmomoduli (E) on määritetty laskennallisesti kuvaajien kulmakertoimesta seuraavasti:

Esimerkki 1. (Kimmomodulin määrittäminen)

$$E = \sigma/\varepsilon, \text{ jossa } \varepsilon = \Delta l/l_0. \quad (1)$$

Jossa E on kimmomoduuli, σ on vetolujuus, ε on suhteellinen venymä, Δl on sauvan venymä, ja l_0 sauvan alkuperäinen pituus.

Luotettavaan kimmomodulin määrittämiseen tulisi käyttää venymämittari, joita ei kuitenkaan ollut saatavilla. Kimmomodulien arvot ovat siis suuntaa antavia.

7.2.1 PEEK

7.2.2 PEI

7.2.3 PA 12

7.2.4 ABS

7.3 Taivutuskoe

Taivutuskokeella määritetään materiaalin kestävyys kun se on tuettu molemmista päistä, ja sitä kuormitetaan keskeltä. Materiaalin kohdistunut voima aiheuttaa materiaalissa puristusta yläpinnalla ja vetoa alapinnalla. Materiaalien testauksessa käytettiin samaa konetta kuin vetokokeessa sillä poikkeuksella, että vetoa mittaava anturi oli vaihdettu puristusta mittaavaan. Testi suoritettiin 3-pisteen taivutuskokeena. Puolivalmisteiden teknisissä tiedoissa ei ole ilmoitettu taivutuslujuutta, joten arvoja ei voida verrata taulukkoarvoihin.

Taivutusmoduuli on laskettu seuraavasti.

Esimerkki 2. (Taivutusmoduulin määrittäminen)

$$E_{\text{bend}} = \frac{FL^3}{4wh^3d} \quad (2)$$

Jossa E_{bend} on taivutusmoduuli, F on maksimi voima, L on tukien väli, w on koekappaleen leveys, h on koekappaleen paksuus ja d on taipuma.

7.3.1 PA 6

7.3.2 PEEK

7.3.3 PEI

7.3.4 PA 12

7.3.5 ABS

7.3.6 PA 6

8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli selvittää 3D-tulostimien ja tulostusmateriaalien nykytila, jotta tietoa voidaan hyödyntää konekannan suunnittelussa. Suurimmat odotukset kohdistuivat 3D-tulostettuihin erikoismuoveihin PEEK:iin ja PEI:hin. Odotusarvo oli että 3D-tulostettujen materiaalien mekaaniset ominaisuudet olisivat lähellä koneistettujen verrokkikappaleiden arvoja. Oletusta tukivat myös työssä käytetyt tuotantoluokan koneet.

3D-tulostimien hyödyntämistä tuotannon sovelluksissa rajoittaa myös laitteiden hinnat. Kalleimmat 3D-tulostimet maksavat jopa 3-kertaa hyvälaatuisen CNC-keskuksen verran. Tulostimen hankintahinnan kattamiseksi tarvitaankin kysyntää, jota Suomen markkinoilla ei vielä ole.

Yleisesti ottaen sain tämän tutkimustyötä tehdessä tärkeää tietoa uuden sukupolven tuotantomenetelmistä. Työn tekemistä kuitenkin vaikeutti tiedon puute tutkittavista materiaaleista.

Vink Finland Oy kuitenkin mahdollisti tutkimuksessa käytettävän niin sanottuja ”High-end” materiaaleja. Yhdessä edellä mainitut yhdistettynä Euromold -messuihin loivat oppimiskokonaisuuden, joka on sekä ajankohtainen että mielenkiintoinen.

LÄHTEET

Columbus, L. 2014. Roundup Of 3D Printing Market Forecasts And Estimates, Forbes. [Viitattu 10.01.2014].

Saatavissa:<http://www.forbes.com/sites/louiscolumnbus/2014/08/09/roundup-of-3d-printing-market-forecasts-and-estimates-2014/>.

