

Mikko Nykänen, Eetu Huttunen, Ilkka Vanttaja, Lotta Pirinen, Kai Möller ja Juha
Lipponen

AMBIO-ryhmähanke/AMBIO Laiteprojekti – Lisäävän valmistuksen teknologioilla kilpailukykyä alueelliselle biotalous- ja teknologiaklusterille

Hankekoodit: A80284 & A80283 / A80287

Loppuraportti



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**

**KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
SAVONLINNA 2024**

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO.....	4
2 UUSIEN TUTKIMUSALUSTOJEN RAKENTAMINEN	6
2.1 Pieni teollinen ruiskuvalukone 3D-tulostettaville muovimuoteille	6
2.2 Pöytämallinen granulaattien 3D-tulostin materiaalitesteihin.....	7
2.3 Iso 3D-tulostin teollisen puurakentamisen testauslaboratorioon	8
2.4 Suunnitteluohjelmistot.....	11
3 TOIMENPITEET JA TULOKSET TYÖPAKETEISSA.....	12
3.1 TP1: Materiaalin kehitystyö sekä suurten kappaleiden tulostus.....	12
3.1.1 Materiaalin kehitystyö	12
3.1.2 Suurten kappaleiden tulostus	16
3.2 TP2. Sandwich-rakenteen 3D-tulostusavusteinen valmistus (Aalto).....	18
3.2.1 3D-tulostuskokeet Aalto-yliopistossa	18
3.2.2 3D-tulostusgeometrian rakenteellinen optimointi	19
3.2.3 Vanerilevyn korvaaminen selluloosapohjaisella komposiitilla	20
3.2.4 3D-tulostusmateriaalin optisten ominaisuuksien parantaminen...23	
3.2.5 Kennolevyjen ja mallituolin valmistus	25
3.3 TP3. Prototuotannosta sarjatuotantoon	27
3.3.1 Ylivalukokeilu.....	29
3.4 TP4. Luontoa jäljittelevät ja muiden optimaaliset rakenteet	30
3.5 TP5. Erikoismateriaalit.....	31
3.5.1 Erikoismateriaalien testaukset Mikpoliksessa.....	32
3.5.2 Veto-, taivutus- ja iskukokeet.....	33
3.5.3 Puristuslujuus	33



3.5.4 Pinnankarheusmittaukset	34
3.5.5 Sulamislämpötila-alueen määrittäminen (DSC)	35
3.5.6 Dynamismekaaninen-termoanalyysi (DMA).....	35
3.5.7 MicroCT	35
3.6 TP6. Demonstraatiot eli esimerkkitapaukset.....	35
3.6.1 Lankarakosihti (Andritz)	35
3.6.2 Kemikaalisuutin (Wetend).....	36
3.6.3 Lavastekorut (Oopperajuhlat)	39
3.6.4 Stanssaustyökalu (Riitek)	41
3.6.5 Puomimikkin mikkipään kotelon osat (Savox)	42
3.7 TP7. Projektin hoito ja tiedottaminen	46
4 Yhteenveto	50
LÄHTEET	51
LYHENNE- TERMI LUETTELO.....	52
LIITE 1 - Materiaalitestausraportti.....	55



**Euroopan unionin
osarahoittama**



1 JOHDANTO

Ainetta lisäävän valmistuksen teknologiat kehittyvät ja ottavat sijaansa osana valmistavaa teollisuutta. Toisaalta myös erilaiset bio- ja kierrätysmateriaalit yleistyvät ja niiden käyttöä pyritään lisäämään korvaavana materiaalina muoveille ja metalleille erilaisissa tuotteissa. Xamk on omalta osaltaan edistänyt tätä murrosta jo aiemmin toteutettujen lisäävän valmistuksen hankkeiden avulla sekä nyt myös AMBIO ryhmähankkeen ja AMBIO laitehankkeen puitteissa. Molemmissa hankkeissa on päärahoittajana Etelä-Savon maakuntaliitto ja ne ovat rahoitettu EAKR rahoituksella Innovatiivinen Suomi toimintalinjasta. Ryhmähankkeessa on mukana myös Aalto yliopisto. Ryhmähankkeen rahoituksessa on mukana myös useita paikallisia yrityksiä ja Xamk. Laitehanketta on tukemassa rahoitusosuudella myös Savonlinnan kaupunki ja Xamk.

AMBIO-hankepari luo jatkumoa Xamkilla AMAP -hankeparin puitteissa aloitetun 3D-tulostuksen PILOT-tutkimus- ja kehitysympäristön kehitykselle. PILOT-ympäristön kehityksessä on huomioitu erityisesti alueellisten teknologiaklusterin yritysten tarpeet ja näin ollen saatu aikaan kattava tutkimus- ja testausympäristö alueellisen TKI-toiminnan tueksi. Tässä raportissa tarkastellaan AMBIO -laitehankkeen aikana syntyneitä PILOT-ympäristöjä erityisesti suuren mittakaavan 3D -tulostuksen ja biomateriaalitulostuksen ympärillä, sekä toteutettua prototuotannosta sarjatuotantoon siirtymä vaihetta tukevaa ruiskuvalun ja 3D-tulostuksen parhaat puolet yhdistävää PILOT-ympäristöä.

Raportissa tutustutaan tarkemmin PILOT-ympäristöjen käyttöön hankittuihin laitteisiin, sekä AMBIO -hankkeen työpakettien mukaisiin tutkimus- ja kehitystoimiin. Työpaketissa 1 perehdytään hankkeessa tehtyihin bio- ja kierrätysmuovien 3D-tulostus- ja ruiskuvalukokeisiin sekä suunniteltuihin ympäristön kannalta entistä parempien materiaalien kehityslinjoihin. Työpaketti 2 on Aalto-yliopiston toteuttama, ja siinä tutkimuslinjana on entistä ekologisempi huonekaluteollisuudessa hyödynnettävän



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

kennolevyn kehitystyö. Työpaketti 3 tutkii prototuotannosta sarjatuotantoon siirtymävaiheen tehostamista ruiskuvalun ja 3D-tulostuksen yhteisvoimin. Neljännessä työpaketissa tutkitaan luonnossa esiintyvien rakenteiden hyödyntämistä osana optimaalisia rakenneratkaisuja. Työpaketissa 5 tarkastellaan 3D-tulostuksessa hyödynnettäviä erikoismateriaaleja sekä testataan niiden ominaisuuksia laboratorioympäristössä. Työpaketissa 6 perehdytään erittäin mielenkiintoisiin 3D-tulostukseen, skannaukseen, mallinnukseen ja ruiskuvaluun liittyvään yritystutkimus-case-tapauksiin.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

2 UUSIEN TUTKIMUSALUSTOJEN RAKENTAMINEN

AMBIO-Laiteprojektissa täydennettiin aikaisemmassa AMAP-hankekokonaisuudessa Elektroniikan 3K-tehtaalle rakennettua 3D-tulostuksen pilotointiympäristöä. Laitevalinnat tehtiin tutkimussuunnitelman tarpeiden sekä aikaisemmasta laitteistosta saatujen käyttökokemusten perusteella. 3K-tehtaalle hankittiin pieni ruiskuvalukone 3D-tulostettujen muottien tutkimusta varten, sekä pienehkö granulaattitulostin materiaalikokeita ja pieniä koesarjoja varten. Hankittu suuren mittakaavan 3D-tulostin sijoitettiin uuteen Teollisen puurakentamisen laboratorioon Lypsyniemeen.

2.1 Pieni teollinen ruiskuvalukone 3D-tulostettaville muovimuoteille

Elektroniikan 3K-tehtaalle Savonlinnaan hankittiin ruiskuvalukone, joka kykenee käsittelemään lähes kaikkia kestopuovimateriaaleja ja soveltuu myös kaapeleiden ylivaluun. Hankintaa edeltävässä kilpailutuksessa edellytettiin lisäksi, että tarjottavaan varusteluun tulee sisältyä sekä ruiskutusyksikkö että muotin kiinnitysyksikkö tarvittavine osineen, lisävarusteineen ja ohjelmistoineen. Kilpailutuskriteereinä pidettiin hintaa (20 %), toimitusaikaa (25 %), takuu-aikaa (15 %), injektio-tilavuutta (25 %) sekä laitteen vertikaalisuutta (15 %).

Kilpailutuksen tuloksena valituksi tuli Babyplast 6/10VP pystymallinen ruiskuvalukone:

- sulkuvoima 62 kN.
- vakiomännän tilavuus 9,0 cm³ ja
- ruiskutus-paine 1340 bar.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto



Kuva 1. Ruiskuvalukone Babyplast 6/10VP Elektroniiikan 3K-tehtaalla (Kuva: Mikko Nykänen).

2.2 Pöytämallinen granulaattien 3D-tulostin materiaalitesteihin

Lähdettäessä hankkimaan uutta pöytämallista granulaattien 3D-tulostinta materiaalitesteihin Elektroniiikan 3K-tehtaalle peruslähtökohtana oli, että koneen on kyettävä käsittelemään kaikkia kesto muovimateriaaleja pellettimuodossa tai rakeina. Tulostinta käytetään sekä materiaalitutkimustehtävissä että piensarjojen testituotannossa. Seostamattomien polymeerien lisäksi laitteen tulisi pystyä 3D-tulostamaan kierrätysmuovia ja erityisesti puukuidulla vahvistettuja polymeerejä.

Varusteluun edellytettiin kuuluvaksi kaksi erillistä pellettien tulostuspäätä tarvittavine osineen, lisävarusteineen ja ohjelmistoineen sekä kaikki saatavilla olevat suutinkoot. Kilpailutuskriteereinä pidettiin hintaa (25 %), toimitusaikaa (20 %), takuu-aikaa (10 %), tulostus-alusta pinta-alaa (10 %), tulostuskorkeuden maksimiarvoa (15 %), tulostuspään



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

maksimilämpötilaa (10 %), tulostusalustan maksimilämpötilaa (5 %) sekä mahdollisuutta vaihtaa toinen granulaattien tulostuspää filamenttien tulostuspäähän tarvittaessa (5 %).

Valituksi tuli TUMAKER 3D BigFoot Pro 350 DUAL (Pellet + Pellet), jonka

- tulostustilavuus on 480 mm x 470 mm x 350 mm,
- korkein tulostuspään lämpötila 350 °C ja
- korkein tulostusalustan lämpötila 120 °C.



Kuva 2. Pöytämallinen TUMAKER 3D BigFoot Pro 350 DUAL 3D-tulostin (Kuva Mari Rasku).

2.3 Iso 3D-tulostin teollisen puurakentamisen testauslaboratorioon

Suuren mittakaavan 3D-tulostimelta vaadittiin hankintavaiheessa sitä, että sen on kyettävä käsittelemään kaikkia yleisimpiä kestopuovimateriaaleja pellettimuodossa tai rakeina. Laitteita tulotisiin käyttämään sekä materiaalitutkimustehtävissä että piensarjojen testituotannossa. Laitteen tulisi pystyä 3D-tulostamaan ns. neitseellisten polymeerien lisäksi kierrätysmuovia ja polymeerejä, jotka on vahvistettu puukuidulla tai muilla 3D-tulostukseen kehitetyillä komposiiteilla. Eduksi hankintavaiheessa katsottiin myös se, että laitteistolla olisi mahdollista tulostaa 45° asteen kulmassa sekä mahdollisuus käyttää jyrsinpäätä samassa laitteistossa 3D-tulostetun kappaleen jälkikäsittelyyn ja viimeistelyyn.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Laitteelle asetettiin lukuisia ehdottomia vaatimuksia:

- järjestelmän tulee olla portaali- tai portaalipohjainen ratkaisu,
- tulostustilavuuden tulee olla minimissään 1.2 m x 1.2 m x 1 m,
- extruuderyksikössä tulee olla vähintään kolme kontrolloitavissa olevaa lämpötilavyöhykettä
- tulostusalustaa voidaan lämmittää vähintään 120 °C:een,
- tulostuspään tulee yltää vähintään 350 °C:een ja
- tulostusnopeus materiaalivirtauksella mitattuna on vähintään 4,5 kg/h.



Kuva 3. Super Discovery Workstation Teollisen puurakentamisen aboratoriossa Xamkilla Savonlinnassa (Kuva: Ilkka Vanttaja).



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Ison 3D-tulostimen kilpailutettu toimittaja oli CNC Barcenas Espanjasta. 3D-tulostimen Super Discovery Workstation pääominaisuudet ovat

- tulostustilavuus 1,3 m x 2,5 m x 1,0 m,
- ylin ekstruusiolämpötila: 400 °C,
- ylin tulostusalustan lämpötila: 150 °C,
- automaattinen tulostusalustan kalibrointi,
- ekstruuderissa 4 +1 lämpötilavyöhykettä,
- ekstruuderin maksimituotanto jopa 10 kg/h,
- mahdollisuus 45° asteen tulostukseen ja
- mahdollisuus käyttää jyrsinpäättä tulosteiden jälkikäsittelyyn.

Lisävarusteina tulostimeen hankittiin samassa yhteydessä 45°:n tulostuspää, jyrsinyksikkö sekä ohjelmistot näitä varten.

Portaaliratkaisu on teollisuusrobotia helpokäyttöisempi ja tarkempi. Se on myös kompaktimpi ja helpompi koteloida ja varustaa kohdepoistolla sekä tulostusprosessin että työympäristön suojelemiseksi. Nivelvarsirobotin etuna olisi ollut ehkä vielä suurempi joustavuus ja avoimen ympäristön helpompi luokse päästävyys joissakin tilanteissa.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto



Kuva 4. CNC Barcenasin henkilökuntaa ja Xamkin hankehenkilöitä kuvattuna marraskuussa 2023 ison 3D-työaseman asennuksen ja käyttökoulutuksen jälkeen. (Kuva: CNC Barcenass).

2.4 Suunnitteluohjelmistot

Elektroniikan 3K-tehtaalle hankittiin hintavertailun ja käyttökokemuksiin perustuen Autodesk Inventor ja Fusion 360 peruslisenssit sekä Fusion 360:n lisäosat Product design, Simulation ja Generative design:

- Product design-lisäosalla voitiin luoda monimutkaisia geometrioita, jotka parantavat lopputuotteen ominaisuuksia kuten keveitä ja kestäviä lattice-struktuureja.
- Simulation-lisäosalla voitiin simuloida esimerkiksi ruiskuvaluprosessia sekä kappaleiden mekaanista lujuutta rasituksen alaisena.
- Generative design-lisäosalla luotiin optimoituja lujia rakenteita käyttäen mahdollisimman vähän materiaalia.



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3 TOIMENPITEET JA TULOKSET TYÖPAKETEISSA

3.1 TP1: Materiaalin kehitystyö sekä suurten kappaleiden tulostus

3.1.1 Materiaalin kehitystyö

Uusiutuvat biopohjaiset materiaalit sekä kierrätysmateriaalit ovat olleet tärkeinä tutkimuksen kohteina työpaketissa TP1 ”Materiaalin kierrätys, puukomposiittien kehitystyö ja käyttö sekä suurten kappaleiden tulostus”. Uutena teknologiana on lisätty rakeiden käyttöä 3D-tulostuksen raaka-aineena. Laiteprojektin tuella tammikuussa 2023 käyttöön otetulla pöytämallin granulaattitulostimella on tulostettu testikappaleita ja muita esimerkkejä mm. UPM Formi 3D:stä (PLA + selluloosa), biopohjaisesta PLA:sta, Stora Enson Durasensestä (PP + puujauho) sekä puupohjaisesta Woodlysta. Työpaketissa 3 valmistetuilla muovimuoteilla tehdyissä ruiskuvaluissa on tutkittu Durasenseä, Woody W204C:tä sekä kierrätettyä ”pullomuovia” rPET.

Hankkeen alussa selvitettiin paikallisesti saatavilla olevia kierrätysraaka-aineita/teollisuuden sivuvirtoja, joita voisi hyödyntää 3D-tulostusmateriaalien raaka-aineena. Tämä selvitys ja kirjallisuustutkimus ajoivat koivunkuoren hyödyntämisen suuntaan. Suunnitelmana oli koivunkuoren ja sen komponenttien (kts. kuva 5) hyödyntäminen 3D-tulostusmateriaaleissa esim. tuohi + PLA ja/tai sisäkuori + PLA.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto



Kuva 5. Kuvassa koivun tuohi erottuu uloimpana vaaleana kerroksena ja sisäkuori tummempana sen alla (Kuva: Lotta Pirinen).

Hankkeen aikana selvitettiin koivun kuoren hyödyntämispotentiaalia 3D-tulostettujen lääkinällisten apuvälineiden raaka-aineena. Koivun kuorta on saatavilla Savonlinnan alueella saatavilla teollisuuden sivuvirtana useammalta puunjalostuslaitokselta. Tässä tutkimuksessa käytettävä tuohi saatiin lahjoituksena Metsä Woodin Punkaharjun vaneritehtaalta. Koivun tuohi sisältää runsaasti suberiinia ja betuliinia (Pinto ym. 2009). Suberiini on luonnon polyesteri, joka muun muassa suojaa kasvia ulkoisilta taudin aiheuttajilta ja auttaa parantamaan mekaanisia vaurioita. Betuliini taas tunnettu monista terveysvaikutuksistaan. Se on muun muassa antiseptinen aine, joka ehkäisee tulehduksia ja sienten kasvua. (Holmblom 2011, 204–205.) Koivun sisäkuori on koostumukseltaan lähempänä puuainesta, mutta sisältää kuitenkin runkoa enemmän suberiinia ja uuteaineita (Korpinen 2023). Tuohen käytöllä pyrittiin parantamaan PLA:n käyttöikää ja -mukavuutta. Sisäkuoren lisäyksellä pyrittiin taas parantamaan PLA:n iskunvaimennuskykyä ja biohajoavuutta.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Koivun kuoren soveltuvuutta 3D-tulostettavaan komposiittiin yhdessä PLA:n kanssa oli tarkoitus testata valmistamalla tuohi + PLA ja sisäkuori + PLA –komposiitteja. Tämän lisäksi tarkoituksena oli valmistaa referenssikomposiittia koivun hiontapölystä ja PLA:sta. Näistä kolmesta komposiitista ja pelkästä PLA:sta oli tarkoitus valmistaa testikappaleita 3D-tulostamalla ja ruiskuvalamalla materiaalianalyysiin.

Tutkimuksessa käytetty koivun kuori (Kuva 6) oli haettu suoraan vaneritehtaan hautomolta, joten se oli käsittelyn alussa vielä kostea ja sisälsi kuoren lisäksi runsaasti puuainesta ja vierasaineita. Tuohen ja kuoren erottamiseksi toisistaan sekä muiden aineiden poistamiseksi materiaalia hienonnettiin porakoneeseen liitetyllä kumisella työkalulla. Tämän jälkeen kuori jaoteltiin käsin visuaalisen tunnistuksen perusteella puhtaisiin tuoheen ja sisäkuoreen sekä muihin jakeisiin. Pienemmät jakeet poistettiin käytöstä jätteenä.



Kuva 6. Käsittelemätöntä koivun kuorta (Kuva Lotta Pirinen)

Koivun sisäkuori hajotettiin kotitalouskäyttöön tarkoitetulla monitoimikoneella (KitchenAid Classic – monitoimikone 3,1 L) jauheeksi, jonka partikkelikoko on <math><1\text{ mm}</math>. Tuohi hienonnettiin samalla laitteella noin kahden senttimetrin pituisiksi suikaleiksi, jonka jälkeen se pestiin irtoavan lian ja enimmäkseen korkkijällen poistamiseksi. Jauhetut kuorifraktiot ja hiontapöly (Metsä Wood, Punkaharju) kuivattiin huonekosteuteen säilyvyyden parantamiseksi.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Tätä tutkimusta ei saatu vietyä loppuun saakka hankkeen aikana hajotukseen ja sekoitukseen soveltuvien laitteiden puutteen ja pitkien toimitusaikataulujen vuoksi. Tutkimusta kuitenkin jatketaan AM-MOVE-hankkeessa jauhamalla fraktiot Masuko-jauhimella (MKCA6-5J supermasscolloider) komposiitin tekoon soveltuvaan partikkelikokoon. Tämän jälkeen tuohi, sisäkuori ja hiontapöly toimitetaan myöhemmin valittavalle yritykselle sekoitettavaksi 3D-tulostuslaatuiseen PLA:n kanssa, tarkoituksena valmistaa jokaisesta materiaalista 5-prosenttista komposiittia. Tämän jälkeen komposiiteista tulostetaan 3K-tehtaalla testikappaleet, joista testataan Mikpoliksella niiden mekaanisia ominaisuuksia. Jos tulokset osoittautuvat lupaaviksi, voidaan edetä tutkimaan materiaalin soveltuvuutta ihokontaktiin ja edelleen lääkinällisiin apuvälineisiin tai muihin käyttötarkoituksiin, joissa koivun kuoren antibakteerisista ominaisuuksista on hyötyä.

Lisäksi hankkeessa on selvitetty mahdollisuutta sekoittaa pitkäkuituista mikrokiteistä selluloosaa (MCC) teknisempään muoviin 3D-tulostettavaksi komposiitiksi. Pohjapolymeeriksi valikoitui ASA, joka on hyvien mekaanisten ominaisuuksiensa lisäksi osoittautunut 3D-tulostuksen kannalta suotuisaksi ja lisäksi sen sulamislämpötila on suhteellisen matala.

Kierrätetyn polyesterikuidun käyttöä 3D-tulostuskomposiitissa lujikekuituna kokeiltiin sekoittamalla sitä 3K-tehtaan langantekokoneella (3Devo Composer) sekä rPET:iin että tulostuslaatuiseen PETg:iin. Langantekokone on rakenteeltaan pieni ekstruuderit, jossa on yksi syöttösuppilo ja yksi sekoitusosallinen ruuvi. Tekstiiliteollisuuden käyttämä PES on valmistettu useimmiten PET:stä (Mather & Wardman 2011, 151), joten sen on oletettavaa soveltua sekoitettavaksi muiden PET-muovien kanssa. Hankkeessa käytetty PES-kuitu oli mekaanisesti kierrätetty käytetyistä sairaalavaatteista ja pesupusseista.