CustomPartNet, 2008 Fused Deposition Modeling (FDM). [viitattu 27.12.2014]

Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>

EOSa 2014. EOS messumateriaali Euromold messuilta. Electro Optical Systems 2014 [viitattu: 06.01.2015]

EOSb 2014. Formiga P110. Electro Optical Systems 2014 [viitattu: 06.01.2015]

Saatavissa:

http://www.eos.info/systems_solutions/plastic/systems_equipment/formiga_p_110

EOSc 2014. Formiga P800. Electro Optical Systems 2014 [viitattu: 06.01.2015]

Saatavissa:

http://www.eos.info/systems_solutions/plastic/systems_equipment/eosint_p_800

EM-Kone Oy, 2014, Hirn, M. 2014. *Toimitusjohtaja. EM-Kone Oy. Haastattelu 12/2014.*

Euromold 2014. Euromold-messut Frankfurt Am Main 25-26.11.2014.

HP, 2014. Frequently Asked Questions HP Multi Jet Fusion™ technology, Hewlett & Packard. [Viitattu: 2.1.2015]

Saatavissa:<http://h20195.www2.hp.com/v2/GetPDF.aspx/4AA5-5471ENW.pdf>

Hubcher, B.2014. Open for Business: 3-D Printer Creates First Object in Space on International Space Station. NASA. [viitattu 30.12.2014]. Saatavissa:

<http://www.nasa.gov/content/open-for-business-3-d-printer-creates-first-object-in-space-on-international-space-station/>

ISO 178. 2010. Plastics – Determination of flexural properties. Geneve: International Organization of Standardization.

ISO 527. 2012. Plastics – Determination of tensile properties Geneve: International Organization of Standardization.

Kopeliovich, D. 2012a. 3-point flexure. Substech 2012 [viitattu: 17.2.2015]
 saatavilla:http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics&cache=cache&media=3-point_flexure.png

Kopeliovich, D. 2012b. 4-point flexure. Substech 2012 [viitattu: 17.2.2015]
 saatavilla:http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics&cache=cache&media=4-point_flexure.png

Lehto, T. 2014 Tekniikka & Talous, HP iskee 3d-tulostukseen, 12.12.2014, Talentum

McLellan C. 2014. The history of 3d printing: A timeline. ZDNET. [viitattu 22.12.2014] Saatavissa: <http://www.zdnet.com/article/the-history-of-3d-printing-a-timeline/>

Organovo 2014 About Organovo. [viitattu 31.12.2014] Saatavissa: <http://www.organovo.com/company/about-organovo>

Shimadzu, 2014. Vetokone kuva. Shimadzu co. [viitattu 06.01.2015] Saatavissa: <http://www.shimadzu.com/an/industry/ceramicsmetalsmining/i114.html>

Stratasys 2014a Stratasys inc. messumateriaali Euromold messuilta. Stratasys Incorporated 2014 [viitattu: 06.01.2015]

3D-Systems 2014. 3D-Systems messumateriaali Euromold messuilta. 3D-Systems 2014 [viitattu: 07.01.2015]

Stratasys 2014b Fortus 400mc. Stratasys Inc. 2014. [viitattu 09.01.2015] Saatavissa: <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/fortus-360-400mc#content-slider-1>

Sustaplast, 2015. Röchling Sustaplast. Materiaalien tekniset tiedot. [viitattu 12.2.2015] Saatavissa: <http://www.roechling.com/en/high-performance-plastics/thermoplastics/materials.html>

Toft M. 2011. The effect of crystalline morphology on the glass transition and enthalpic relaxation in poly (ether-ether-ketone). Masters thesis, University of Birmingham. [viitattu 27.2.2015]
 saatavilla:<http://etheses.bham.ac.uk/3796/1/Toft12MRes.pdf>

Vink, 2015a. Vink Finland Oy. PEEK:in materiaali esite. [viitattu 12.2.2015] Saatavissa: <http://www.tuotteet.vink.fi/tuotteet/peek.html>

Vink, 2015b. Vink Finland Oy. PA:n materiaali esite. [viitattu 12.2.2015] Saatavissa: <http://www.tuotteet.vink.fi/tuotteet/pa.html>

Wikipedia, 2014. Laminated object manufacturing. Wikipedia. [viitattu 22.12.2014]

Saatavissa:http://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing#/media/File:Laminated_object_manufacturing.png

Zare, 2014. Zare Prototipi. Stereolitografia. [viitattu 27.12.2014] Saatavissa:
<http://www.zare.it/sites/all/themes/zare/img/lp-stereolitografia/stereolitografia-principio-funzionamento.jpg>

EOS PEEK HP3
PEEK EOS GmbH - Electro Optical Systems

Product Texts

Product Texts

EOS provides the world-first high-performance polymer for the laser-sintering process - EOS PEEK HP3. Belonging to the group of Polyaryletherketone (PAEK), this semi-crystalline, thermoplastic material was developed for the use on the new high-temperature system EOSINT P 800. The laser-sintered parts achieve a tensile strength up to 95 MPa and a Young's modulus up to 4400 MPa. These values are on an up to 100 percent higher level than the so far market dominating materials PA 12 and PA 11. The continuous use temperature ranges within 180 °C (mechanical dynamic), 240 °C (mechanical static) and 260 °C (electrical) depending on the field of application which could not be reached so far. EOS PEEK HP3 is characterized by an outstanding combination of properties like

- excellent high temperature performance
- high wear resistance
- outstanding chemical resistance
- best fire, smoke and toxicity performance
- good hydrolysis resistance
- potential biocompatibility
- sterilisability

Due to this exceptional combination of properties EOS PEEK HP3 is optimally suited for highest demanding applications e.g. in medicine, aerospace industry or motorsports. In medical applications the outstanding properties make this material an ideal replacement for stainless steel and titanium. And in aerospace and in motorsports where light weight and fire resistance are of largest importance, EOS PEEK HP3 has developed to an adequate metal replacement.

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile Modulus	4250	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Strength	90	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	2.8	%	ISO 527-1/-2

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	372	°C	ISO 11357-1/-3
Temp. of deflection under load (1.80 MPa)	165	°C	ISO 75-1/-2

Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density (lasersintered)	1310	kg/m	EOS Method

Characteristics

Processing

Laser Sintering, Rapid Prototyping

Chemical Resistance

General Chemical Resistance, Hydrolytically Stable

Special Characteristics

Heat stabilized or stable to heat

Technical data sheet



SUSTAPEEK

Product characteristics

- Excellent dimensional stability
- High flame retardance and self-extinguishing
- Very low smoke density

Typical fields of application

- Medical technology
- Aerospace engineering
- Electrical industry

	Test method	Unit	Value
General properties			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g/cm ³	1,31
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	0,2
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		V0 / V0
Mechanical properties			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	110
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	20
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	4000
Notched impact strength (charpy)	DIN EN ISO 179	kJ/m ²	-
Ball indentation hardness	DIN EN ISO 2039-1	MPa	230
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	88
Thermal properties			
Melting temperature	ISO 11357-3	°C	343
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,25
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,34
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	50
Service temperature, long term	Average	°C	-60 ... 250
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	310
Heat deflection temperature	DIN EN ISO 75, method A	°C	152
Electrical properties			
Dielectric constant	IEC 60250		3,2
Dielectric dissipation factor (50Hz)	IEC 60250		0,001
Volume resistivity	IEC 60093	Ω *cm	4,9 * 10 ¹⁶
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	10 ¹⁸
Comparative tracking index	IEC 60112		-
Dielectric strength	IEC 60243	kV/mm	20

The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stress for a few hours. The long-term maximum application temperature is based on the thermal ageing of plastics by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5.000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer is affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected. The minimum application temperature is basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to a minimum degree of impact stress. The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry material. With other colours (in particular black) or saturated material, there may be clear differences in the electrical properties. The data stated above are average values ascertained by statistical tests on a regular basis. They are in accordance with DIN EN 15860. They serve as information about our products and are presented as a guide to choose from our range of materials. This, however, does not include an assurance of specific properties or the suitability for particular application purposes that are legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallization (e.g. nucleating by pigments), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values. Special construction details or further material specifications on request.