Kierrätystekstiilin käyttö langantekokoneen syöttimessä yhdessä pellettimuotoisen polymeerin kanssa toimi huonosti tekstiilikuidun höttöisen rakenteen vuoksi. Kuidut jäivät syöttimeen pellettien pudotessa syöttöruuville saakka. rPET:n ja PES:n sulaindeksien todettiin myös olevan liian suuria filamentin valmistukseen ja 3D-tulostukseen. Haasteeksi muodostui myös PES:n amorfinen rakenne sekä mahdolliset lisäaineet ja jäämät.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.1.2 Suurten kappaleiden tulostus

Suurten kappaleiden 3D-tulostus aloitettiin valmistamalla Teollisen puurakentamisen laboratorion valvomon porraskaiteisiin käsijohtimet UPM Formi 3D -materiaalista. Johtimen poikkiprofiili kuvaa X-kirjainta, joka symboloi Xamkia.



Kuva 7. Porraskaiteen käsijohdin, joka on tulostettu Super Discovery Workstation -laitteistolla Teollisen puurakentamisen laboratoriossa Savonlinnassa (Kuva: Eetu Huttunen).

Porraskaiteen käsijohde tulostettiin 3 osassa per asennuspuoli johtuen kaiteen pitkästä pituudesta. Kaikkien osien 3D-tulostus toteutettiin 45° tulostuskulmaa hyödyntäen, koska kaiteen haluttiin olevan ontto sisältä (Kuva 6). 45° tulostuskulma mahdollisti onton sisärakenteen 3D-tulostuksen ilman tukirakenteita. Kaiteet viimeisteltiin tulostuksen jälkeen ajamalla päädyt sirkkelillä, jonka avulla saatiin asennettua kolmesta osasta koostuva käsijohde kokonaisuus ns. puskusaumaan ja osat istumaan hyvin toistensa jatkoksi.

Toisena esimerkkinä toteutettiin 3D-tulostettu tuoli (Kuva 8). Materiaalina kuvan tuolissa on käytetty UPM Formi 3D, joka sisältää 80 % PLA-biomuovia ja 20 % selluloosakuituja.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Tuolin suunnittelussa haluttiin ottaa huomioon 3D tulostuksen mahdollistamat suunnitteluvapaudet sekä valmistusteknisesti sellaisen rakenteen valmistaminen, joka ei ole muilla käytössä olevilla menetelmillä helposti valmistettavissa. Kyseisen tuolin 3D-tulostaminen kestää ajallisesti noin 3–4 tuntia. Valmistaminen on kuitenkin mahdollista tehdä myös nopeammin hyödyntämällä suurempaa suutinkokoa, jolloin tulostusjälki muuttuu hiukan karkeammaksi. Tulostamalla valmistettu tuolin ensimmäinen versio on painoltaan noin 18 kg ja on painavahkon oloinen, kuitenkin painonsa takia myös tukeva. Tuoli on kuitenkin hyvä istua ja voisi sopia hyvin esimerkiksi ulkoterassille tai oleskelutilan tuoliksi.



Kuva 8. 3D-tulostettu designtuoli (Kuva Ilkka Vanttaja).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences

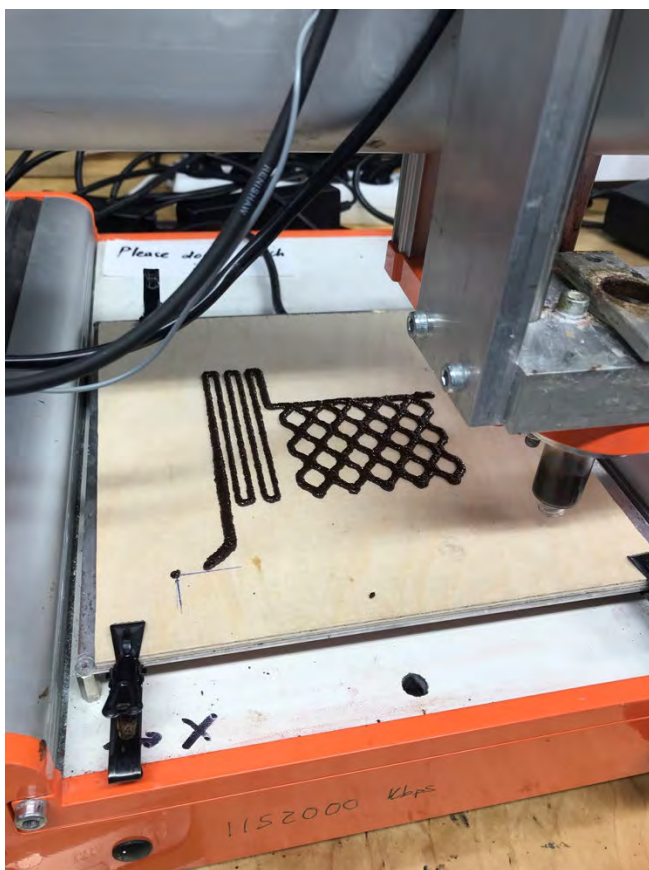


Aalto-yliopisto

3.2 TP2. Sandwich-rakenteen 3D-tulostusavusteinen valmistus (Aalto)

3.2.1 3D-tulostuskokeet Aalto-yliopistossa

Aalto-yliopisto on vastannut työpaketista TP2 ”Puutuoteteollisuuden sandwich-rakenteen hunajakennon 3D-tulostusavusteinen valmistus uudesta biopohjaisesta komposiitista”. Aalto on kehittänyt kertamuovisen bioepoksin pohjaisen tulostusmateriaalin, joka sisältää mikrokiteistä selluloosaa (MCC) ja ligniiniä, jota käytettiin materiaalikokeisiin Aallon AddLab -3D-tulostuslaboratoriossa. MCC auttaa muokkaamaan bioepoksin reologiaa ja mekaanisia ominaisuuksia. Lisäksi MCC:tä 3D-tulosteaineen täyteaineena käyttämällä voidaan vaikuttaa hunajakennomateriaalin väriin ja vaaleuteen MCC:n huokoisuuteen vaikuttamalla.



Kuva 9. Lämpökovettuvan 3D-tulosteen valmistusta Aalto-yliopistossa (Kuva: Mahyar Fazeli).



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



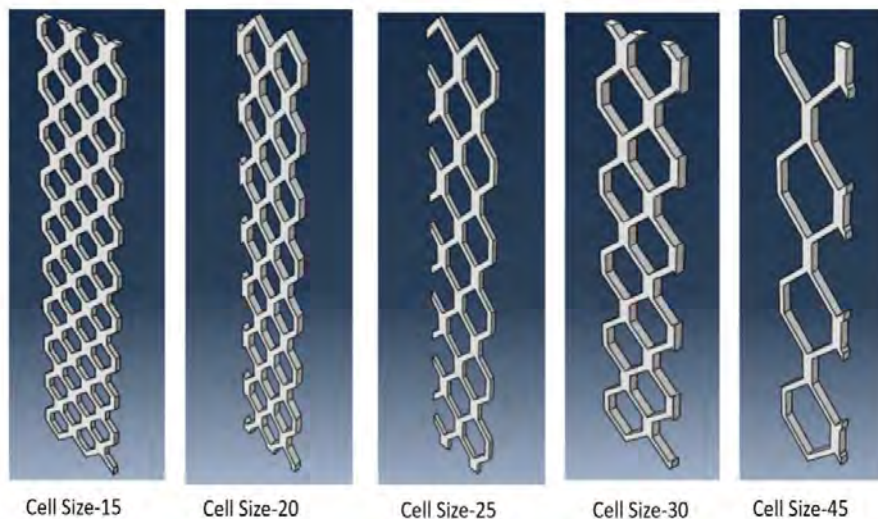
South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.2.2 3D-tulostusgeometrian rakenteellinen optimointi

Lämpökovettuvaa 3D-hunajakennorakennetta käytettiin lähtökohtana, kun hunajakennorakenteen taivutusjäykkyys-paino -geometriaa optimoitiin FEM-laskennan keinoin. Tavoitteena tässä tarkastelussa oli löytää hunajakennogeometria, joka vastaisi jäykkyydeltään umpivaneria ja tarkastella näin saatavan rakenteen painoa suhteessa vaneriin.



Kuva 10. FEM-nalysissä tarkasteltuja hunajakennogeometrioita (kuva: Mahyar Fazeli).

Näillä rakenteilla tehtiin FEM-tarkastelut taivutusjäykkyyden selvittämiseksi eri geometrioilla, joita hyödynnettiin tulostettaessa paneelit jäljempänä kuvattuun koehuonekaluun (tuoli). FEM-mallin verifiointiin käytetyt taivutusjäykkyyksmittaukset (Kuva 10) tehtiin lämpökovettuvaa 3D-tulostetta käyttäen.



Euroopan unionin
osarahoittama



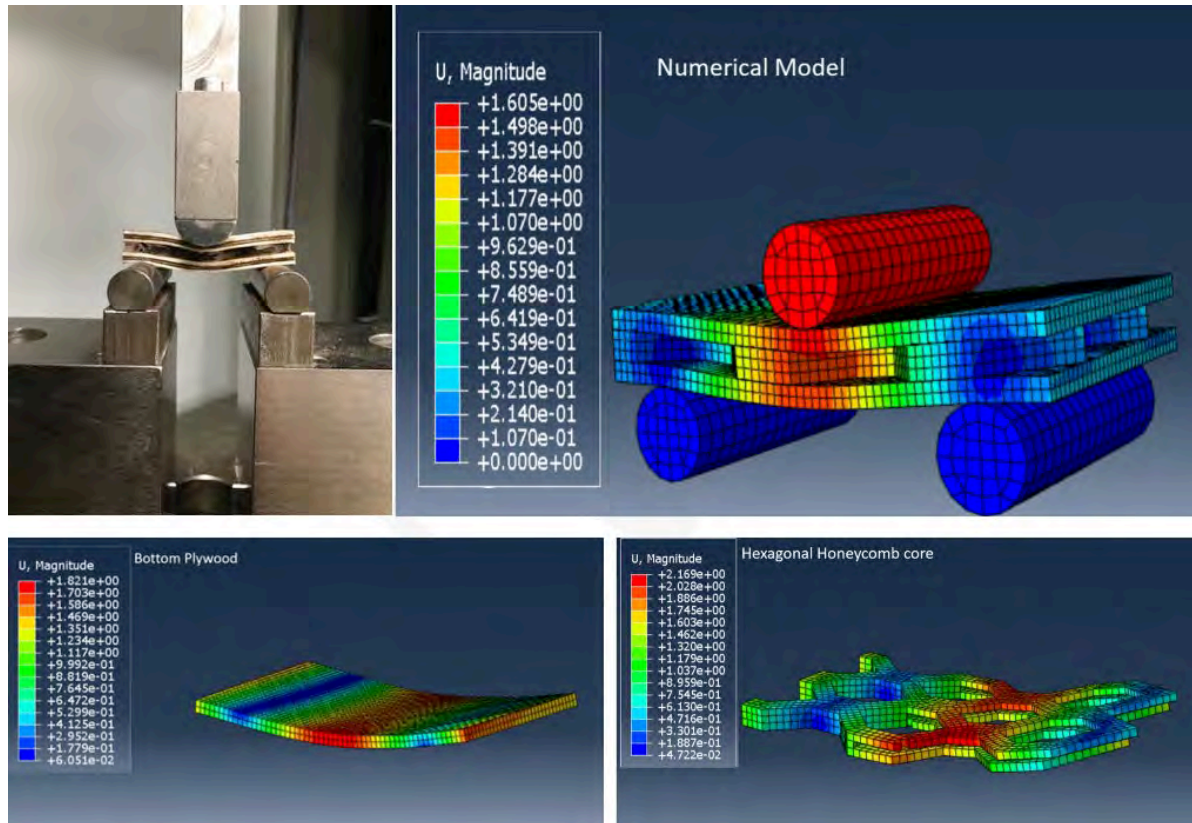
Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto



Kuva 11. 3D-tulostetun hunajakennorakenteen taivutusjäykkysmittausta, sekä saman rakenteen muodonmuutosten numeerinen mallinnus FEM-menetelmällä (Kuvat: Mahyar Fazeli ja Tirtha Gupta).

Cell size-45 -geometriaa (Kuva 10) käyttäen on tulostettu kennorakenteita vanerilevyjen väliin ja tuloksena on syntynyt koe-kennolevy ja näistä valmistettu koetuoli huonekaluteollisuudelle.

3.2.3 Vanerilevyn korvaaminen selluloosapohjaisella komposiitilla

Työpaketissa tarkasteltiin suunnitelman mukaisesti erilaisia sandwich -rakenteita. Tässä yhteydessä tarkasteltiin mahdollisuutta korvata komposiitin ylä- ja alapinnat vanerin sijaan hartsi-alipaineinfuusiolla valmistetulla selluloosakomposiitilla.

Kuva 12 esittää komposiittimateriaalin runkona olevasta regeneroidusta selluloosalangasta valmistettavaa selluloosakangasta.



Euroopan unionin
osarahoittama





Kuva 12. Jatkuvasta Inoncell-selluloosalangasta valmistettu komposiitin runko (kuva: Shariful Islam).

Valmis selluloosakangas valettiin biohartsiin alipaineinfuusiomenetelmällä. Tätä prosessia esittää Kuva 13.



Euroopan unionin
osarahoittama



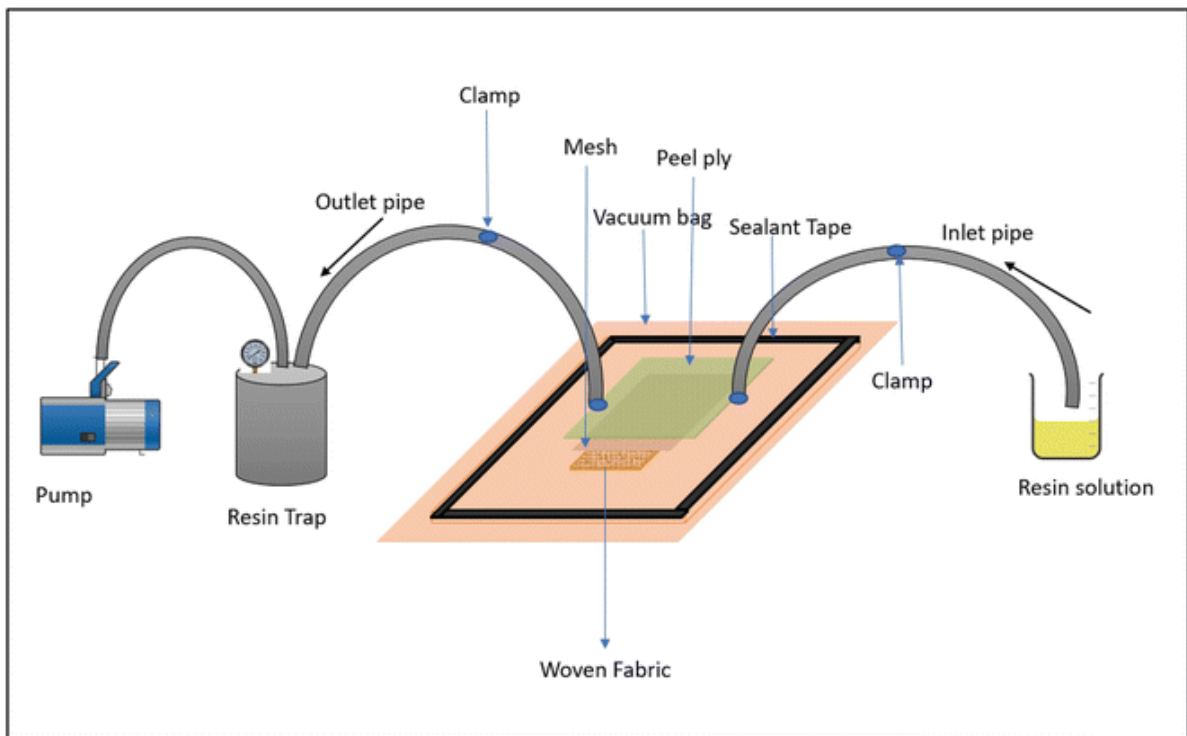
Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences

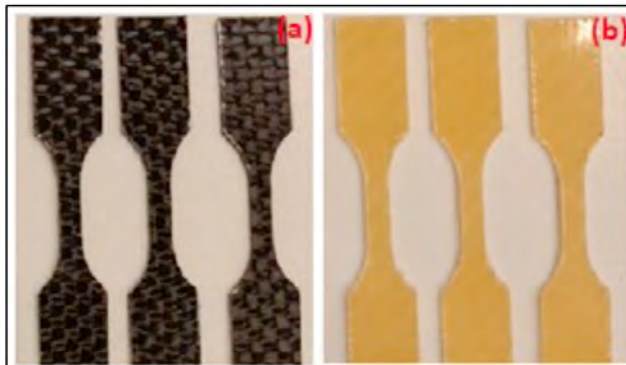


Aalto-yliopisto



Kuva 13. Kuva: selluloosakankaan käsittely biohartsilla alipaineinfuusiolla. Lopputuloksena saadaan komposiittilevy (Kuva: Shariful Islam).

Valmiista komposiittilevystä leikattiin koesauvat vetolujuusmittauksia varten. Vastaavat koesauvat valmistettiin selluloosakuidun lisäksi kaupallisesta hiilikuidusta, lasikuidusta, viskoosista sekä viskoosin ja puuvillan seoksesta. Kuva 14 esittää hiilikuitu- (a) ja regeneroitu selluloosa -koesauvoja (b).



Kuva 14. Vertailuna käytetystä kaupallisesta hiilikuidusta (a) sekä loncellistä (b) valmistetut koesauvat materiaalin lujuusmittauksia varten (Kuva: Shariful Islam).

Kuva 15 esittää lujuus-, kimmomoduuli-, murtovenymä- ja vetolujuustuloksia eri komposiittimateriaaleilla: CFRC = Hiilikuitukomposiitti; IFRC = loncell-regeneroitu



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto

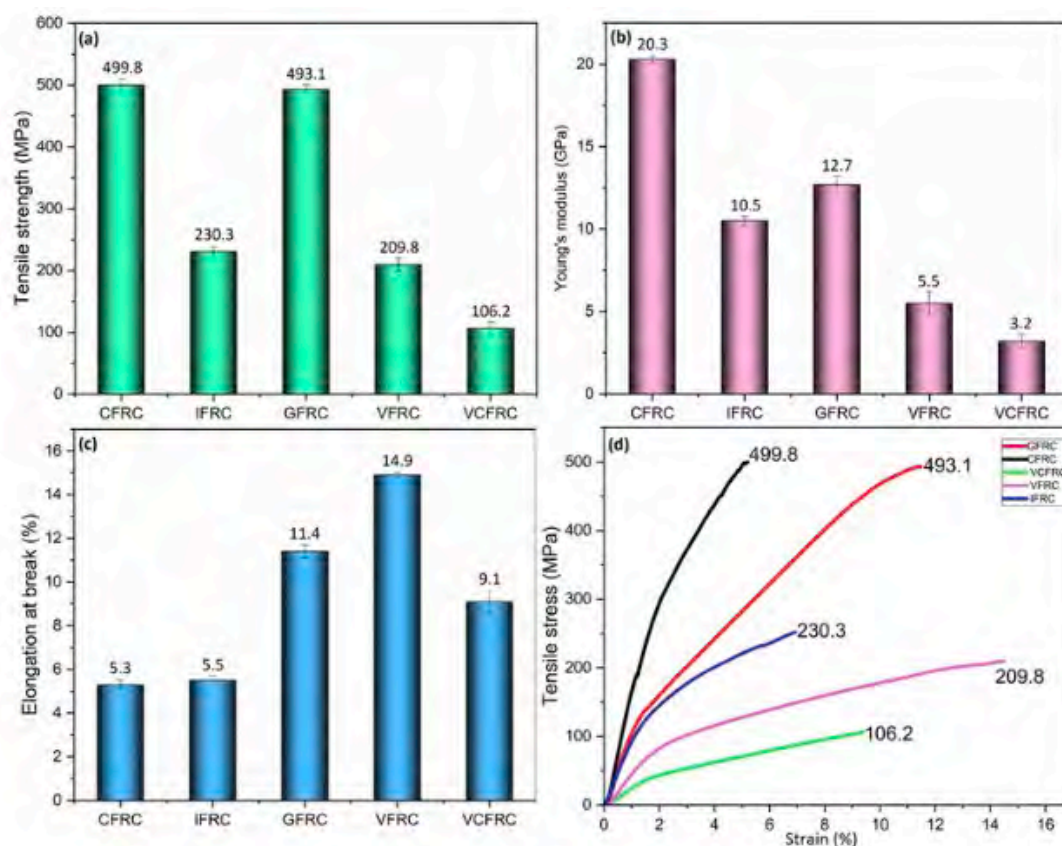


South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

selluloosakomposiitti; GFRC = lasikuitukomposiitti; VFRC = viskoosikuitukomposiitti; VCFRC = viskoosi-puuvillakuitukomposiitti.



Kuva 15. Vetolujuus – Tensile strength, (a); Kimmomoduuli – Young's modulus (b); Murtovenymä – Elongation at break (c); Vetojännitys – Tensile stress (d) eri komposiittimateriaaleilla: CFRC = Hiilikuitukomposiitti; IFRC = loncell-selluloosakomposiitti; GFRC = lasikuitukomposiitti; VFRC = viskoosikuitukomposiitti; VCFRC = viskoosi-puuvillakuitukomposiitti.