PA 2201
 PA12

EOS GmbH - Electro Optical Systems

Product Texts**Product Texts**

PA 2201, a whitish, a bit more translucent polyamide 12 powder, is in compliance with FDA, 21 CFR, §177.1500 9(b) except for alcoholic foodstuff. Apart from that PA 2201 and PA 2200 have identical material properties. Laser-sintered parts made from PA 2201 possess excellent material properties:

- high strength and stiffness
- good chemical resistance
- excellent long-term constant behaviour
- high selectivity and detail resolution
- various finishing possibilities (e.g. metallisation, stove enamelling, vibratory grinding, tub colouring, bonding, powder coating, flocking)

Typical applications of the material are fully functional plastic parts of highest quality. Due to the excellent mechanical properties the material is often used to substitute typical injection moulding plastics. The biocompatibility allows its use e.g. for prostheses, the high abrasion resistance allows e.g. the realisation of movable part connections.

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Izod Impact notched (23°C)	4.4	kJ/m	ISO 180/1A
Izod Impact unnotched (23°C)	33	kJ/m	ISO 180/1U
Shore D hardness (15s)	75	-	ISO 868
Ball indentation hardness	78	MPa	ISO 2039-1

3D Data	Value	Unit	Test Standard
---------	-------	------	---------------

The properties of parts manufactured using additive manufacturing technology (e.g. laser sintering, stereolithography, Fused Deposition Modelling, 3D printing) are, due to their layer-by-layer production, to some extent direction dependent. This has to be considered when designing the part and defining the build orientation.

Tensile Modulus (X Direction)	1700	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Modulus (Y Direction)	1700	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Strength (X Direction)	48	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Strength (Y Direction)	48	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break (X Direction)	15	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)	53	kJ/m	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)	4.8	kJ/m	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)	1500	MPa	ISO 178
Flexural Strength (X Direction)	58	MPa	ISO 178

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Vicat softening temperature (50°C/h 10N)	181	°C	ISO 306
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)	163	°C	ISO 306

Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density (lasersintered)	930	kg/m	EOS Method
Powder colour (ac. to safety data sheet)	White	-	-

Characteristics

Technical data sheet



SUSTAMID® 12

Product characteristics

- Low moisture absorption
- High stress crack resistance
- High impact strength

Typical fields of application

- Mechanical engineering
- Vehicle construction
- Textile industry

	Test method	Unit	Value
General properties			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g/cm ³	1,02
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	0,8
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		HB / HB
Mechanical properties			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	50
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	200
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	1800
Notched impact strength (charpy)	DIN EN ISO 179	kJ/m ²	20,0
Ball indentation hardness	DIN EN ISO 2039-1	MPa	100
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	78
Thermal properties			
Melting temperature	ISO 11357-3	°C	178
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,30
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,7
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	100
Service temperature, long term	Average	°C	-50 ... 80
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	140
Heat deflection temperature	DIN EN ISO 75, method A	°C	50
Electrical properties			
Dielectric constant	IEC 60250		3,8
Dielectric dissipation factor (50Hz)	IEC 60250		0,04
Volume resistivity	IEC 60093	Ω *cm	10 ¹⁵
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	10 ¹³
Comparative tracking index	IEC 60112		600
Dielectric strength	IEC 60243	kV/mm	26