Edellä olevista kuvista ilmenee erittäin mielenkiintoinen seikka: Regeneroidusta selluloosasta valmistettu komposiittimateriaali on lujudeltaan ja kimmomoduuliltaan noin 50% hiilikuidusta valmistetusta komposiitista. Tämä havainto avaa uusia mahdollisuuksia puupohjaisten komposiittien käyttöön uusiutumattomien raaka-aineiden korvaajina.

3.2.4 3D-tulostusmateriaalin optisten ominaisuuksien parantaminen

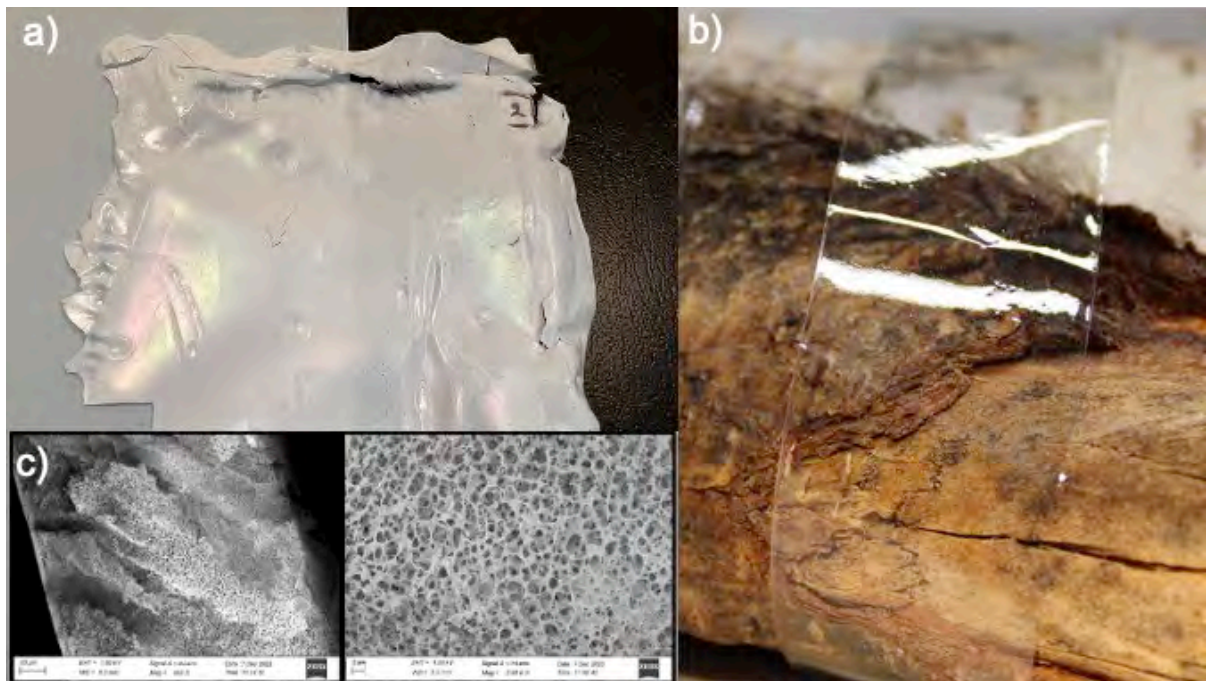
Projektissa tarkasteltiin myös mahdollisuuksia vaikuttaa 3D-tulosteen rakenteeseen hyvin pienessä mittakaavassa, ja sitä kautta sen optisiin ominaisuuksiin, ja väriin. Tällä on usein myös kaupallista merkitystä, kun 3D-rakenteita suunnitellaan.



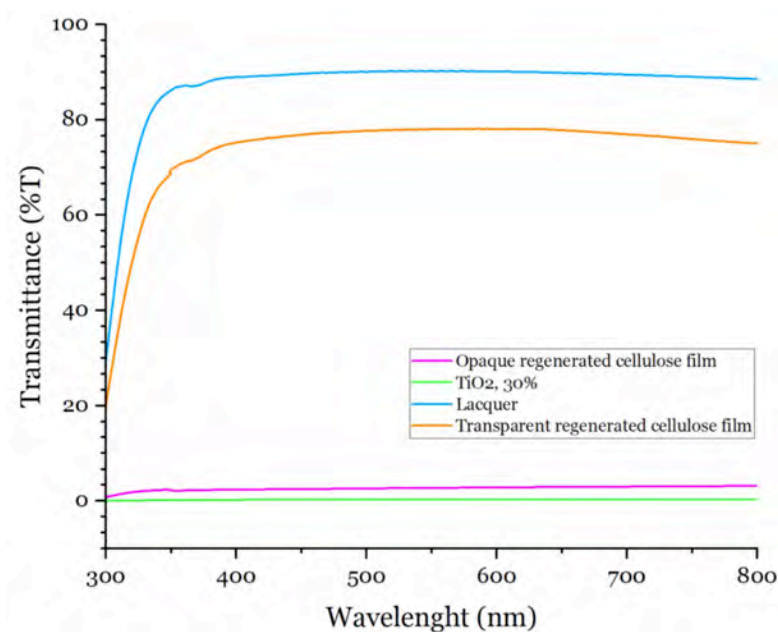
Euroopan unionin
osarahoittama



Tiedetään, että missä tahansa materiaalissa mahdollisimman suuri valonsironta saavutetaan materiaalissa, jossa on valoa taittavia rajapintoja 200–300 nanometrin välein, eli noin puolen valon aallonpituuden päässä toisistaan.



Kuva 16. Selluloosan rakenteen vaikutus valonsirontaan ja valkoisuuteen. a) pakastekuivaamalla valmistettua regeneroitua selluloosaa b) regeneroitua selluloosaa kuivattuna huoneenlämmössä c) korkean valonsirontan selluloosan nanorakennetta SEM-kuvassa (kuvat: Viivi Huotari).



Kuva 17. Eri tavalla kuivattujen selluloosanäytteiden läpikuultavuus (Transmittance): Kirkas lakka (Lacquer) = sininen; läpikuultava huoneenlämmössä kuivattu regeneroitu selluloosa (oranssi); läpikuultamaton pakastekuivattu huokoinen regeneroitu selluloosa (pinkki); valonsirontan referenssinä käytetty 30% titaanidioksidi-lakka -seos (vihreä) (Kuva: Viivi Huotari).



Euroopan unionin osarahoittama



Lämpökovettuvassa 3D-tulosteaineessa käytettiin täyteaineena ligniinipitoista mikrokiteistä selluloosaa. Jatkotutkimuksessa selluloosan rakenteen valonsirontatuloksia on tarkoitus käyttää siten, että 3D-tulosteen optisten ominaisuuksia ja väriä voidaan säätää huokoisuudeltaan muutellun selluloosan avulla.

3.2.5 Kennolevyjen ja mallituolin valmistus

Kennolevyt ja tuoli valmistettiin lopulta tutkimussuunnitelmassakin ennakoidulla tavalla, koska lämpökovettuvien isojen kappaleiden tulostaminen osoittautui mahdottomaksi projektin puitteissa. Lopulliset kennolevyt valmistettiin perinteisemmällä lämmön avulla pehmenevään ja jäähtymisen kautta kovettuvaan 3D-tulostusmateriaaliin. Tulostusmenetelmän vaihtaminen ei kuitenkaan ole ratkaisevaa tulosten sovellettavuudelle, vaan lämpökovettuvaa tulostusmetodia voi mahdollisuuksien mukaan näiden tulosten pohjalta soveltaa jatkossakin.

Kennolevyn ominaisuuksia on optimoitu testaamalla ja laskennallisesti levyn toiminnallisuuden parantamiseksi. Hankkeessa kehitetty sandwich -paneelia myös testattiin taivutuskokeessa 100 kg:n painolla. Kuvissa 8 a, b ja c on kuvattu Aallon kehittämää vanerikomposiittilevyä ja sen testausta.



Kuva 18. Kuvassa a Xamkillä 3D-tulostettu hunajakennorakenne, kuvassa b kennolevyn rakenne ja kuvassa c kennolevyn kestävyys testaus (Kuvat: Mahyar Fazeli).



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Levystä on suunniteltu ja valmistettu istuin lopputulemaa demonstroimaan. Loppudemonstraationa Aalto-yliopistossa valmistetun tuolin suunnittelusta ja valmistuksen koordinoinnista vastasi kilpailutettu alihankkija Ville Kokkonen, Office for industrial design GmbH. Alihankinnan kilpailutuksesta ja hankinnasta vastasi XAMK omassa osuudessaan.



Kuva 19. Hunajakennomateriaalista valmistettavan tuolin visualisointi suunnitteluvaiheessa (Kuva: Ville Kokkonen).



Kuva 20. Hankkeessa demonstroitu kennorakenteinen tuoli (vasemmalla), ja vertailukohtaksi valmistettu umpivanerista valmistettu tuoli (oikealla), (Kuva: Mahyar Fazeli).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.3 TP3. Prototuotannosta sarjatuotantoon

Ruiskuvalu on maailmanlaajuisesti yksi käytetyimmistä muovituotteiden valmistusmenetelmistä. Vaikka erilaiset valmistusteknologiat ovat yleistyneet myös muovituotteiden valmistuksessa niin silti ruiskuvalu on teknologiana pitänyt paikkansa. Kuitenkin erityisesti siirtymävaihe prototyyppien valmistuksesta sarjamaiseen valmistamiseen muovituotteiden kohdalla on ollut selkeä pullonkaula johtuen suurelta osin ruiskuvalumuottien korkeista valmistuskustannuksista. (Farooquee. R. et. al. 2021)

Hankkeessa haluttiin etsiä ratkaisuja ja helpotusta tähän tuotteen valmistuksen siirtymävaiheeseen. Tämän vuoksi AMBIO laitehankkeessa hankittu Babyplast 6/10VP ruiskuvalulaitteisto otettiin käyttöön ja varsinaisena ajatuksena oli testata sekä tutkia 3D-tulostettujen muottien käyttöä ruiskuvalussa. Ruiskuvalumuoteissa pinnanlaatu on tärkeä tekijä ja etukäteisselvityksissä esille tulleissa maailmalla tehdyissä tutkimustoissa tyypillisimmin muottien tulostukseen onkin käytetty erinomaista pinnanlaatua tarjoavaa nestehartsin valokovettamiseen perustuvaa SLA- tai DLP-tulostustekniikkaa. Tässä hankkeessa kaikki muotit tulostettiin Elektroniikan 3K-tehtaan Asiga Pro 4K DLP tulostimella.

Hankkeen aikana löydettiin muutamia kaupallisia toimittajia nestehartsin 3D-tulostusmateriaaleille, joita voitaisiin hyödyntää ruiskuvalu muottien valmistuksessa. Etukäteisselvityksien pohjalta tiedettiin myös, että muovimuotin hyödyntäminen ruiskuvalussa vaatii muovimuotin ympärille metallikehykset eli muottirungot, jotka ottavat vastaan sekä muotteja yhteen puristavan voiman että muottia vasten painuvan valusuuttimen puristavan voiman sekä kuumuuden. Hankkeen aikana ennen ensimmäisiä ruiskuvalukokeita 3D-tulostetuilla muoteilla suunniteltiin metalliset muottikehykset ja nämä tilattiin alumiinista jyrstytynä.

Ensimmäisenä muottimateriaalina hankittiin käyttöön Loctite IND147 3D-tulostusmateriaalia, joka oli suunniteltu erityisesti ruiskuvalumuotti käyttöön. Kuitenkin jo ensimmäisiä ruiskuvalukokeita tehdessä sen havaittiin olevan hyvin haurasta ja ja lohkeavan herkästi valuprosessissa. Loctite IND147 materiaalista valmistetuilla ruiskuvalumuoteilla saatiin valettua ainoastaan muutamia kappaleita ennen muottien hajoamista. Tämän vuoksi jatkettiin muottimateriaali selvitystä ja päädyttiin hankkimaan Formlabs Rigid 10K materiaalia valumuottien valmistukseen. Tässä materiaalissa



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



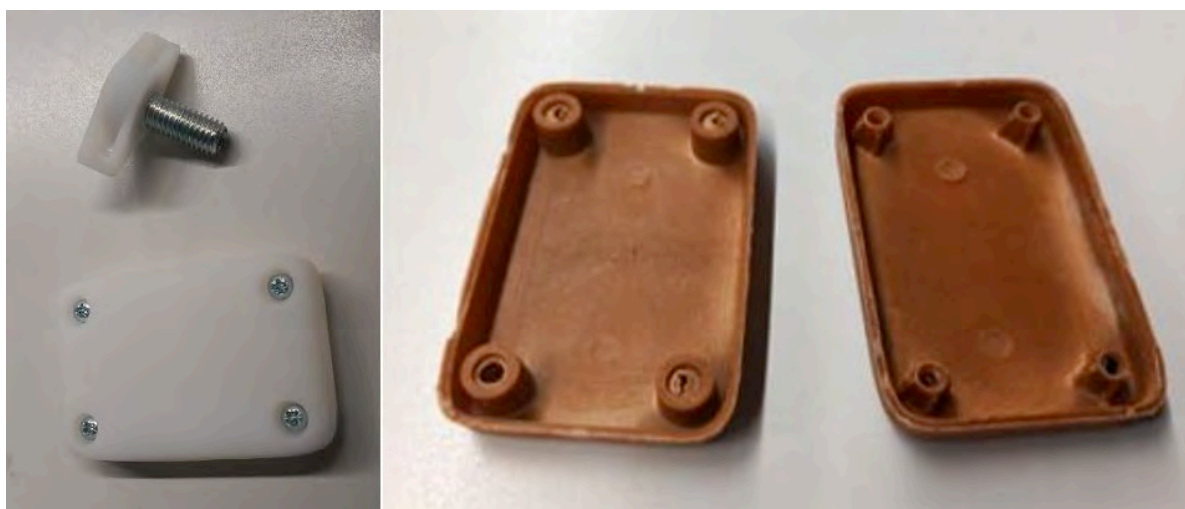
South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

seassa lujitteena on lasikuitua. Tämän materiaalin havaittiin heti alkuun olevan paljon kestävämpää muottikäytössä ja parhaimmillaan sillä on onnistuttu valmistamaan jopa 100 kappaleen sarjoja riippuen valmistettavan kappaleen geometriasta.

Tulostettuihin muovimuotteihin on testattu valumateriaaleina HDPE, PC, PP, ASA, PA6GF30, TPE, TPU sekä Stora Enson Durasenseä. Näistä HDPE, PP, ASA, PC ja Durasense toimivat hyvin muovimuottivalussa. Eniten haasteita on ollut PA6GF30, TPE ja TPU valamisessa. Yleisesti voidaan todeta kuitenkin 3D-tulostettujen muovimuottien toimivan hyvin ruiskuvaluprosessissa, prosessi hankaloituu, kun valettavan muovimateriaalin sulamislämpötila nousee korkeammaksi ja vastaavasti matalassa lämpötilassa sulavat materiaalit kuten HDPE ovat suhteellisen helppoja valettavia muovimuoteilla. Muovimuoteilla kokeiltuja valukappaleita on olleet siipiruuvi, erilaiset koteloratkaisut ja kaapelin liittimen kaksiosainen valu (kts. kuva10). Olemme osoittaneet, että uusia tuoteideoita voidaan muovimuottitekniikan ansiosta siirtää erittäin nopeasti lyhytsarjavalmistukseen, koska kalliin ja aikaa vaativan metallimuotin valmistusta ei tarvita. Etuna tällä menetelmällä proto- ja nollasarjojen tuotannossa on myös, että valmistettu kappale vastaa ominaisuuksiltaan metallimuotilla tuotettua suursarjan kappaletta, koska valmistuksessa käytetään täysin samaa materiaalia. Jos näiden kappaleiden valmistukseen käytettäisiin 3D-tulostusta, niin käytetty materiaali saattaa poiketa lopullisesta ruiskuvalulaadusta merkittävästikin.



Kuva 21. Siipiruuvi insertivaluna ja ruiskuvaluttuja koteloja (Kuvat: Mikko Nykänen).



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



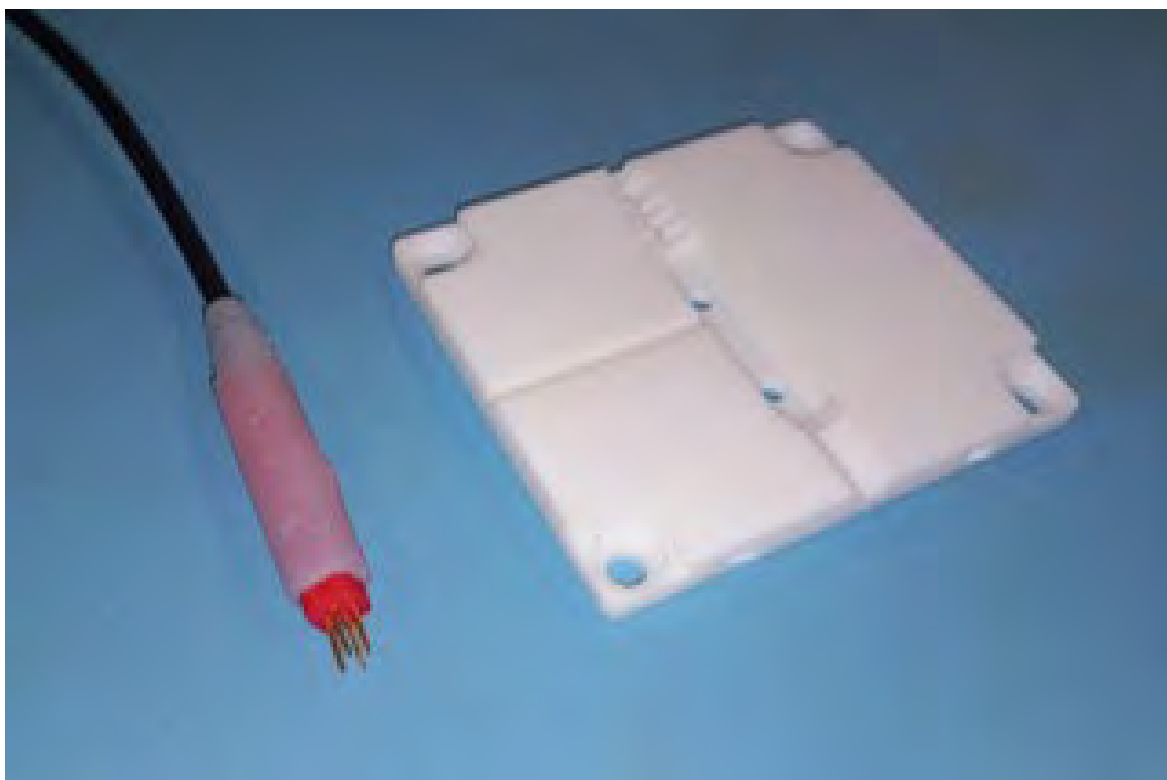
South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.3.1 Ylivalukokeilu

Ruiskuvalukoneella kokeiltiin ylivalua (overmolding) elektroniikkasovelluksessa kaapelin päähän juotetuille testeripinneille. Pinnien mekaaninen kiinnitys tehtiin kovalla sisäosalla (pre mold), joka oli masterpatch -värjättyä ASA-materiaalia. Ulko-osa (overmold) oli pehmeää TPE-materiaalilla (Kuva 22). Muovimuottien kesto oli lyhyen sarjan perusteella hyvä. Haasteeksi osoittautui TPE-materiaalin huono adheesio eli tartunta ASA:an ja erityisesti kaapelin PUR-vaippaan sekä valettavien kappaleiden keskittäminen muotissa. Ylivalussa kokeiltiin myös TPU materiaalia ja haasteena sen käytössä oli puolestaan sen liian hyvä tarttuvuus muottimateriaaliin, jonka vuoksi valettuja kappaleita ei saatu ehjänä irtoamaan muotista. Koevaluja on jatketaan elektroniikan ylivaluun suunnitellulla Henkel Technomelt PA 6208N -materiaaleilla sekä kokeillaan valumuotissa irrotusaineen käyttöä TPU muovia valettaessa.



Kuva 22. Testeripinni ja sen muovisen valumuotin puolikas (Kuva Mikko Nykänen).



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.4 TP4. Luontoa jäljittelevät ja muiden optimaaliset rakenteet

Työpaketissa TP4 ”Luontoa jäljittelevien ja muiden optimaalisten rakenteiden hyödyntäminen” on pohdittu luontoa jäljitteleviä rakenteita mm. terveysvaikutteisissa pohjallisissa. Nämä voisivat olla jalkaa hierovia pintarakenteita tai pohjallisen esimerkiksi puumaista verkkorakennetta, jonka tiheys määrittäisi paikallisesti esimerkiksi pohjallisen jäykkyyden tai joustavuuden. Hunajakennorakenne, joka sekin on luonnosta lainattu, on puolestaan käytössä huonekalukerroslevyn rakentamisessa hankkeen Aalto yliopiston osuudessa (Kuva 23). Kappaleen virtausteknistä optimointia ja 3D-tulostusta, hyödynnettiin hankkeessa myös paperin- ja kartongin valmistuksessa käytettävän sekoitinsuuttimen kehittämisessä. Kun sekoitusta tehostetaan, veden käyttö prosessissa vähenee (kts. case Wetend luku 3.6.2).



Kuva 23. Aalto-yliopistolle Tumaker -laitteella 3D-tulostettu honeycomb -kennorakenne (430 mm x 430 mm) UPM Formi 3D -materiaalista (kuva: Eetu Huttunen).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.5 TP5. Erikoismateriaalit

Hiilikuitulujitteiset nailonmateriaalit (PACF) todettu toimiviksi Xamkillä Elektroniikan 3K tehtaassa aikaisemmissa hankkeissa ja monissa sovelluskohteissa. Niiden tulostuslaatu on myös hyvä. Kuitenkin tähän asti käytetyt materiaalit ovat olleet hankintakustannuksiltaan kalliita. Sen vuoksi työpaketissa TP5 ”Sovelluskohtaiset erikoismateriaalit” hankimme testattavaksi hiilikuitulujitteista polyamidia kauppanimeltään ePACF, joka maksaa vain murto-osan kilpailijoiden hinnasta. Tälle kiinnostusta herättäneelle materiaalille haettiin ja löydettiin tulostusparametrit, joilla tulostettavuus on hyvä sekä myös kappaleiden pinnanlaatu hyvä.