The following applies to Polyamides: Under the influence of moisture absorption, the mechanical properties change. The material becomes tougher and more resistant to impact, the modulus of elasticity declines. Depending on the environmental atmosphere, the temperature and the period of moisture absorption, only the surface layer is affected by alterations of property to a certain depth. On thick-walled parts, the center area remains unaffected. The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stress for a few hours. The long-term maximum application temperature is based on the thermal ageing of plastics by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5.000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer is affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected. The minimum application temperature is basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to a minimum degree of impact stress. The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry material. With other colours (in particular black) or saturated material, there may be clear differences in the electrical properties. The data stated above are average values ascertained by statistical tests on a regular basis. They are in accordance with DIN EN 15863. They serve as information about our products and are presented as a guide to choose from our range of materials. This, however, does not include an assurance of specific properties or the suitability for particular application purposes that are legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallization (e.g. nucleating by pigments), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values.

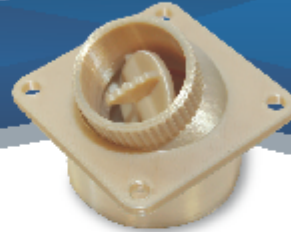
DIN: 0011/2014

Röchling Sustaplast SE & Co. KG
Sustaplast-Str. 1 · D-56112 Lahnstein/Germany · Tel. +49 2621 693-0 · Fax +49 2621 693-170 · info@sustaplast.de · www.roechling.com



ULTEM™ 9085 Resin

Production-Grade Thermoplastic
for Fortus 3D Production Systems



ULTEM™ 9085 resin is a flame-retardant high-performance thermoplastic for digital manufacturing and rapid prototyping. It is ideal for the transportation industry due to its high strength-to-weight ratio and its FST (flame, smoke and toxicity) rating. This unique material's preexisting certifications make it an excellent choice for the commercial transportation industry – especially aerospace, marine and ground vehicles. Combined with a Fortus® 3D Production System, ULTEM 9085 allows design and manufacturing engineers to produce fully functional parts that are ideal for advanced functional prototypes or end use without the cost or lead time of traditional tooling.

Mechanical Properties ¹	Test Method	English	Metric
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	10,400 psi	71.6 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	322,000 psi	2,200 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6%	6%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	16,700 psi	115.1 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	362,600 psi	2,500 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.0 ft-lb ft/in	106 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	11.5 ft-lb ft/in	613.8 J/m
Compression Strength	ASTM D695	15,200 psi	104 MPa
Compression Modulus	ASTM D732	280,000 psi	1,930 MPa
Shear Strength (0.25" thick coupon)	ASTM D732	8,300 psi	57 MPa

Thermal Properties ²	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	-----	-----	-----
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	307 °F	153°C
Glass Transition Temperature (T _g)	DSC (SSYS)	367°F	186°C
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E228	3.67 ⁻⁰⁶ in/(in-F°)	65.27 µm/(m-C°)
Melting Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³

Electrical Properties ⁴	Test Method	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	4.9 ¹⁶ - 8.2 ¹⁶ ohms-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	3.2 - 3.0
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0027 - .0026
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	290 - 110 V/mil

Technical data sheet



SUSTAPEI

Product characteristics

- High rigidity also at high temperatures
- Very low smoke emissions
- High resistance to high energy radiation

Typical fields of application

- Electrical and electronic industries
- Medical technology
- Aerospace engineering

	Test method	Unit	Value
General properties			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g/cm ³	1,27
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	0,5
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		V0 / V0
Mechanical properties			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	110
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	12
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	3100
Notched impact strength (charpy)	DIN EN ISO 179	kJ/m ²	4,0
Ball indentation hardness	DIN EN ISO 2039-1	MPa	220
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	86
Thermal properties			
Melting temperature	ISO 11357-3	°C	-
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,24
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,1
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	45
Service temperature, long term	Average	°C	-50 ... 170
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	210
Heat deflection temperature	DIN EN ISO 75, method A	°C	200
Electrical properties			
Dielectric constant	IEC 60250		3,2
Dielectric dissipation factor (50Hz)	IEC 60250		0,0015
Volume resistivity	IEC 60093	Ω *cm	10 ¹⁵
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	10 ¹⁵
Comparative tracking index	IEC 60112		150
Dielectric strength	IEC 60243	kV/mm	30