TP5:ssä on testattu myös uudentyyppisiä erittäin joustavia tulostusmateriaaleja sekä 3D-tulostuksen jälkikäsittelyä. Käytetyt jälkikäsittelymenetelmät ovat olleet kemikaalin höyrystäminen suljetussa kammiossa alihankintana sekä lasikuullapuhallus ja kiillotusrumpukäsittely itse toteutettuna. Kiillotusrummussa hiovana materiaalina käytettiin pähkinänkuorijauhetta. Käsittelyt silottavat isompia epätasaisuuksia, mutta yksityiskohtien tarkkuus voi samalla kärsiä.

Kemikaalinen höyrystäminen tehtiin alihankintana Tamspar Oy:ssä. Prosessissa käytetty laite oli AMT PostPro 50. Menetelmälle soveltuvia materiaaleja ovat mm. PA, TPU/TPE ja PP. Menetelmää käytetään SLS-, MJF-, HSS- ja FFF-3D-tulosteille. Se perustuu kemikaalin höyrystämiseen suljetussa kammiossa. Lopputuloksena saavutetaan pintojen sulkeutuminen ja siten kappaleesta tulee vesitiivis. Lisäksi pintojen silottuminen johtaa pinnanlaadun parantumiseen (Kuva 24). Käsittelyn voimakkuutta säädellään mm. kemikaalin määrällä ja käsittelyajalla.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto



Kuva 24. Projektissa jälkikäsiteltyjä 3D-tulosteita (Kuva Mikko Nykänen).

3.5.1 Erikoismateriaalien testaukset Mikpoliksessa

Xamkin materiaalitestauksen laboratorioon Mikpolikseen Mikkeliin toimitettiin tutkimussuunnitelman mukaisesti joukko tutkimuksellisesti mielenkiintoisia materiaaleja 3D-tulostettuna erilaisiin testeihin. Tiivistetty raportti kokeiden tuloksista on tämän raportin liitteenä. Tässä kohtaa käsitellään mittauksen lähtökohtia ja materiaalivalintoja.

Kaikissa mittauksissa yhteensä testattuja koekappaleita:

- Vetolujuus 66 kpl
- Taivutuslujuus 66 kpl
- Iskulujuus 42 kpl
- Puristuslujuus 80 kpl
- Pinnankarheus 120 kpl
- Sulamislämpötila-alueen määrittäminen (DSC) 6 kpl
- Dynaamismekaaninen termoaalyysi (DMA) 6 kpl
- MicroCT 3 kpl



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.5.2 Veto-, taivutus- ja iskukokeet

Perusmittauksista veto-, taivutus- ja iskukokeita tehtiin seuraaville materiaaleille:

- ePACF, edullinen tekninen materiaali (Kuva 25)
- ASA, 3D-tuloste vs. ruiskuvalu
- Rigid 10k, muottimateriaali
- biomateriaalit Woody ja Durasense



Kuva 25. Murrettuja PA6 GF 30% -vetokoesauvoja (Kuva: Kai Möller).

3.5.3 Puristuslujuus

Puristuslujuuskokeisiin (esim. särmästyökalut -sovellus) 3D-tulostettiin koekappaleita seuraavista materiaaleista: Onyx, Onyx + jatkuva hiilikuitu, Onyx + jatkuva kevlar, PETG ja Ultem1010. Puhdasta Onyx materiaalia, jossa PA6 polymeeriin seostettu 10% pätkittyä hiilikuitua, haluttiin verrata jatkuvalla kuidulla pituussuunnassa vahvistettuihin verrokkeihin. PETG puolestaan edustaa edullista bulkkimuovia ja Ultem1010 ns. ultrapolymeeria, jonka suorituskyky mm. vetolujuuden osalta tiedettiin erinomaiseksi.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



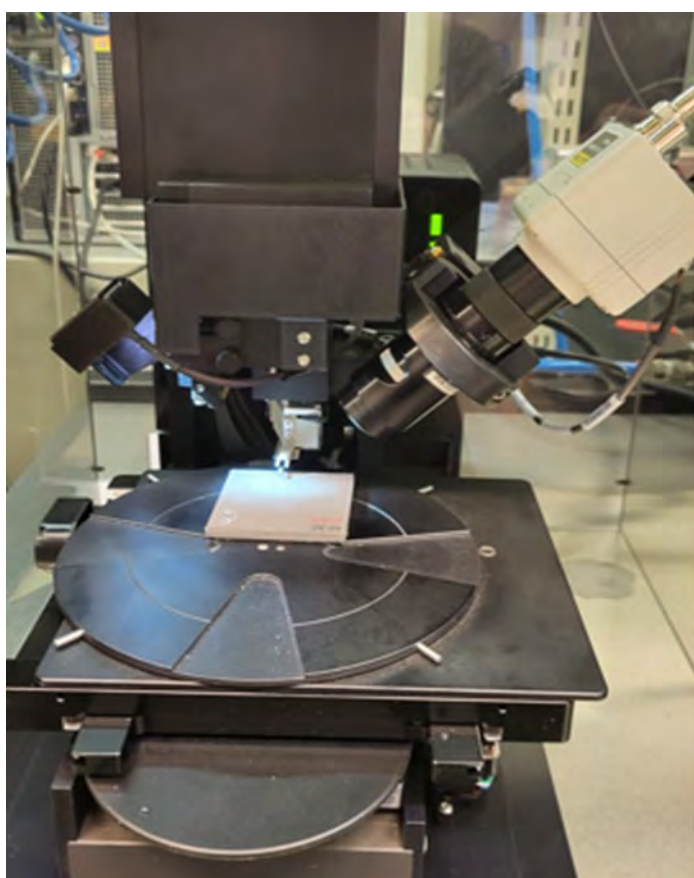
Aalto-yliopisto

3.5.4 Pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittaukset (R_a) tehtiin 2D Stylus – profilometrilla eri tulostustekniikoiden, materiaalien ja jälkikäsittelyjen vertailemiseksi:

- FFF (tulostimet Mark two, miniFactory) Onyx, Onyx + AMT jälkikäsittely, Onyx + lasikuulapuhallus, Onyx + kiillotusrumpu, Ultem 1010
- FGF (Tumaker) UPM Formi.
- DLP (Asiga) Loctite IND147 ja 3172 sekä
- SLS (alihankinta) PA2200 sekä PA2200 + AMT jälkikäsittely.

Pinnankarheuden mittausrakenteisto on esitetty Kuva 26.



Kuva 26. Pinnankarheuden mittausta (R_a) 2D stylus – profilometrilla (Kuva: Kai Möller).

Tulostettuja tasopintoja vertailtiin keskenään myös niiden suuntien mukaan eli tarkastelun kohteena oli myös erikseen ylä-, ala-, pysty - ja vinopinnat (45 ja 60°). Koekappale on esitetty edellä etualalla Kuva 24.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.5.5 Sulamislämpötila-alueen määrittäminen (DSC)

Materiaalien sekoituskokeiluja varten tarvitaan tieto sekoitettavien materiaalien sulamislämpötiloista oikeiden prosessiparametrien säätöä varten. Sulamislämpötila-alue saadaan mitattua differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrillä (DSC). Testaus tehtiin kierrätetylle polyesterikuidulle (PES), kierrätetylle PET polymeerille (RPET) sekä kaupalliselle kokonaan bioperäiselle Woodly materiaalille.

3.5.6 Dynamismekaaninen-termoanalyysi (DMA)

Dynamismekaaninen-termoanalyysi (DMA) mittaa materiaalin jäykkyyttä lämpötilan ja taajuuden funktiona. Vertailukohteena oli materiaalille ilmoitettu lämpötilankestävyys, jonka mittaus- ja ilmoitustapa vaihtelee paljon valmistajien välillä. Koemateriaaleina tässä olivat 3D-tulostettavat filamentit Onyx, Ultem1010 ja nestehartsin muottimateriaali Rigid 10k. Erityisen mielenkiintoista DMA analyysi oli suorittaa muottimateriaalille, koska tulosten perusteella voitiin arvioida sen kestävyyttä käytettäessä eri ruiskuvalumateriaaleja. Muottimateriaalin lämpötilan keston on luonnollisesti oltava suurempi kuin valmistettavan kappaleen ruiskuvalulämpötila.

3.5.7 MicroCT

MicroCT kuvauksessa selvitettiin koemateriaalin sisäinen rakenne, kuten ilmaratot sekä kuitujen määrä ja suunta. Ilmarakojen määrä kertoo osaltaan tulostusprosessin laadusta. MicroCT kuvauksia tehtiin samoille materiaaleille kuin edellä.

3.6 TP6. Demonstraatiot eli esimerkitapaukset

3.6.1 Lankarakosihti (Andritz)

Lähtökohtana demonstraatiossa oli painelajittimen lankarakosihti. Lajittelutulos riippuu lankojen geometriasta. Ideana on testata erilaisia geometrioita nopeasti ja edullisesti. Tavoitteena tehdä muutaman tunnin koeajoja 3D-tulostetulla sihdin osilla. Vaatimukset koskevat ennen kaikkea pinnanlaatua, mittatarkkuutta ja mekaanista kestävyyttä.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



**South-Eastern Finland
University of Applied Sciences**



Aalto-yliopisto

Lankarakosihdin koekappaleiden 3D-tulostus toteutettiin Elektroniikan 3K-tehtaalla DLP-menetelmään perustuvalla hartsitulostimella Asiga PRO 4K. 3D-tulostettu lankarakosihti on esitettyä Kuva 26. Ensimmäisten testitulostusten yhteydessä oli haasteita menetelmäperäisistä vääristymistä muodoissa, mutta ne saatiin riittävällä tavalla hallintaan tulostusparametreja säätämällä. Andritzin tekemissä testeissä Loctite 3172 -materiaalista 3D-tulostetut sihdit todettiin riittävän lujiksi Xamkin Kuitulaboratoriossa toteutettavia jatkokokeita ajatellen.



Kuva 27. 3D-tulostettu painelajittimen lankarakosihti (Kuva: Mikko Nykänen).

3.6.2 Kemikaalisuutin (Wetend)

Tässä tutkimuscasessa pyrittiin parantamaan kemikaalin sekoitusta muuttamalla suuttimen geometriaa hyödyntäen 3D-tulostuksen tuomia suunnitteluvapauksia. Tapauksessa puntaroiitiin myös 3D-tulostuksen järkevyyttä valmistustekniikkana



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



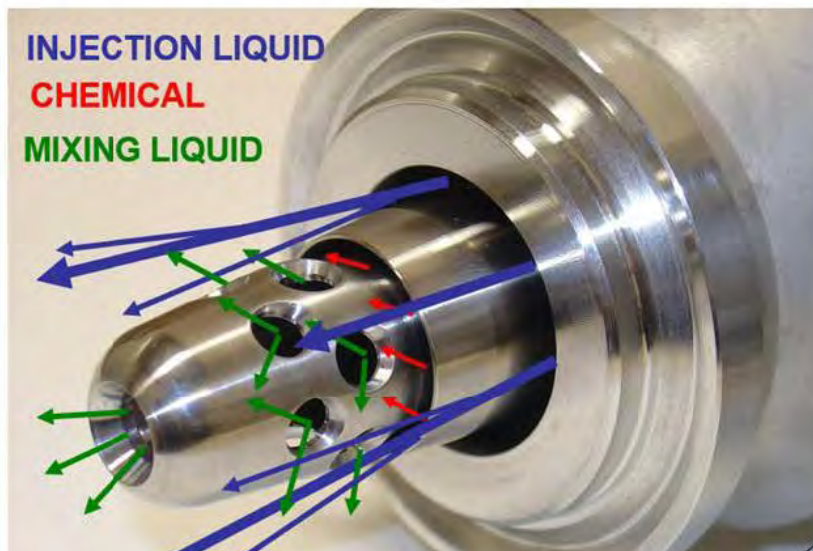
South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

teknistaloudellisesta näkökulmasta kemikaalisekoittimen osien valmistuksessa. Kuva 27 havainnollistaa nykyisen suuttimen rakennetta.

TrumpJet® nozzle heads



Kuva 28. Nykyisen kemikaalisuuttimen esimerkki (Kuva: Wetend Technologies Oy).

TrumpJet -kemikaalien sekoitussuuttimen uudelleensuunnittelu toteutettiin kilpailutettuna alihankintana. Toteuttajaksi valikoitui Etteplan, joka simuloi sekoittumista nykyisellä rakenteella ja tämän toiminnan simuloitien tulosten perusteella muokatulla uudella suutinrakenteella.

Suunnittelussa rakenteessa on kaksi isoa muutosta:

1. Rungossa on nyt kaareutuvat rampit. Näiden tarkoitus on jakaa kemikaali useampaan virtaukseen ja levittää virtausta sekä saada aikaiseksi sekoitusta edistävä pyörrevirtaus.
2. Sekoitusnestekanavan päätyreikä on tukittu ja sivureiät ovat muodoltaan pidemmät ja kapeat. Tämä pakottaa sekoitusnestettä voimakkaammin sivuille, joka levittää virtausta.



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto

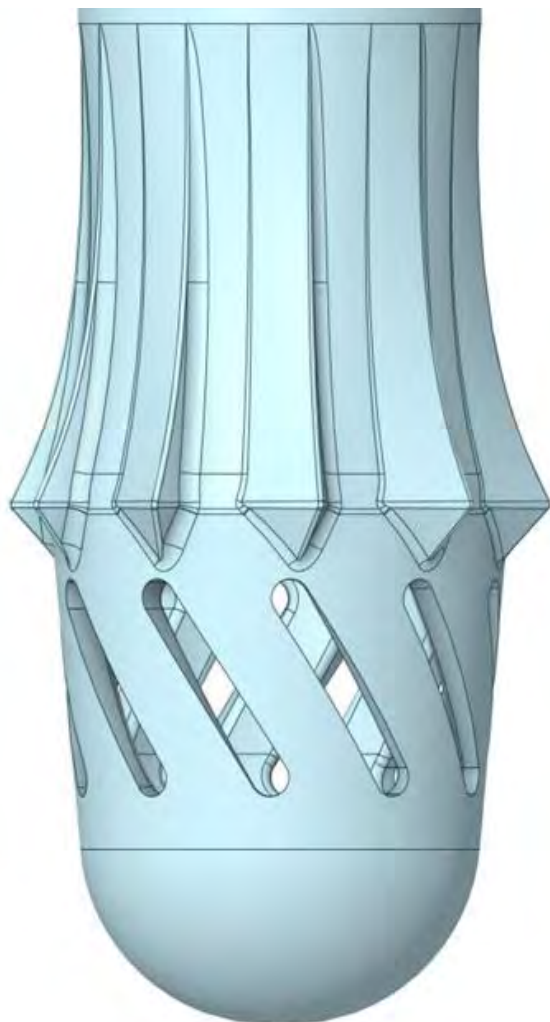


South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

”Kemikaali on tasaisemmin sekoittunut uuden suuttimen päätytasossa. Uuden suuttimen virtauskuvio on monimutkaisempi, mutta virtauksessa on enemmän pyörteilyä. Perustapauksessa oli kaksi selvää pyörrettä. Kokonaissekoitus on samalla tasolla, uudella rakenteella virtaus leviää nopeammin”, todetaan Etteplanin raportissa. Kuva 29 esittää uudelleen suunnitellun suuttimen kärkeä.



Kuva 29. Ensimmäinen ehdotus mahdolliseksi muutoksiksi suuttimeen jatkossa (Kuva: Etteplan Oy).

”Injektiovirtauksen heitto putken keskilinjaan oli heikompi ja suuttimen päähän tulee ei-toivottu alipaine, joka luo kemikaalivanaa. Jos suuttimen päätyreikä palautetaan ja nostetaan sekoitusvirtauksen määrää, voitaisiin päästä tilanteeseen, jossa sekoittuminen on parempaa sekä sivuttais- että pitkittäissuunnassa kuin perustapauksessa”, kirjoittaa Etteplanin asiantuntija. Kehitystyö suuttimen kanssa jatkuu Wetendin toimesta.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences

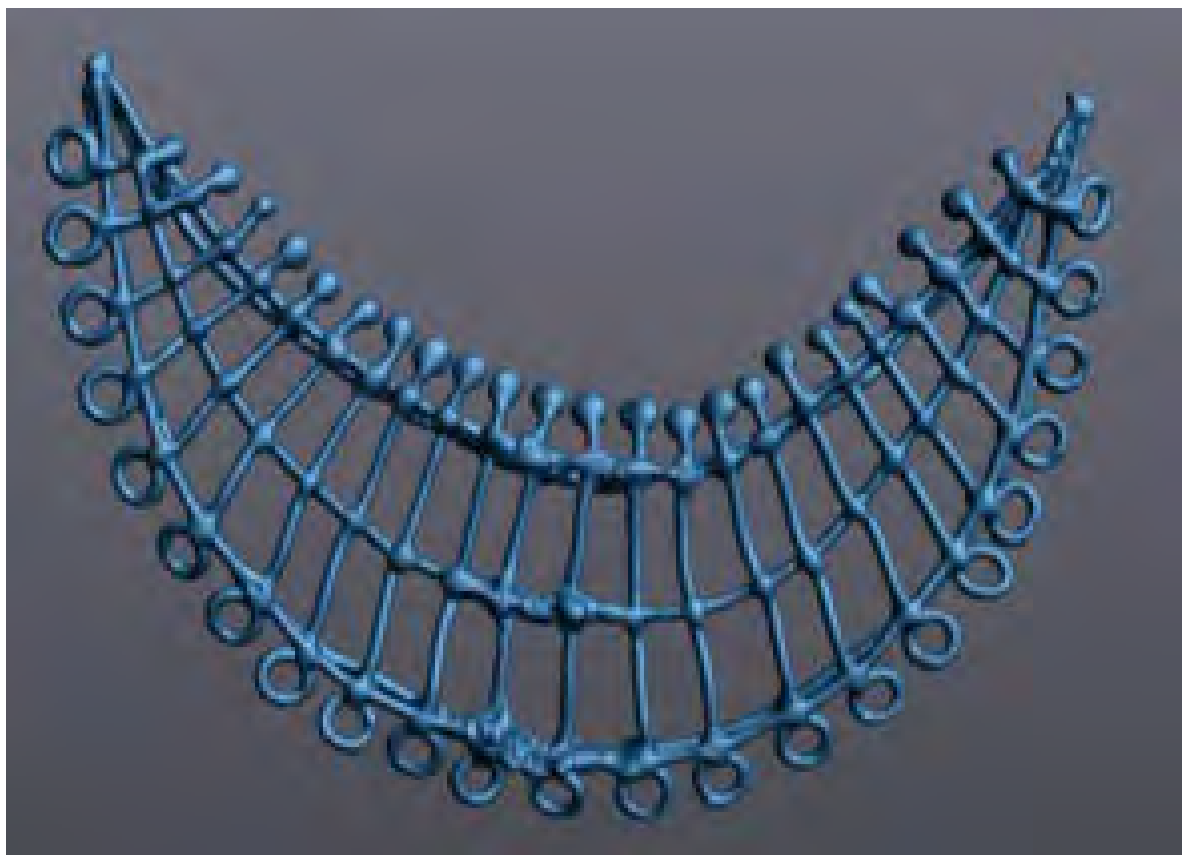


Aalto-yliopisto

3.6.3 Lavastekorut (Oopperajuhlat)

Lähtökohtana olivat 70-luvulla suunnitellut Taikahuilu -oopperan näyttelijän korut. Alun perin ne oli valmistettu tinasta. Alkuperäisissä koruissa on murtumia, joita on korjattu paljon vuosien varrella. Tavoite oli kokeilla, onnistuuko korut 3D-skannata ja tulostaa muovista siten, että lopputulos kestäisi käyttöä ja näyttäisi hyvältä. Varsinkin 3D-skannaustehtävä tiedettiin jo etukäteen vaativaksi, sillä skannaamalla saatu malli jää vajaaksi ja tämä on korjattava digitaalisesti käsityönä.

Hankkeen puitteissa 3D-skannattiin yksi koru (Kuva 30), muokattiin sen mallia ja 3D-tulostettiin kilpailutetulla alihankkijalla (Materflow Oy) SLS-jauhepetimenetelmää käyttäen onnistuneesti. Skannatusta korusta on siistitty alkuperäisessä korussa korjattuja kohtia sekä korjattu mahdolliset rikkoontuneet kohdat. Oopperajuhlat toteutti tämän saman prosessin omalla kustannuksellaan kaikille (10 kpl erilaisia) Taikahuilu oopperan koruille ja uudet muoviset versiot olivat käytössä metallinvärisiksi maalattuina ja esiintyjien vaatteisiin ommeltuina Savonlinnan oopperajuhlissa kesällä 2023.



Kuva 30. 3D-skannattu Taikahuilu -oopperan näyttelijän koru (Kuva: Eetu Huttunen).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Toisena sovelluskohteena oopperajuhlille tulostettiin Nabucco oopperaan lavasteeksi tulevan kaulakorun runko. Koru tulostettiin Asiga PRO 4K nestehartsitulostimella Loctite 3172 materiaalista (Kuva 31)



Kuva 31. 3D-tulostettu Nabucco -oopperan kaulakoru (Kuva: Mikko Nykänen).

Historiassa yksi ensimmäistä sovellusalueista nestehartsitulostimille ovat olleet juurikin korujen tulostus, jonka vuoksi sitä haluttiin demonstroida. Oopperajuhlat jälki työsti korun maalaamalla ja lisäämällä keskelle koristekiven ja ripustusketjun (Kuva 32).



Kuva 32. Valmis jälkikäsitelty kaulakoru (Kuva: Oliver Eagle-Wilsher).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.6.4 Stanssaustyökalu (Riitek)

Tavoitteena oli toteuttaa stanssaustyökalukotelo särmäimeen uudelleensuunnitteleamalla ja 3D-tulostamalla sellainen hiilikuitulujitteisesta polyamidista (PA). Alkuperäinen versio on terästä ja toteutettu perinteisiä metallin työstömenetelmiä käyttäen. Työkalukoteloon kiinnitetään ohutlevyyn stanssattava merkkijono metallisista irtostanssimerkeistä. Särmäin käyttää puristusvoimaa stanssauksessa tietyllä kirjainyhdistelmällä noin yhdeksän tonnia.

Elektroniikan tehtaalla 3D-tulostettiin kahta eri mallia testiin Riitekille (Kuva 33). Toinen vastasi alkuperäistä versiota sillä erotuksella, että irtomerkkien takapintaa vasten muokattiin ura 5 mm teräsvahvikkeelle. Teräsvahvikkeen tarkoitus on jakaa 3D-tulostettuun koteloon kohdistuva puristusvoima suuremmalle pinta-alalle. Toisessa versiossa pyrittiin säästämään 3D-tulostusmateriaalia keventämällä rakennetta, jonka takia lisättiin myös ura 5 mm teräksiselle pystytuelle. Molemmissa 3D-tulostusmateriaalina käytettiin Onyxiä. Valmiisiin tulosteisiin lisättiin kierreinsertit joihin kierrettyillä ruuveilla irtomerkit kiinnitetään koteloon.



Kuva 33. Stanssaustyökalukotelo särmäimeen (Kuva: Mikko Nykänen).



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

3.6.5 Puomimikin mikkipään kotelon osat (Savox)

Tutkimuskohteessa testattiin muovista 3D-tulostettujen ruiskuvalumuottien soveltuvuutta ja kestävyyttä pienten ruiskuvalukappaleiden valmistuksessa. Ruiskuvalukokeet tehtiin Elektroniikan 3K-tehtaalle hankitulla Babyplast 6/10VP ruiskuvalukoneella. Muotit tulostettiin Asiga PRO 4K DLP nestehartsitulostimella käyttäen materiaalina Formlabs Rigid 10k lasikuituvahvisteista fotopolymeeria. Ruiskuvalumateriaaleina käytettiin HDPE ja PA6GF30 polymeereja.

Ruiskuvalutestaukseen valikoitui Savoxin toimesta puomimikin mikkipään kotelo, joka koostuu kahdesta erillisestä osasta. Kappaleiden dimensiot ja tilavuudet ovat käytössä olevalle ruiskuvalukoneelle sopivat. Kappaleiden tilavuudet ovat 0.9 ja 2.2 cm³, kun ruiskutusmännän koon perusteella määräytyvä maksimitilavuus valettavalle kappaleelle on 9 tai 15 cm³. Lisäksi kappaleiden geometrioista löytyy sopivan haastavia yksityiskohtia testaamaan muovimuottien suorituskykyä.

Muottien suunnittelu

Ruiskuvalumuotit suunniteltiin Babyplast 6/10VP koneelle hankittuun alumiiniseen muottirunkorakenteeseen, jota käytettäessä 3D-tulostettavan muotin puolikkaiden xy-mitat ovat 85.5x95.75 mm ja paksuus 6, 9, 12 tai 15 mm riippuen valmistettavan kappaleen paksuudesta. Eri paksuisten muottien käyttö on mahdollista erillisten shimmilevyjen avulla. Tarkoitus on säästää muottimateriaalia, jos ruiskuvalettava kappale on matala.

Kotelon A osassa haasteena on, että rakenne ei ole luonnostaan päästävä. Asia ratkaistiin erillisellä inserttiosalla, joka irrotetaan manuaalisesti valetusta kappaleesta varsinaisen ruiskuvalun jälkeen. Insettiosat tulostettiin samasta Formlabs Rigid 10k materiaalista kuin varsinaiset muotin puolikkaat.

Kotelon B osa on geometrialtaan huomattavasti yksinkertaisempi kuin A osa. Valukanava on viety muotin puolikkaiden jakolinjan (parting line) yläpuolelle, jotta kappale voidaan valaa yhtä valukanavaa käyttäen. Muotti-inserttien paksuudeksi valittiin kappaleen paksuuden mukaan 6 mm.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Ruiskuvalukoe 1

Ruiskuvalukokeet aloitettiin pienemmästä kappaleesta eli kotelon B osasta. Ruiskuvalumateriaaliksi valittiin HDPE (HMA025), jonka ruiskuvalulämpötila on suhteellisen matala ja ruiskuvalun kannalta helppo materiaali. Matalan lämpötilan tiedettiin etukäteen olevan eduksi muotin kestoille.

Kappaleita valettiin kaikkiaan 57kpl mukaan lukien harjoituskappaleet, joilla haettiin optimaaliset ruiskuvaluparametrit kuten ruiskutusaineet ja pitoajat, ruiskutusnopeus, annoskoko, puristusaine, jäähdytysaika ja lämpötilat.

Merkittävin havainto kokeissa oli muotin jäähtymisen merkitys. Jos valettiin useita kappaleita nopealla syklillä peräkkäin, alkoi ilmataskuja jälleen muodostua. Jos muottia jäähdytettiin ja/tai annettiin jäähtyä valujen välissä ei ilmataskuja muodostunut. Käytössä oli myös muotin sisäinen paineilmajäähdytys, mutta yksistään se ei riittänyt. Muottimateriaalin heikosta lämmönjohtavuudesta johtuen sisäisen paineilmajäähdytymisen merkitys on todettu melko pieneksi.

Lisähaasteena valuissa (myös kaikissa myöhemmissä valukokeissa) oli purseet jakotasossa. Purseen määrää saatiin pienennettyä säätämällä annoskoko, mutta purseita ei saatu kokonaan poistettua. Todennäköisin syy oli, että muotin puolikkaat eivät painuneet riittävän tiukasti toisiaan vasten puristuksen aikana. Puristusaineen kasvattaminen ei vaikuttanut oleellisesti purseen määrään, joten on todennäköistä, että alumiininen muottikehys ottaa puristusaineen vastaan muovisten muottiosien sijaan.

Ruiskuvalukoe 2

Kokeita jatkettiin HDPE materiaalilla haastavammalla kotelon A osalla. Ennen valuja muotin puolikkaat ja erilliset muotti-insertit käsiteltiin Marbocote 277-CEE muotin irrotusaineella, koska oletuksena oli, että valettava kappale saattaa tarttua muottiin kiinni ja toisaalta pyrittiin vähentämään muotin erittäin ohuisiin hammasmaisiin rakenteisiin kohdistuvaa rasitusta.

Kappaleita valettiin kaikkiaan 17kpl. Muotin kiinteästä alaosaan katkesi ensimmäisiä "hampaita" kolmen onnistuneen valun jälkeen. Muotin kappaleet jäivät kiinni valettuihin kappaleisiin. Valukokeita jatkettiin tästä huolimatta, jotta voitiin säätää muut ruiskuvaluparametrit optimaaliseksi ja testata erillisen valuintertiosan toimivuutta.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

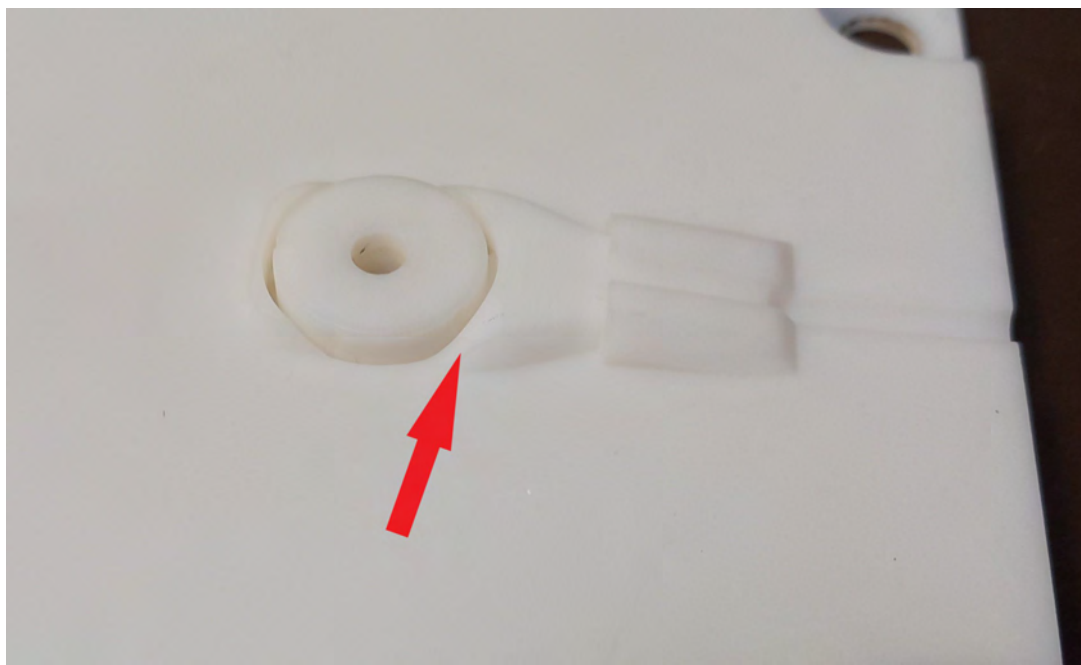
Inserttiosa poistettiin valetusta kappaleesta välittömästi valun jälkeen pihdeillä vetämällä kohtuullisen suurella voimalla. Mikäli kappale ehti jäähtyä, vaikeutui insertin poisto kappaleesta entisestään.

Kokeessa valetuissa kappaleissa ei esiintynyt juurikaan ilmataskuja, koska parametrit säädettiin heti aluksi edellisessä kokeessa saatujen kokemusten perusteella. Valetuissa kappaleissa oli purseita jakolinjassa vastaavalla tavalla kuin ensimmäisessä kokeessa.

Ruiskuvalukoe 3

Kolmannessa kokeessa valettiin kotelon B osaa. Materiaali vaihdettiin HDPE:stä korkeamman lämpötilan vaativaan PA6GF30 (Tecomid NB40 GR30 NL HS NAT) polymeeriin, jossa PA6 polymeerin seassa on 30% lasikuitua. Muottina käytettiin samaa kuin kokeessa 1, koska muotti oli ehjä. Muotin puolikkaat käsiteltiin aluksi Marbocote 277-CEE irrotusaineella. Ruiskutuslämpötilana käytettiin 270°C.

Kappaleita valettiin kaikkiaan 22kpl, kunnes muotista irtosi pieni palanen. Kappaleet irtosivat hyvin muotista ejektorin avulla ja muotti saatiin täyttymään hyvin. Purseita esiintyi jakolinjassa, jopa enemmän kuin HDPE materiaalilla.



Kuva 34. Muotin kiinteästä puolikkaasta lohkesi palanen kaikkiaan 79 kpl valmistuksen jälkeen. (Kuva: Mikko Nykänen).



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Ruiskuvalukoe 4

Viimeisessä kokeilussa valettiin kotelon A osaa PA6GF30 materiaalilla. Käytössä oli jo kokeessa 2 vaurioitunut muotti. Kappaleita valettiin 3 kpl.

Valussa kappaleeseen uppoavan insertitappiosan irrotus osoittautui mahdottomaksi. PA6GF30 materiaali on huomattavasti jäykempää kuin HDPE, joka vaikeuttaa irrotusta. Lisäksi korkeampi valulämpötila haurastutti insertitappia, jonka seurauksena tappi katkesi joka kerralla valetun kappaleen juuresta yritettäessä irrottaa pihdeillä. Kappale irtosi muotista hyvin, kun muissakin valukokeissa.

Savoxin ruiskuvalettaviksi tarjoamat kappaleet osoittautuivat tarkoituksenmukaisiksi kokeita varten. Kokeissa tuli esille muovimuottien käyttöä rajoittavia asioita ja saatiin suuntaa antavaa tietoa muottien eliniästä. Kokeissa tehtyjä havaintoja jatkotutkimusajatuksineen:

- Muottien jäähditys. Muovimuotin pintalämpötila nousee nopeasti valettaessa useampi kappale nopealla syklillä. Tästä aiheutuu mm. ilmataskuja valettaviin kappaleisiin. Tästä ja yleisesti muista havainnoista voidaan päätellä, että matalammat lämpötilat niin muotissa kuin materiaalissa ovat eduksi muovimuoteilla valettavan kappaleen onnistumisen sekä muotin keston kannalta.
- Purseet jakolinjassa. Purseita esiintyi jokaisessa valukokeessa. Jatkossa kokeiltava muottiosien paksuntamista siten että muotin puolikkaat istuvat paremmin toisiaan vasten.
- Muotin mekaaninen kesto. Kapeat ja korkeat yksityiskohdat muotissa lyhentävät elinikää oleellisesti. Tämä on havaittavissa verrattaessa kotelon A ja B osien yhteensä valettujen kappaleiden lukumäärää 20 vs 79 kpl. Joissain tapauksissa kappaleen suunnittelulla voidaan vaikuttaa muotin kesto.
- Valettavien kappaleiden pinnanlaatu. Kappaleissa näkyy selvästi muotin epätasaisuudet, jotka johtuvat 3D-tulostuksen kerroksittaisesta rakenteesta. Pinnanlaatua voidaan parantaa käyttämällä 3D-tulostuksessa matalampaa kerroskorkeutta tai muotin jälkikäsitteilyllä.
- Erillinen muotin inserttiosa. Inserttiosa juuttuu tiukasti valettavaan kappaleeseen. Kappaletta voisi esimerkiksi pidentää ja pinnoittaa sopivalla lämpöä kestäväällä aineella irrottamisen helpottamiseksi. Jossain tapauksissa inserttiosan voi 3D-tulostaa veteen liukenevasta materiaalista, jolloin inserttiosan saa poistettua



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

veteen liottamalla. Yhtenä mahdollisuutena on hyödyntää Babyplast ruiskuvalukoneen core pull toimintoa, jolloin inserttiosa voidaan irrottaa valettavasta kappaleesta kuumempuna muotin ollessa vielä kiinni. Tämä vaatisi kuitenkin muutoksia alumiiniseen muottirunkoon.

3.7 TP7. Projektin hoito ja tiedottaminen

Hankkeen alussa Xamk suunnitteli hankejulisteen sekä sovellus- että laitehankkeesta (Kuva 35). Aalto yliopisto suunnitteli myös hankejulisteen (Kuva 36). Lisäksi suunniteltiin roll-up mm. tapahtumissa hankkeen näkyvyyden lisäämiseksi (Kuva 37).

Hankkeen Xamkin kotisivut löytyvät www.xamk.fi/ambio ja Aallon kotisivut [linkistä](#).



Vauhtia ja uusia biomateriaaleja lisäävään valmistukseen

AMBIO -hankkeen tavoitteena on edistää yritysten uusia liiketoimintoja sekä alueellisella että kansallisella tasolla. Tämä toteutetaan vahvistamalla toimijoiden tarvitsemää osaamista

lisäävässä valmistuksessa Etelä-Savossa ja koko Suomessa. Hankkeessa nopeutetaan 3D-tulostusta ja kehitetään uusia bio- ja puupohjaisia materiaaleja sekä kierrätystä.

Laitteita 3D-tulostukseen rakeista myös isossa mittakaavassa

AMBIO-laiteprojektin tavoitteena on vahvistaa Etelä-Savon kokeellista materiaalitutkimusta lisäävän valmistuksen alalla. Investointien kohteena on suuren mittakaavan 3D-tulostus bio- ja kiertotalousmateriaalien hyödyntämisessä ja valmistuksessa.

Hankkeessa toteutettava laitekoneistus tuo maakuntaan kansainvälisen tason työkalut selluloosamateriaalien, biokomposiittien- ja kiertotalouden materiaalien jalostamisen kokeelliseen tutkimukseen ja yritys yhteistyöhön.

AMBIO - Lisäävän valmistuksen teknologioilla
kilpailukykyä alueelliselle biotalous- ja teknologiaklusterille

Hankkeen kesto: 01.08.2022 - 31.01.2024
Lisätietoja: www.xamk.fi/ambio

Rahoittaja: Etelä-Savon maakuntaliitto, Xamk, Aalto ja yhteistyöt yritykset



AMBIO Laiteprojekti

Hankkeen kesto: 01.08.2022 - 31.01.2024
Lisätietoja: www.xamk.fi/ambio

Rahoittaja: Etelä-Savon maakuntaliitto, Xamk ja Savonlinnan kaupunki



Kuva 35. Xamkin AMBIO hankkeiden julisteet. (Kuva: Mikko Nykänen).



Euroopan unionin osarahoittama



A!
Aalto University
School of Chemical
Engineering

Additive manufacturing technologies for the regional bio economy cluster – AMBIO

Mahyar Pazzali, Tirtha Gupta, Ville Kokkonen, Juha Lipponen
Department of Process and Energy, Aalto University, Finland

Abstract

Due to their enormous potential for weight savings in a variety of applications, ultralight sandwich structures—which combine stiffening parts with a honeycomb core—have attracted a lot of research interest. With an emphasis on improving strength, stiffness, and weight reduction, this study identifies crucial design considerations and validates the structural integrity of the bio-based sandwich panels by meticulously examining parameters like face thickness, core height, panel width, and cell size. These methods are combined with theoretical models integrating homogenized mechanics and classic beam theory. The panels' stiffness and strength are increased by increasing the panel's width, adding a layer of printing core, and enhancing the face material. As the size of the hexagonal cells within the honeycomb core varied, the sandwich panels' strength and stiffness stayed relatively constant. Additionally, a study was done on sandwich panels to evaluate their ultimate load capacity and bending stiffness. The utilization of FEA/COMSOL for analysis provided valuable insights into performance optimization, with implications for the furniture application.

Results

Numerical Model

Stress (MPa)

11.375e+01
11.350e+01
11.325e+01
11.300e+01
11.275e+01
11.250e+01
11.225e+01
11.200e+01
11.175e+01
11.150e+01
11.125e+01
11.100e+01
11.075e+01
11.050e+01
11.025e+01
11.000e+01

Methods and Materials

Biopolymer
Epoxy containing MWC

Cell Size-13 Cell Size-27 Cell Size-36 Cell Size-45 Cell Size-63

Conclusions

The integration of experimental testing and finite element analysis (FEA) provided a comprehensive understanding of the mechanical properties of honeycomb sandwich panels. These evaluations facilitated the development of a uniquely designed chair, which surpasses traditional plywood counterparts in both weight reduction and stiffness.

Contact

Mahyar Pazzali, Ph.D.
Postdoctoral Researcher
School of Chemical Engineering
Biorefinery Technology Group
Juha Chemistry
Box 10500/00010 Aalto
mahyar.pazzali@aalto.fi

European Union
Euroopan unionin
osarahoittama

Etelä-Savon
maakuntaliitto

XAMK
Keskilä-Suomen
ammattikorkeakoulu

A!
Aalto-yliopisto
Aalto University

Kuva 36. Aallon AMBIO hankkeen juliste. (Kuva: Juha Lipponen).



Kilpailukykyä 3D-tulostuksella

Hankeparissa vahvistetaan yritysverkostojen tarvitsemää osaamista lisäävässä valmistuksessa.

Tavoitteet:

- Edistää uusia biotalouden ja teknologiaklusterin liiketoimintoja.
- Fossiilisten raaka-aineiden korvaaminen puulla ja muilla biomateriaaleilla.
- Lisätä muovien ja komposiittien kierrätystä.
- Nopeuttaa prototyypeistä sarjatuotantoon siirtymistä teknologioita yhdistämällä.

AMBIO – Lisäävän valmistuksen teknologioilla kilpailukykyä alueelliselle biotalous- ja teknologiaklusterille

www.xamk.fi/ambio



Euroopan unionin
osarahoittama



Kuva 37. AMBIO- hankeparin roll-up kuvana. (Kuva: Ilkka Vanttaja).



Euroopan unionin
osarahoittama



Ohjausryhmä

Hankkeen etenemisestä raportoitiin säännöllisesti hankkeen ohjausryhmälle. Ohjausryhmän kokouksia pidettiin viisi kappaletta 15.2.23, 11.5.23, 13.9.23, 14.12.23 ja 8.5.24. Hankkeen lopussa ohjausryhmän yritysedustajille tehtiin palautekysely. Vastauksia saatiin 5 kpl, kun yhteistyöyrityksiä oli kaikkiaan 10kpl.

Vastauksien keskiarvot (maksimi 5):

- Projektin hallinta ja sujuvuus
 - Aikataulun pitäminen 4,0
 - Projektin osallistujan ajan tasalla pitäminen 3,4
- Henkilökunta
 - Hankehenkilöiden asiantuntemus ja ammattitaito 4,0
 - Palvelualttius ja reagointi asiakaspalautteisiin 3,8
- Yhteistyön tulokset
 - Projektin hyödyllisyys suhteessa osallistujan omaan panokseen 3,8
 - Tulosten sovellettavuus 3,8
 - Tulosten esittäminen 4,0

Kyselyn lopussa oli mahdollisuus vapaamuotoiseen kommentointiin, johon saatiin yksi kommentti: ”Hyviä projekteja ja yhteistyötä tuotekehityksen edistämiseen”.

Palaute oli pääsääntöisesti hyvää. Heikoin arvio saatiin projektien osallistujien ajan tasalla pitämisestä. Hankkeen aikana tiedotus tapahtui pääasiassa ohjausryhmän kokouksien välityksellä. Projektiin osallistujia olisi voitu informoida useammin esimerkiksi sähköpostitiedotteilla.