The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stress for a few hours. The long-term maximum application temperature is based on the thermal ageing of plastics by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5.000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer is affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected. The minimum application temperature is basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to a minimum degree of impact stress. The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry material. With other colours (in particular black) or saturated material, there may be clear differences in the electrical properties. The data stated above are average values ascertained by statistical tests on a regular basis. They are in accordance with DIN EN 15860. They serve as information about our products and are presented as a guide to choose from our range of materials. This, however, does not include an assurance of specific properties or the suitability for particular application purposes that are legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallization (e.g. nucleating by pigments), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values.

ABS-M30

Production-Grade Thermoplastic for
Fortus 3D Production Systems



ABS-M30™ is up to 25 to 70 percent stronger than standard ABS and is an ideal material for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools and end-use-parts. ABS-M30 has greater tensile, impact and flexural strength than standard ABS. Layer bonding is significantly stronger than that of standard ABS, for a more durable part. This results in more realistic functional tests and higher quality parts for end use. ABS-M30 parts are stronger, smoother and have better feature detail.

Mechanical Properties ¹	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	3,750 psi	31 MPa	26 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,650 psi	4,050 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	310,000 psi	2,230 MPa	2,180 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7%	2%	7%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	1%	2%	1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	7,000 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	250,000 psi	2,060 MPa	1,760 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3.5%	4%	3.5%

Mechanical Properties	Test Method	English	Metric
		XZ Axis	XZ Axis
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.4 ft-lb/in	128 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.6 ft-lb/in	300 J/m

Thermal Properties ¹	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 68 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	98°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (T _g)	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.90 ⁻⁰⁵ in/in/°F	8.82 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.70 ⁻⁰⁵ in/in/°F	8.46 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable ²	Not Applicable ²

Technical data sheet



SUSTAMID® 6

Product characteristics

- High impact strength
- Excellent noise and vibration absorption
- Excellent sliding properties

Typical fields of application

- Mechanical engineering
- Vehicle construction
- Food processing industry

	Test method	Unit	Value
General properties			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g/cm ³	1,14
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	3,0
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		HB / HB
Mechanical properties			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	80
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	≥50
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	3200
Notched impact strength (charpy)	DIN EN ISO 179	kJ/m ²	≥3,0
Ball indentation hardness	DIN EN ISO 2039-1	MPa	170
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	82
Thermal properties			
Melting temperature	ISO 11357-3	°C	220
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,23
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,7
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	90
Service temperature, long term	Average	°C	-40 ... 85
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	160
Heat deflection temperature	DIN EN ISO 75, method A	°C	75
Electrical properties			
Dielectric constant	IEC 60250		3,9
Dielectric dissipation factor (50Hz)	IEC 60250		0,02
Volume resistivity	IEC 60093	Ω *cm	10 ¹⁵
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	10 ¹³
Comparative tracking index	IEC 60112		600
Dielectric strength	IEC 60243	kV/mm	20

The following applies to Polyamides: Under the influence of moisture absorption, the mechanical properties change. The material becomes tougher and more resistant to impact, the modulus of elasticity declines. Depending on the environmental atmosphere, the temperature and the period of moisture absorption, only the surface layer is affected by alterations of property to a certain depth. On thick-walled parts, the center area remains unaffected. The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stress for a few hours. The long-term maximum application temperature is based on the thermal ageing of plastics by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5.000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer is affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected. The minimum application temperature is basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to a minimum degree of impact stress. The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry material. With other colours (in particular black) or saturated material, there may be clear differences in the electrical properties. The data stated above are average values ascertained by statistical tests on a regular basis. They are in accordance with DIN EN 15860. They serve as information about our products and are presented as a guide to choose from our range of materials. This, however, does not include an assurance of specific properties or the suitability for particular application purposes that are legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallization (e.g. nucleating by pigments), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values.

Date: 04/11/2014