Julkaisut

AMBIO hankkeen aikana valmistui julkaisu edellisen 3D-tulostus aiheisen AMAP hankkeen tuloksista:

Tutkimusjulkaisu. Materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet ja sovellukset alueellisessa teknologiaklusterissa



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Vanttaja, Ilkka ; Nykänen, Mikko ; Huttunen, Eetu ; Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ; South-Eastern Finland University of Applied Sciences 2023

Saatavissa:

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-467-6>

Tapahtumat

Tapahtumat, joissa mukana Xamkin AMBIO-henkilökuntaa, AMBIO-standi, roll-up ja/tai postereita:

- Noheva "Get together" 6.9.2022, Savonlinna, Aalto mukana
- Tampereen alihankintamessut 27.-29.9.22
- Nohevan Avoimet ovet 6.6.2023, Savonlinna, Aalto mukana
- Fibertech 2023-päivät 23.-24.8.23, Savonlinna, Aalto mukana
- Tech Runway 2023 –drone/UAV-tapahtuma 31.8.2023 Helsinki East Aerodromes
- Tampereen alihankintamessut 26.–28.9.2023
- Teollisen puurakentamisen laboratorion avajaiset 25.1.2024
- Teollisen puurakentamisen laboratorion yritysavajaiset 24.5.2024



Kuva 38. Eetu Huttunen kertomassa AMBIO hankeparista teollisen puulaboratorion yritysavajaisissa 24.5.2024 (Kuva: Mikko Nykänen).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



**South-Eastern Finland
University of Applied Sciences**



Aalto-yliopisto

4 YHTEENVETO

EAKR –rahoitteisissa AMBIO ryhmähankkeessa ja AMBIO laite investointihankkeessa jatkettiin alueellisen teknologiaklusterin tukemista 3D-tulostuksen haltuunotossa ja hyödyntämismahdollisuuksien kartoituksessa. Hankkeessa täydennettiin Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaalle Savonlinnaan aikaisemmassa AMAP-hankeparissa (2020-2021) rakennettua 3D-tulostuksen PILOT –ympäristöä kaikkiaan kolmella erilaisella laitteistolla. Täydennetty laitekanta mahdollistaa entistäkin laajempialaisesti erilaisten ideoiden ja innovaatioiden testaamisen käytännössä. Merkittävimpänä uutena tutkimusalustana on suuren mittakaavan 3D-tulostuslaitteisto.

Lisäävän valmistuksen muovit ja komposiitit ovat kehittyneet teknisiltä ominaisuuksiltaan siten, että niille löydetään jatkossa yhä enemmän käyttöä myös lopputuotteissa. Materiaalien bioperäisyyteen ja kierrätettävyyteen panostettiin hankkeessa ensimmäisten omien materiaalin sekoituskokeiden aloituksen merkeissä. Myös suurten kappaleiden tulostus bio- ja puupohjaisten materiaalien osalta vaikuttaa lupaavalta kehityssuunnalta.

Hankkeessa todistettiin, että prototuotannosta sarjatuotantoon siirtymää on mahdollista tehostaa niin kustannusten kuin aikataulun kannalta hyödyntämällä kahden erillisen valmistusteknologian etuja. Toisaalta suuren mittakaavan 3D-tulostus on mahdollinen tulevaisuuden tuotantomenetelmä erityisesti bio- ja kierrätysmateriaaleista valmistetuille, pieniin sarjakokoihin, pitkälle jalostettuihin ja asiakaskohtaisesti kustomoituihin tuotteisiin.

Lukuisat koe-esimerkit, joita yritykset ovat PILOT –ympäristöön tuoneet testattavaksi, kannustavat jatkamaan tutkimusta ja kehitystyötä 3D-tekniikan parissa paikallisten yritysten tarpeiden pohjalta.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

LÄHTEET

Farooque R, Asjad M, S.J.A. Rizvi. 2021. A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review. *Materials Today: Proceedings*, Volume 43, Part 1. ISSN 2214-7853, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.967>.

Holmblom, B. 2011. Extraction and utilisation of non-structural wood and bark components. Teoksessa Alen, R. (toim.) *Papermaking science and technology*. Book 20, *Biorefining of forest resources*. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja Puu, 176–224.

Korpinen, R., 2023. Suberin fatty acids and triterpenoids from birch outer bark. Luonnonvarakeskus. Powerpoint-diasarja. Päivitetty 30.5.2023. Saatavissa: <https://www.univ-reims.fr/media-files/48578/risto-korpinen.pdf> [viitattu 15.1.2024].

Mather, R.R. & Wardman, R.H. 2011. *The Chemistry of Textile Fibres*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.

Pinto, P.C.R.O., Sousa, A.F., Silvestre, A.J.D., Neto, C.P., Gandini, A., Eckerman, C. & Holmbom, B. 2009. Quercus suber and Betula pendula outer barks as renewable sources of oleochemicals: A comparative study. *Industrial Crops and Products* 29 (1), 126-132. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.015>.



Euroopan unionin
osarahoittama



Etelä-Savon
maakuntaliitto



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

LYHENNE- TERMILUETTELO

2D Stylus:	Kauppanimi, pinnankarheuden profilometri
3D:	Kolmiulotteinen
3K:	Koulutus, kehitys ja koetuantanto
AMBIO:	Lisäävän valmistuksen teknologioilla kilpailukykyä alueelliselle biotalous- ja teknologiaklusterille -hankepari
AMT:	Additive Manufacturing Technologies Ltd (yritys)
Andritz:	Andritz Oy Kuitulinja (yritys)
ASA:	Acrylonitrile styrene acrylate eli akrylinitriilistyreeniakryyliesteri, muovilaji
Asiga:	3D-tulostimia valmistava yritys
Babypplast:	Kauppanimi, ruiskuvalukone
CNC:	Computer Numerical Control, numeerinen ohjaus
Discovery:	Kauppanimi, suuren mittakaavan 3D-tulostin
DLP:	Digital Light Processing, allasvalopolymerisaatiomenetelmä
DMA:	Dynamismekaaninen-termoanalyysi
DUAL:	Kaksinkertainen, 3D-tulostimen nimessä viittaa kahteen erilliseen tulostuspäähän
Durasense:	Kauppanimi, biomuovikomposiitti (50 % PP + 50 % puuta)
ePACF:	Polyamidifilamentti, jossa on 20 % hiilikuituja
Etteplan:	Teknologiapalveluyritys
FFF:	Fused filament fabrication eli lankatulostus
FGF:	Fused granulate fabrication eli pellettitulostus
Formi 3D:	Puumuovikomposiitti (20 % selluloosaa ja 80 % polylaktidia)
HDPE:	High Density Polyethylene, polyeteenimuovilaji
HSS:	High Speed Sintering on 3D-tulostustekniikka
Kevlar:	Aramidikuituihin kuuluvan synteettisen kuidun polyparafenyleenitereftaalamidin kauppanimi
Loctite 3172:	Kauppanimi, hyviä mekaanisia ominaisuuksia omaava harts
Loctite IND147:	Kauppanimi, korkeaa lämpötilaa kestävä harts
Materflow:	3D-tulostusteknologian palveluntarjoaja, yritys



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



**South-Eastern Finland
University of Applied Sciences**



Aalto-yliopisto

MCC:	Microcrystalline cellulose, mikrokiteinen selluloosa
MicroCT -kuvaus:	Röntgentietokonetomografia -menetelmä
MJF:	Multi Jet Fusion on teollinen 3D-tulostusprosessi
Onyx:	Kauppanimi - polyamidia, jossa on hienonnettua hiilikuitua
PA:	Polyamidi, muovilaji
PA6GF30:	Polyamidimuovilaatu, jossa on 30 % lasikuitua seassa
PA2200:	Polyamidimuovilaatu
PC:	Polykarbonaatti, muovilaji
PEI:	Polyeetteri-imidi on korkealujuuksinen polymeeri
PES:	Polyesteri, synteettinen tekstiilikuitu
PET:	Polyeteenitereftalaatti, muovilaji
PETG:	Polyeteenitereftalaattiglykoli (PETG) on PET:n amorfinen muunnelma
PLA:	Polylaktidi eli polymaitohappo on uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava termoplastinen alifaattinen polyesteri
POSTPRO SF50:	Kauppanimi, 3D-tulosteiden jälkikäsittelylaite
PP:	Polypropeeni
PRO:	Ammattimainen, 3D-tulostimen nimessä ”teollinen”
PUR:	Polyuretaani
Ra:	Pinnankarheuden keskipoikkeama
Riitek:	Ohutlevytuotteiden leikkaukseen ja jatkojalostukseen erikoistunut yritys
Rigid 10K Resin:	Kauppanimi, erittäin luja muovimuottimateriaali
rPET:	Recycled polyethylene terephthalate, kierrätetty polyetyleenitereftalaatti
Savox:	Viestintäratkaisuja valmistava yritys
SLS:	Selective Laser Sintering, muovien 3D-tulostusmenetelmä
Technomelt PA 6208N:	Kauppanimi, termoplastinen muovi muovaussovelluksiin
TP:	Työpaketti hankkeessa
TPE:	Termoplastinen elastomeeri
TPU:	Termoplastinen polyuretaani
TrumpJet:	Kauppanimi, kemikaalisekoitin
Tumaker:	Kauppanimi, granulaattien 3D-tulostin
Ultem 1010:	Kauppanimi, kestmuovinen polyeetteri-imidi



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

UPM: United Paper Mills, UPM-Kymmene Oyj
VP: Vertical plunger, pystysuora mäntä
Wetend: Valmistaa investointituotteita paperi- ja kartonkiteollisuudelle
Woodly: Kauppanimi, puuselluloosamuovi



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

LIITE 1 - MATERIAALITESTAUSRAPORTTI



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences



Aalto-yliopisto

Materiaalitestaukset

AMBIO-hanke

Sisällys

1. Testitulokset.....	3
2.1 Vetolujuus	3
2.1.1. Vetolujuuden testitulokset	3
2.1.1 Vetolujuustestien koekappaleet.....	5
2.2. Taivutuslujuus	11
2.2.1 Taivutuslujuuden testitulokset	11
2.2.2 Taivutuslujuustestien koekappaleet.....	13
2.3. Puristuslujuus.....	20
2.3.1 Puristuslujuuden testitulokset.....	21
2.3.2 Puristuslujuustestien koekappaleet	33
2.4. Pinnankarheus	35
2.4.1 Pinnankarheustestin testitulokset.....	38
2.5 Iskulujuus.....	43
2.5.1 Iskulujuuden testitulokset	43
2.5.2 Iskulujuustestin koekappaleet	45
2.6 Dynaamismekaaninen-termoanalyysi (DMA).....	49
2.6.1 DMA teoriaa.....	49
2.6.2 DMA-testitulokset.....	51
2.7 Sulamislämpötila-alueen määrittäminen (DSC).....	53
2.7.1 DSC teoriaa	53
2.7.2 DSC-testitulokset	54
2.8 MicroCT	55

1. Testitulokset

2.1 Vetolujuus

2.1.1. Vetolujuuden testitulokset

Koestusstandardi ISO 527-1/2.

Huomioita:

- PA6/66 + CF20%
 - XZ-suunnassa PA6/66-sarjan selvästi suurin vetojännitys ja kimmomoduuli
 - ZX-suunta heikoin
- ASA-smartmaterials
 - XZ-suunnassa ASA-sarjan suurin vetojännitys ja kimmomoduuli
 - ZX-suunnassa todella haurasta
- ASA-ruiskuvalettu
 - samanlaiset lujuusarvot kuin ASA-smartmaterials XY- ja XZ-suunnissa
- Rigid 10k -akrylaatti
 - koko koestussarjan paras kimmomoduuli
 - koko koestussarjan toiseksi paras vetojännitys
- Woodly W204C
 - kaikkiin koesarjoihin verrattuna lujuusarvot keskimääräisiä
- PA6 GF 30 %
 - koko koestussarjan toiseksi paras kimmomoduuli
 - koko koestussarjan paras vetojännitys
- Durasense 3D plus 50
 - kaikkiin koesarjoihin verrattuna lujuusarvot keskimääräistä huonompia.

Kimmomoduulin kannalta paras materiaali on **Rigid 10k -akrylaatti**, mutta materiaali ei ole elastinen. Plastisuuden kannalta paras materiaali on **PA6 GF 30 %** (paras vetojännitys).

Taulukko 1. Vetolujuuden koekappaleiden tilastolliset arvot taulukoituna.

Materiaali	Tulostus-suunta		F_{max} (N)	σ_M (N/mm ²)	ϵ_t (%)	E_t (Ext. 1) (N/mm ²)
Esun ePA-CF (PA6/66 + CF20 %)						
n = 6 kpl	XY	Keskiarvo	1546,70	38,0		1796
		Keskihajonta	13,22	0,2		140
		Maksimi	1563,36	38,3		2042
		Minimi	1528,43	37,7		1672
n = 5 kpl	XZ	Keskiarvo	1801,97	43,8	5,27	2683
		Keskihajonta	9,83	0,2		120
		Maksimi	1815,69	44,0	5,27	2798
		Minimi	1793,26	43,5	5,27	2489
n = 6 kpl	ZX	Keskiarvo	1034,20	25,5	7,93	1019
		Keskihajonta	42,67	1,1		51
		Maksimi	1106,24	27,2	7,93	1072
		Minimi	983,51	24,2	7,93	939
ASA-ruiskuvalettu						
n = 6 kpl		Keskiarvo	1576,16	39,7	2,49	2199
		Keskihajonta	48,09	1,37	0,11	103,27
		Maksimi	1663,82	42,3	2,59	2306
		Minimi	1517,49	38,5	2,26	2048
ASA-Smartmaterials						
n = 6 kpl	XY	Keskiarvo	1506,03	37,9	2,61	2038
		Keskihajonta	12,73	0,88	0,04	82,58
		Maksimi	1524,77	38,4	2,68	2123
		Minimi	1490,05	36,1	2,58	1907
n = 5 kpl	XZ	Keskiarvo	1722,33	39,1	2,78	2088
		Keskihajonta	23,69	0,35	0,08	21,1
		Maksimi	1763,25	39,4	2,89	2113
		Minimi	1704,34	38,7	2,68	2064
n = 5 kpl	ZX	Keskiarvo	122,71	2,8	0,28	1050
		Keskihajonta	29,67	0,67	0,1	203,48
		Maksimi	166,15	3,8	0,42	1361
		Minimi	94,33	2,2	0,15	837
Rigid 10k -akrylaatti						
n = 6 kpl		Keskiarvo	2204,54	56,1	0,64	10485
		Keskihajonta	296,57	7,48	0,13	492,45
		Maksimi	2449,01	62,2	0,74	10933
		Minimi	1669,98	42,7	0,4	9789
Woody W204C						
n = 6 kpl		Keskiarvo	1417,24	35,8	1,72	2071
		Keskihajonta	222,13	5,71	0,93	66,63
		Maksimi	1722,8	43,7	2,71	2143
		Minimi	1125,56	28,5	0	1984
PA6 GF 30%						
n = 6 kpl		Keskiarvo	3736,5	94,8	3,64	6160
		Keskihajonta	25,84	0,69	0,2	247,91
		Maksimi	3780,89	96	3,96	6385
		Minimi	3712,71	94	3,47	5823
Durasense 3D plus 50						
n = 6 kpl		Keskiarvo	831,05	21,1	4,28	1928
		Keskihajonta	22,86	0,52	0,49	305,83
		Maksimi	860,45	21,8	4,72	2286
		Minimi	791,6	20,2	3,37	1364

2.1.1 Vetolujuustestien koekappaleet

Alla on esitetty kunkin koesarjan vetokoekappaleiden kuvat ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 1. PA6/6+CF 20 % -koesarjan vetokoekappaleet; tulostussuunta XY.



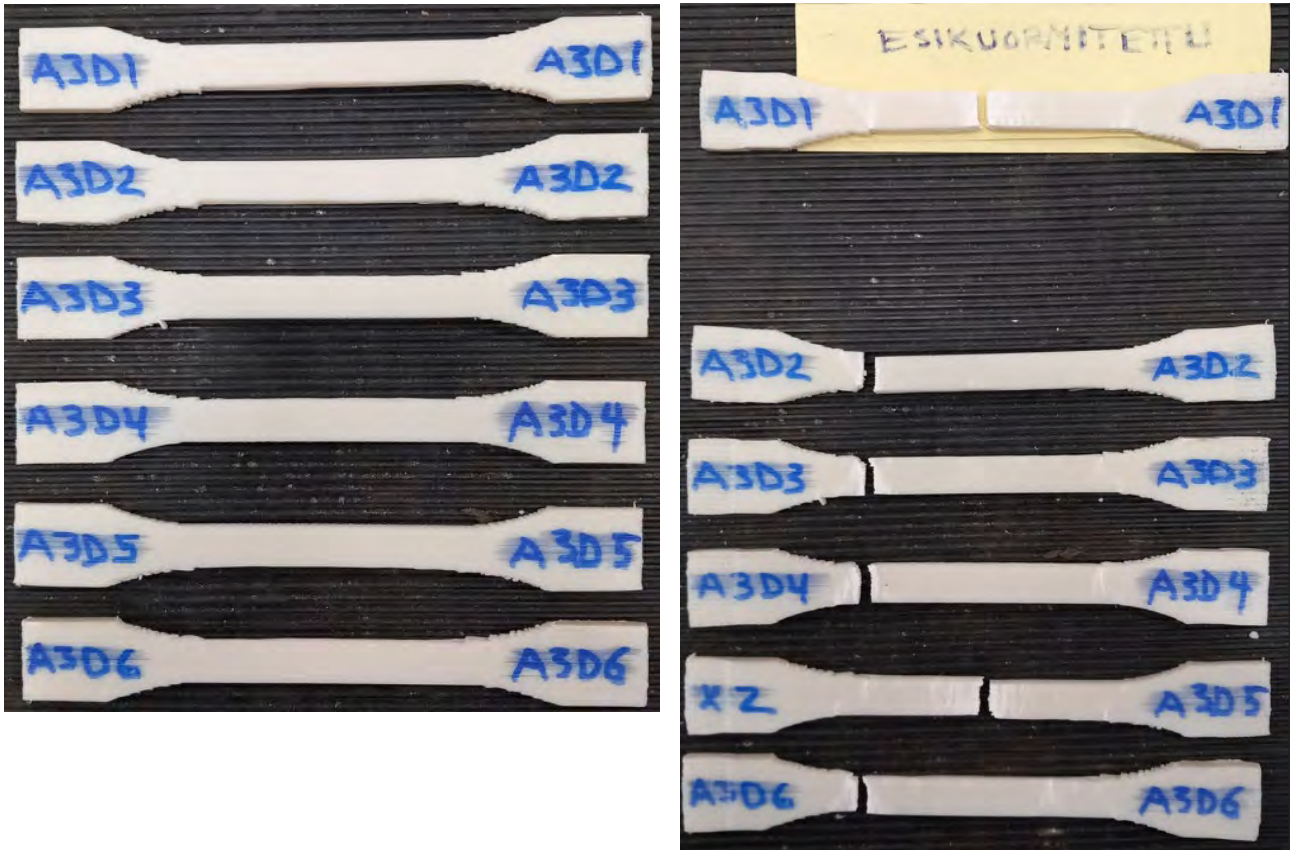
Kuva 2. PA6/6+CF 20 % -koesarjan vetokoekappaleet; tulostussuunta XZ.



Kuva 3. PA6/6+CF 20 % -koesarjan vetokoekappaleet; tulostussuunta ZX.



Kuva 4. ASA 3D-koesarjan vetokoekappaleet; tulostussuunta XY.



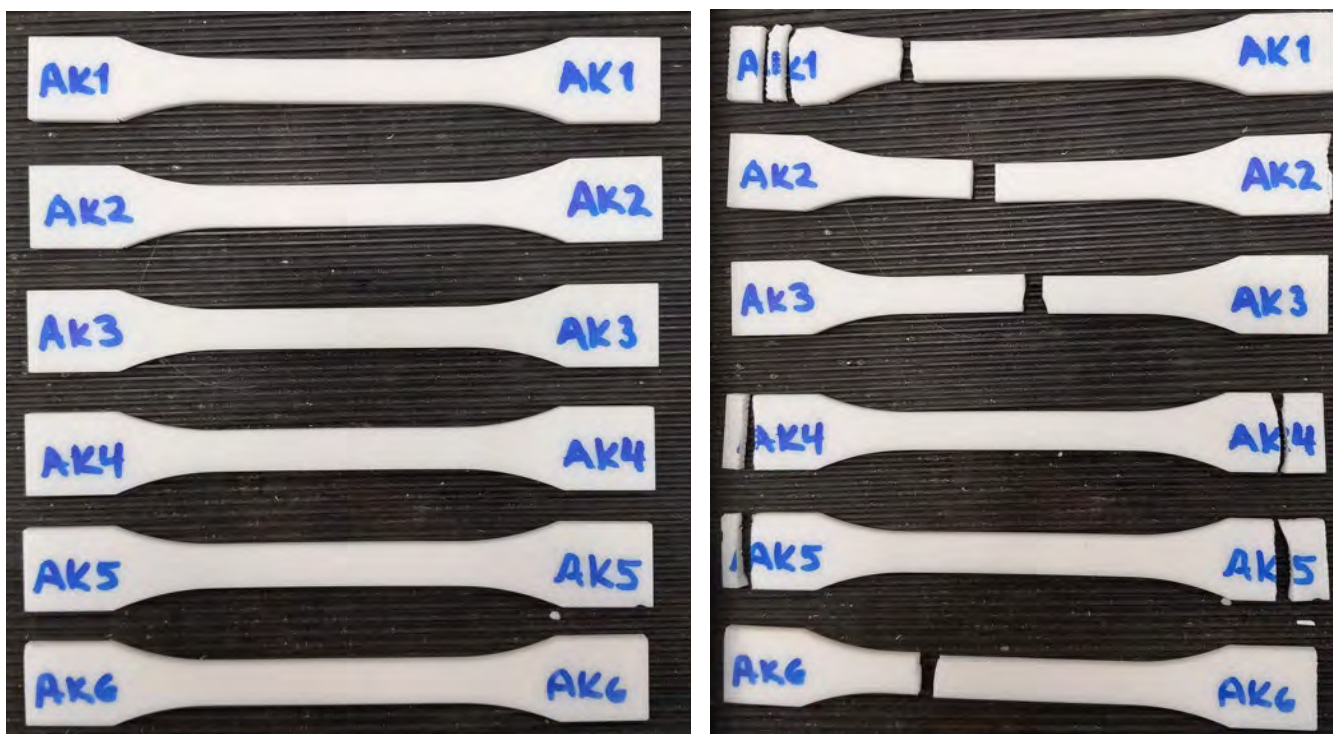
Kuva 5. ASA 3D-koesarjan vetokoekappaleet; tulostussuunta XZ. Kappaleen A3D1-XZ esikuormitus (F) oli liian suuri, joten sen arvot suljettiin pois laskennasta.



Kuva 6. ASA 3D-koesarjan vetokoekappaleet; tulostussuunta ZX. Kappaleen A3D5-ZX luisti puristusleukojen välissä saaden vääristyneet arvot, joten se suljettiin pois laskennasta.



Kuva 7. ASA-ruiskuvallettu-koesarjan vetokoekappaleet.



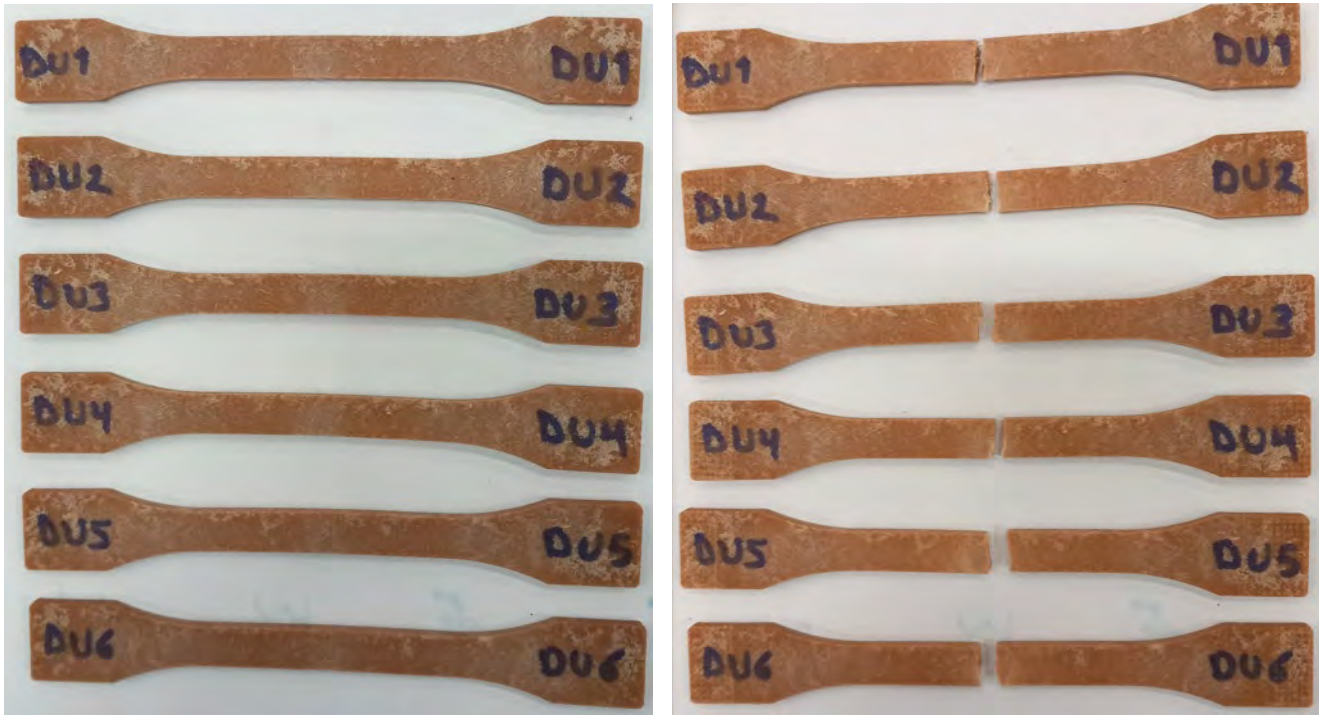
Kuva 8. Rigid 10K akrylaatti-koesarjan vetokoekappaleet.



Kuva 9. Woodly W204C -koesarjan vetokoekappaleet.



Kuva 10. PA6 GF 30 % -koesarjan vetokoekappaleet.



Kuva 11. Durasense 3D plus50-koesarjan vetokoekappaleet.

2.2. Taivutuslujuus

2.2.1 Taivutuslujuuden testitulokset

Koestusstandardi ISO 178.



Kuva 12. Taivutuslujuuden koejärjestelyt 3-pistetaivutuksessa. Kosketuspintojen väli on 64 mm ja yläpainimen ja alatukien kosketuspinnan säde taivutuksessa on 5 mm. Kuormitusnopeus 2 mm/min.

Huomioita:

- PA6/66 + CF20%
 - paras kimmomoduuli XZ-suunnassa, samoin taivutusjännitys
 - tulostussuuntien osalta iso hajonta/suunta
 - ZX-suunnassa lähes elastinen, tosin heikoin kimmomoduuli ja jännitys.
- ASA-smartmaterials
 - tulostussuuntien kimmomoduulit selvästi pienemmät kuin PA6/66-materiaalilla
 - ZX-suunnassa todella haurasta
- ASA-ruiskuvalettu
 - samanlaiset arvot kuin ASA-smartmaterials/XY- ja XZ-suunnissa
- Rigid 10k -akrylaatti
 - koko koesarjan paras kimmomoduuli ja toiseksi paras taivutusjännitys
 - kaikki koekappaleet murtuivat kuormituksessa
- Woody W204C
 - kaikkiin koesarjoihin verrattuna keskimääräiset lujuusarvot
- PA6 GF 30 %
 - suurin taivutusjännitys ja toiseksi paras kimmomoduuli
- Durasense 3D plus 50
 - silmämääräisesti suurin taipuma kuormitustilanteessa ja suurin pysyvä venymä (jäännöstaipuma)

Kimmomoduulin kannalta paras materiaali on **Rigid 10k -akrylaatti**, mutta materiaali ei ole elastinen. Plastisuuden kannalta paras materiaali on **PA6 GF 30 %**.

Taulukko 2. Taivutuslujuuden koekappaleiden tilastolliset arvot taulukoituna.

Materiaali	Tulostus-suunta		F_{max} (N) k.a	σ_{M} (N/mm ²)	ϵ_1 (%)	E_1 (Ext. 1) (N/mm ²)	Taipuman silmämääräinen tarkastelu
Esun ePA-CF (PA6/66 + CF20 %)							
n = 8 kpl	XY	Keskiarvo	102,179	60,9765	6,60518	2591,49	Sitkeää, reilu taipuminen. Ei murtumaa.
		Keskihajonta	1,3459	1,41385	0,12766	96,4312	Taipuman palautuminen suhteellisen hyvä.
		Maksimi	104,412	63,4706	6,79933	2784,66	Jäännöstaipuma (pysyvä venymä) n. 1 mm.
		Minimi	100,291	59,2476	6,44405	2456,2	
n = 6 kpl	XZ	Keskiarvo	148,053	86,283	6,45273	4405,64	Sitkeää, reilu taipuminen. Ei murtumaa.
		Keskihajonta	1,17792	2,39311	0,22287	386,424	Taipuman palautuminen suhteellisen hyvä.
		Maksimi	149,059	88,5476	6,75416	4889,91	Jäännöstaipuma noin 1 mm.
		Minimi	146,544	82,8279	6,11777	3859,76	Hieman isompi jäännöstaipuma kuin Esun XY.
n = 5 kpl	ZX	Keskiarvo	77,5623	44,6853	7,18057	1358,1	Sitkeää, reilu taipuminen. Ei murtumaa.
		Keskihajonta	3,20223	2,20098	0,12395	88,6552	Esun-kappaleista ehkä pienin jäännöstaipuma,
		Maksimi	80,0266	47,117	7,2918	1469,33	alle 1 mm. On siis lähes elastinen.
		Minimi	72,1195	41,2692	6,96953	1229,94	
ASA-ruiskuvalettu							
n = 6 kpl		Keskiarvo	105,872	63,0377	4,55961	2050,51	Sitkeää, ei murtoa.
		Keskihajonta	3,75671	1,40303	0,13681	74,6365	Suurempi taipuma verrattuna Esun-tutkimus-
		Maksimi	108,666	64,942	4,74258	2132,62	kappaleisiin, yli 2 mm. Murtumasäröä veto-
		Minimi	98,6764	61,0839	4,38622	1931,32	pinnalla.
ASA-Smartmaterials							
n = 6 kpl	XY	Keskiarvo	94,4113	60,6482	4,72687	1818,13	Sama tilanne kuten ASA ruiskuvaletuilla.
		Keskihajonta	3,36502	1,43624	0,16505	168,589	
		Maksimi	97,8853	62,1537	4,94402	1976,22	
		Minimi	89,7226	58,6439	4,51546	1504,05	
n = 6 kpl	XZ	Keskiarvo	120,68	55,6202	5,51619	1360,75	Sama tilanne kuten ASA ruiskuvaletuilla.
		Keskihajonta	3,19283	4,65436	0,22209	119,977	Tulostusjälki epätasainen; reunat koholla
		Maksimi	124,973	63,8104	5,71398	1566,35	n. 0,8 mm.
		Minimi	117,123	51,3623	5,0916	1241,17	
n = 4 kpl	ZX	Keskiarvo	4,3247	2,98979	0,98792	345,118	Hauras materiaali. Kappaleet kuormituksen
		Keskihajonta	1,83409	1,2562	0,2957	191,423	jälkeen lähes suoraa.
		Maksimi	5,8008	4,02048	1,29012	531,036	Tulostusjälki epätasainen; puolipympyrän
		Minimi	1,8627	1,30196	0,59251	92,7546	muotoiset epätasaiset sivut.
Rigid 10k -akrylaatti							
n = 6 kpl		Keskiarvo	208,509	128,261	1,35221	11042,5	Ei elastisuutta: ainoana materiaalina kaikki
		Keskihajonta	14,9772	9,12046	0,14206	130,423	koekappaleet murtuivat kuormituksessa
		Maksimi	223,139	137,925	1,50546	11240,1	kahteen osaan.
		Minimi	189,499	116,343	1,17682	10863,8	
Woodly W204C							
n = 6 kpl		Keskiarvo	105,941	65,4179	5,09074	1859,43	4 koekappaletta palautunut lähes suoraksi
		Keskihajonta	0,97459	0,51642	0,07845	22,5385	Yhdessä suurempi kuin 2 mm jäännöstaipuma.
		Maksimi	106,968	66,0842	5,21009	1881,29	Yksi murtunut.
		Minimi	104,733	64,5743	5,0167	1821,91	
PA6 GF 30%							
n = 6 kpl		Keskiarvo	289,98	174,147	5,31448	5861,34	Pitkä kuormitus, ei murtumaa. Kestävää!
		Keskihajonta	2,12354	1,57398	0,17102	69,7958	Taipuman palautuminen suhteellisen hyvä,
		Maksimi	291,922	176,39	5,49825	5961,8	jäännöstaipuma n. 1 mm.
		Minimi	286,202	172,589	5,02462	5775,38	
Durasense 3D plus 50							
n = 6 kpl		Keskiarvo	56,9156	35,4497	5,42128	1957,82	Suuri taipuma ja suurin jäännöstaipuma (pysyvä
		Keskihajonta	1,06077	0,82659	0,38189	45,5384	venymä). Hauras materiaali.
		Maksimi	58,133	36,495	5,84762	2002,3	Yksi koekappale murtui kuormituksessa kahteen
		Minimi	55,3688	34,4129	4,91294	1887,59	osaan.

2.2.2 Taivutuslujuustestien koekappaleet

Alla on esitetty kunkin koesarjan taivutuskoekappaleiden kuvat ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 13. PA6/6+CF 20 % -koesarjan taivutuskoekappaleet; tulostussuunta XY.

Seuraavassa kuvassa on esitetty taivutuskoekappaleen Esun 6 (XY) taipuminen kuormituksessa.



Kuva 14. Esun-koesarjojen koekappaleet kestivät voimakkaan taipuman murtumatta.

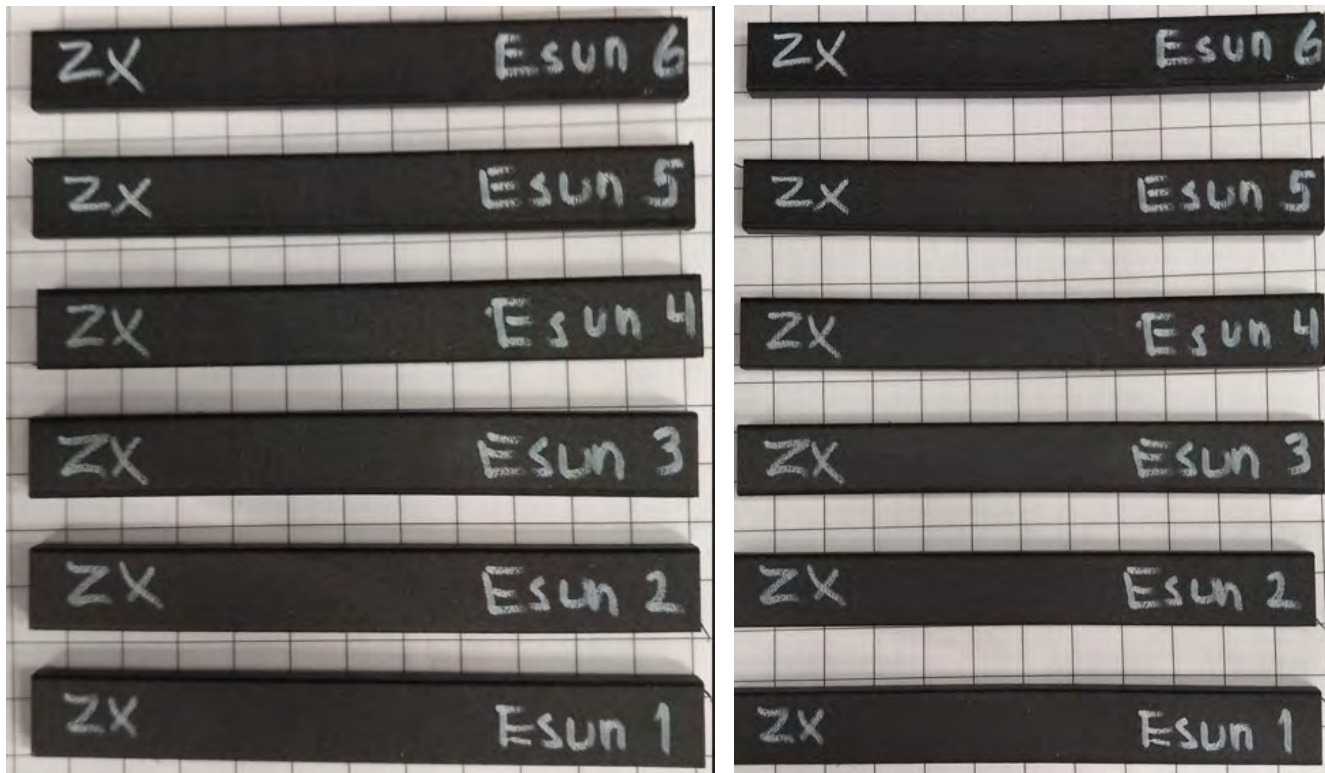
Seuraavassa kuvassa koekappale Esun 7 (XY) taiputuksen jälkeen (ylempi kuva) ja noin 20 minuutin kuluttua taiputuksesta (alempi kuva).



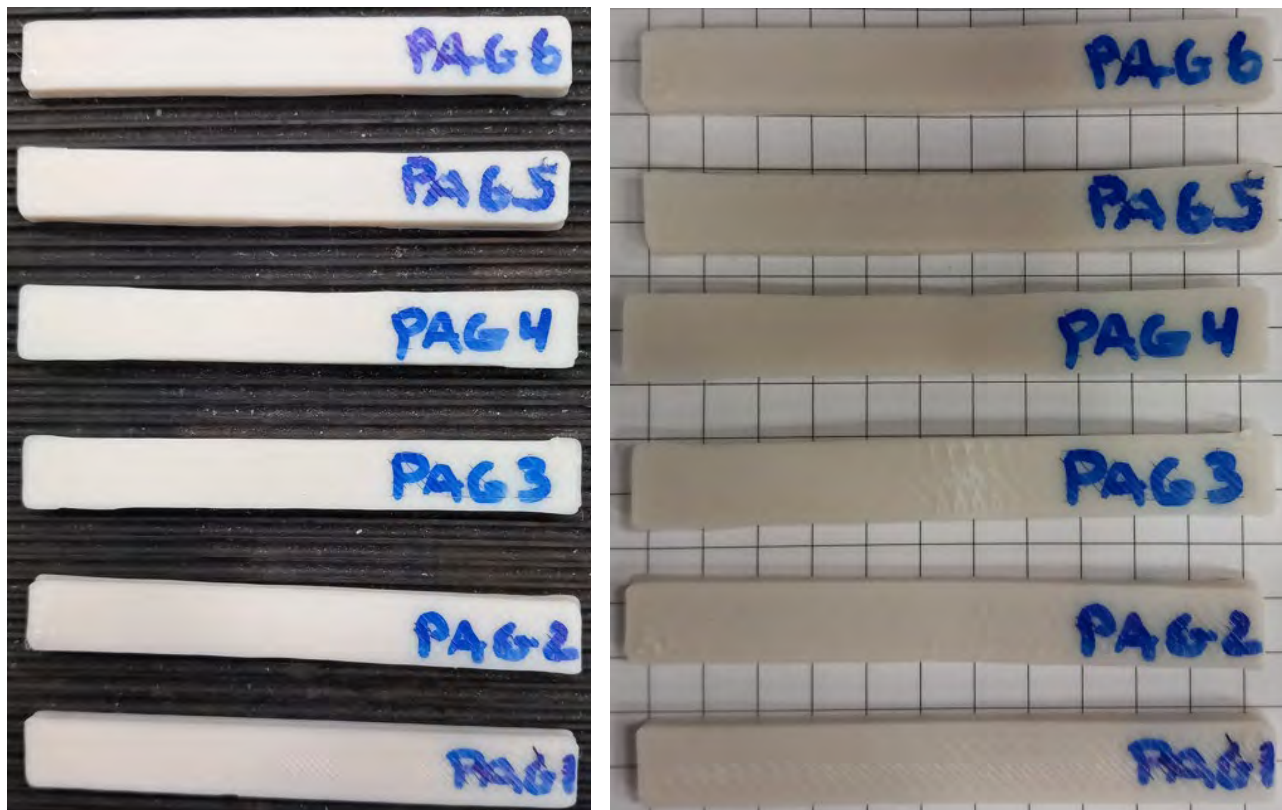
Kuva 15. Suurin osa taipuman palautumisesta tapahtui 14 minuutin aikana (kuvienoton aikaväli).



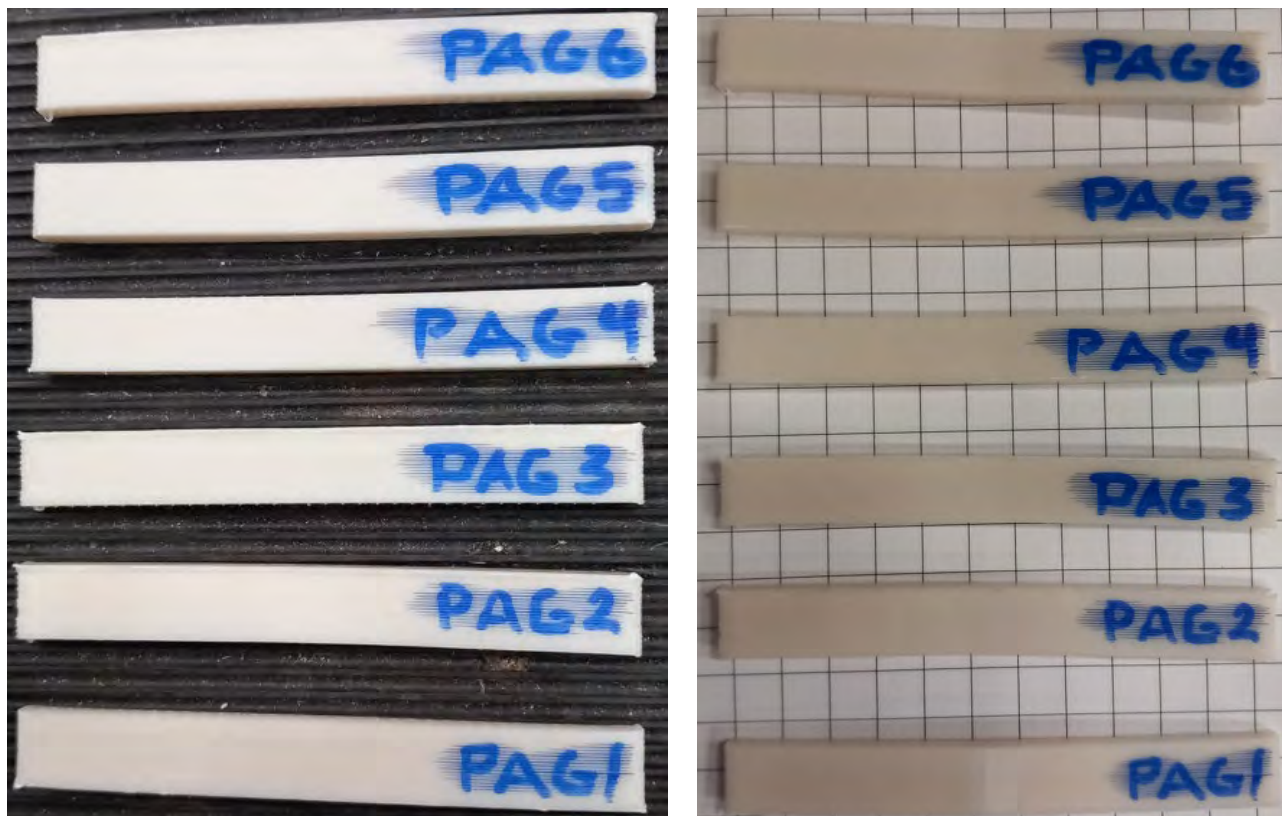
Kuva 16. PA6/6+CF 20 % -koesarjan taivutuskoekappaleet; tulostussuunta XZ.



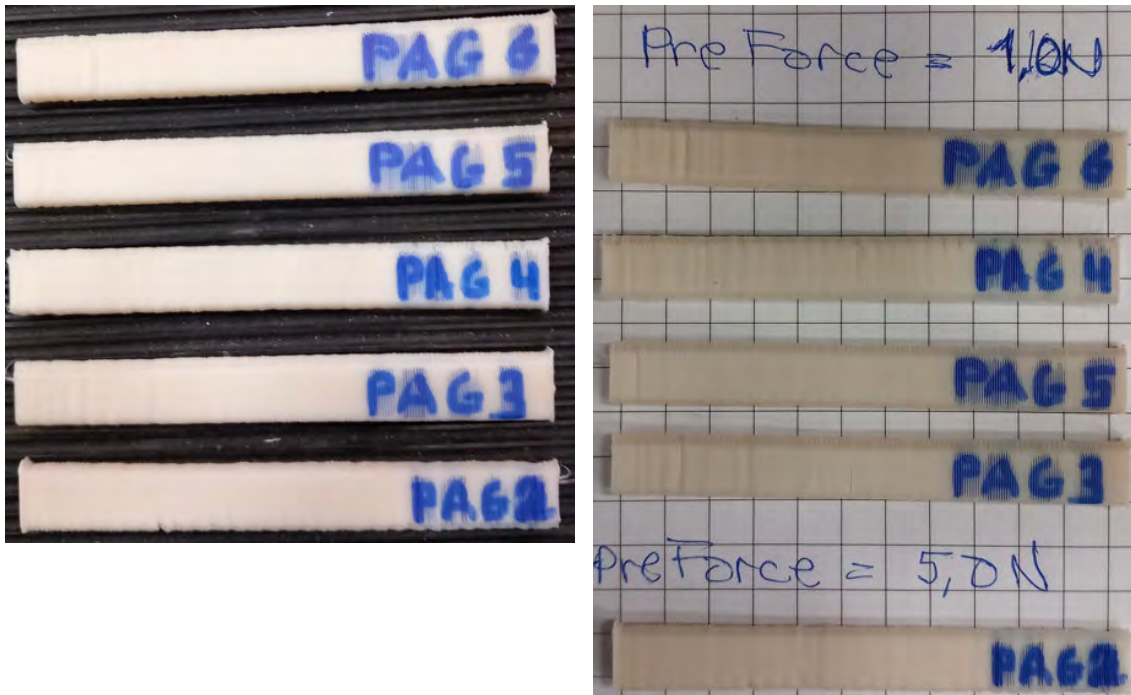
Kuva 17. PA6/6+CF 20 % -koesarjan taivutuskoekappaleet; tulostussuunta ZX.



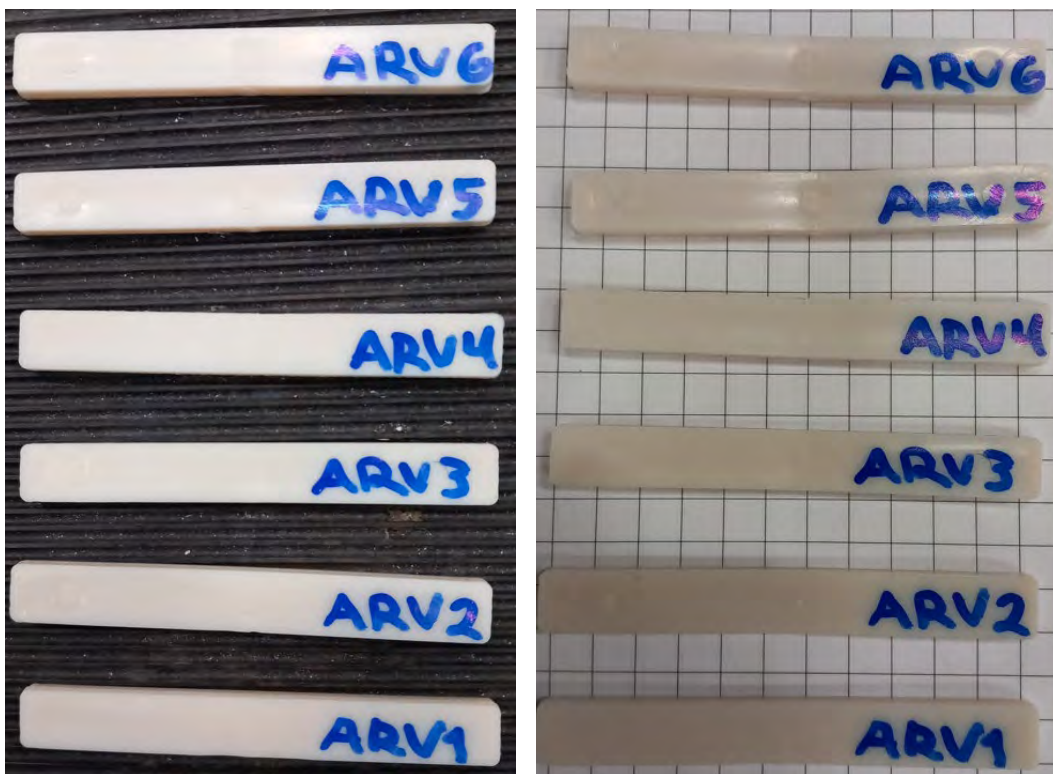
Kuva 18. ASA 3D-koesarjan taivutuskoekappaleet; tulostussuunta XY.



Kuva 19. ASA 3D-koesarjan taivutuskoekappaleet; tulostussuunta XZ.



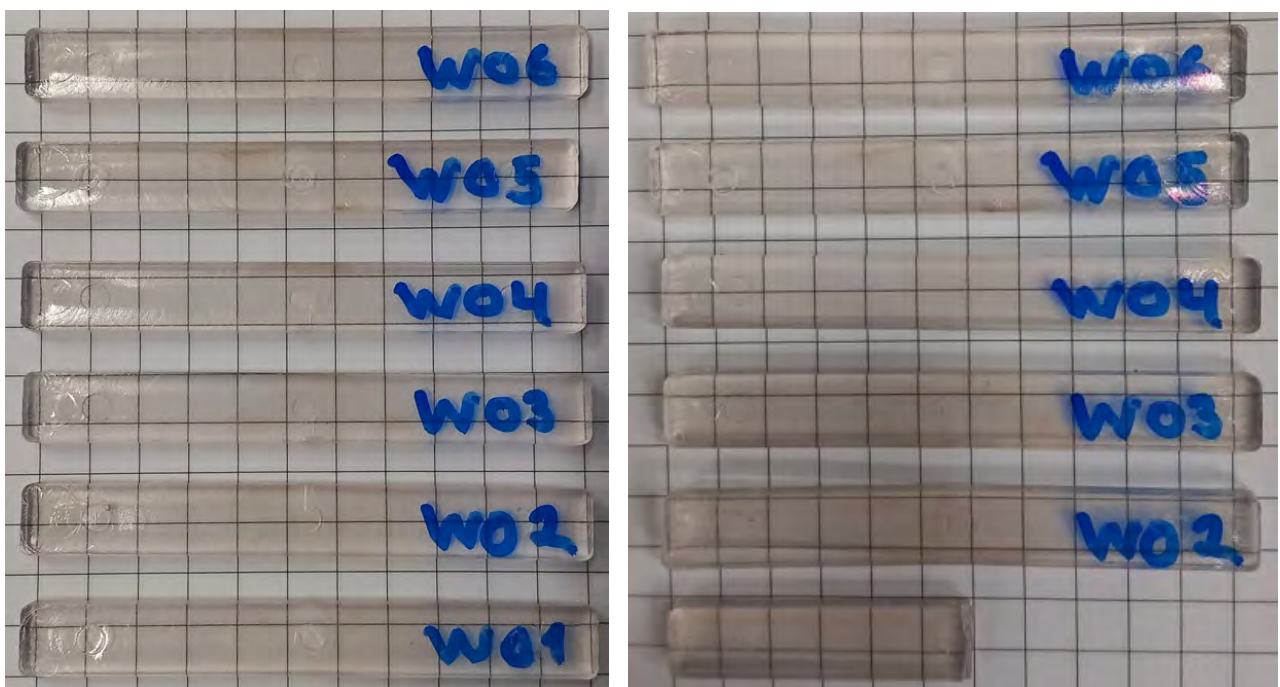
Kuva 20. ASA 3D-koesarjan taivutuskoekappaleet; tulostussuunta ZX. Taivutuskokeissa käytetty esivoima 5 N oli liian suuri hauraille ZX-tulostussuunnan koekappaleille, joten ensimmäisen koekappaleen PAG2 (ZX) koestuksen jälkeen esivoimaksi muutettiin 1 N. Koekappale PAG2 (ZX) vääristi kokonaistulosta, joten se poistettiin laskennoista.



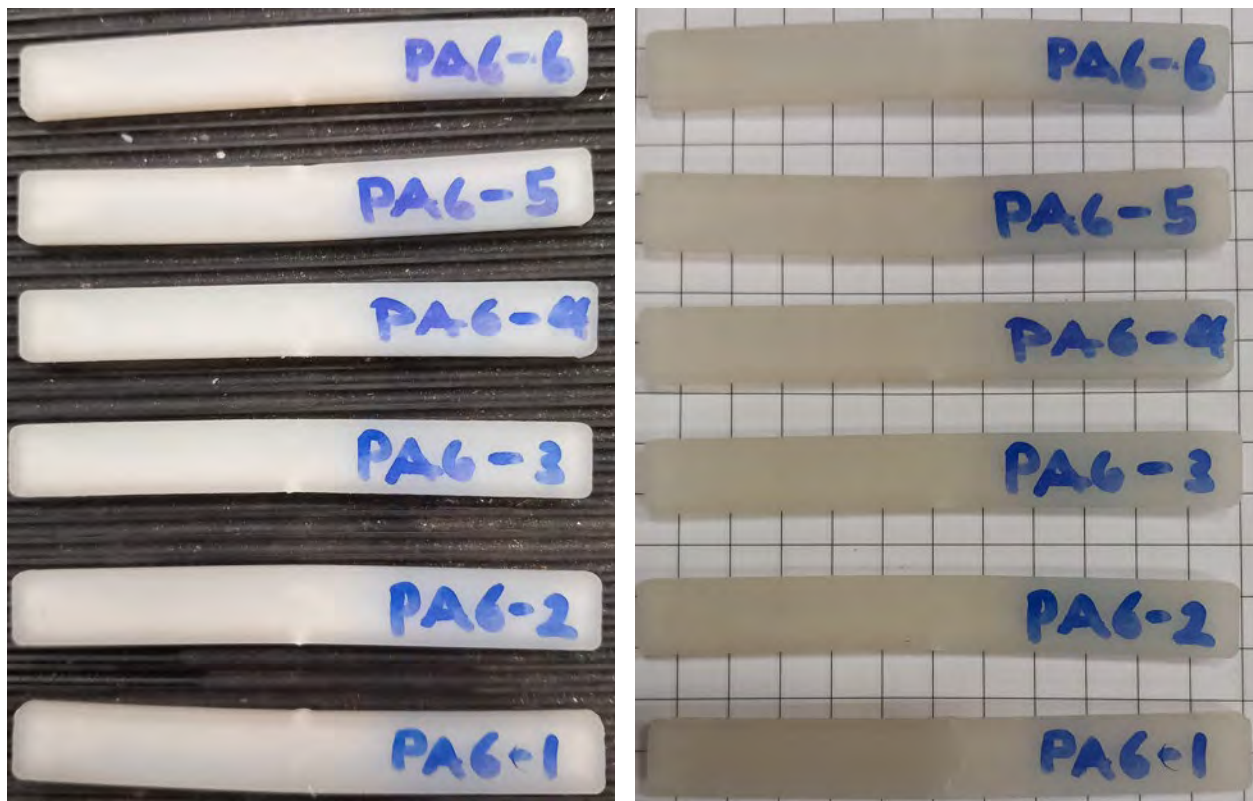
Kuva 21. ASA-ruiskuvalettu-koesarjan taivutuskoekappaleet.



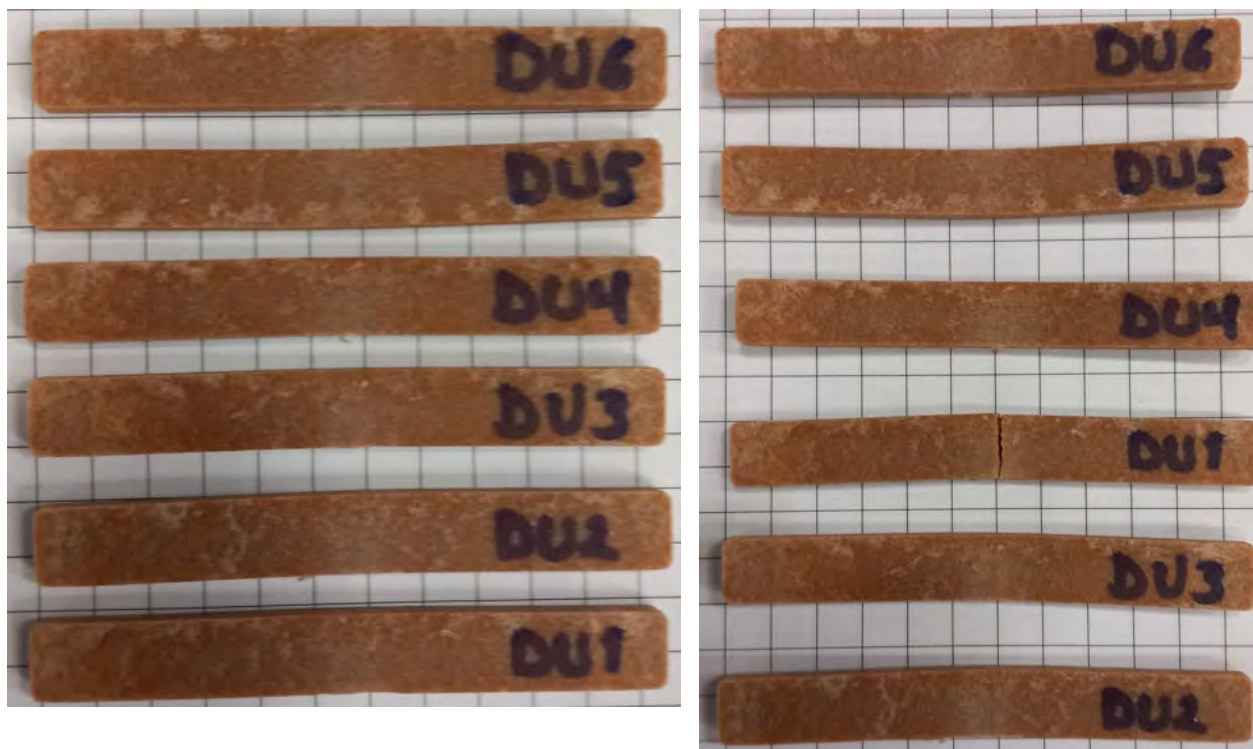
Kuva 22. Rigid 10K akrylaatti-koesarjan taivutuskoekappaleet.



Kuva 23. Woody W204C -koesarjan taivutuskoekappaleet.



Kuva 24. PA6 GF 30 % -koesarjan taivutus kappaleet.

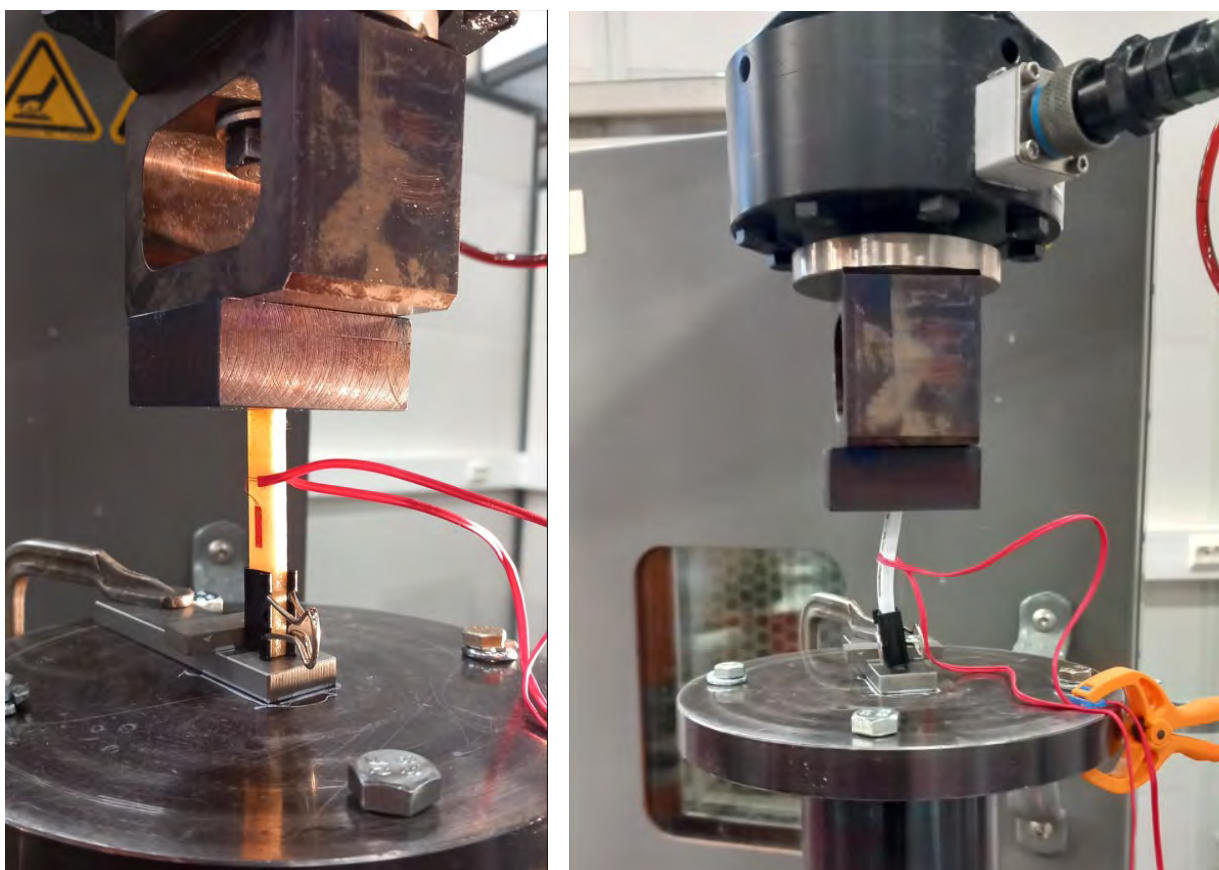


Kuva 25. Durasense 3D plus 50-koesarjan taivutuskoekappaleet.

2.3. Puristuslujuus

Puristuslujuuden testeissä tuloksiin saattoi vaikuttaa se, että kaikkien koekappaleiden päät eivät olleet suorassa, joka saattoi edesauttaa taipumista näin vaikuttaen puristusjännitykseen.

Koekappaleiden molemmille tasopinnoille liimattiin venymäliuskat Kyowa KFGS-5-120-C1-11L3M2R ja laskennassa käytettiin kussakin venymäliuskapaketissa annettuja lähtöarvoja.



Kuva 26. Puristuslujuuden testauksen kojärjestelyt. Oikeanpuoleisessa kuvassa koekappale on alkanut taipumaan.

2.3.1 Puristuslujuuden testitulokset

Huomioita:

- suurin puristusjäännitys Onyx PA6 + CF10% xy-tulostussuunnassa
- suurin kimmomoduuli Onyx PA6 + CF10% + hiilikuitu
- pienin puristusjäännitys PETG valkoinen xy-tulostussuunnassa
- pienin kimmomoduuli Onyx PA6 + zx-tulostussuunnassa.

Taulukko 3. Puristuslujuuden testitulokset koostettuna. Keltaiset solut kuvaavat suureiden arvojen maksimeja ja punertavat minimejä.

Materiaali	Huom.	Arvon tyyppi	F_{max} N	σ_M MPa	S_{max} mm	E_{Mmax} %	$E_{C\text{Face } 1}$ MPa	$E_{C\text{Face } 2}$ MPa	$E_{C\text{Coverage}}$ MPa
			COMPRESSIVE STRENGTH				COMPRESSIVE MODULUS		
Onyx PA6 + CF10 %	hiilikuitu								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	2417	60	2,03	10,1	13458	10492	11975
		Keskihajonta	42,6	1,1	0,4	1,9	985	884	194
		Keskihajonta (%)	1,8	1,8	19,2	19,2	7,3	8,4	1,6
Onyx PA6 + CF10 %	kevlar								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	1665	41	2,28	11,3	5605	5446	5526
		Keskihajonta	37,6	0,9	0,25	1,3	184	186	115
		Keskihajonta (%)	2,3	2,3	11,17	11,1	3,3	3,4	2,1
Onyx PA6+CF10 %	xy-suunta								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	1875	127	3,96	39,3	1052	1615	1334
		Keskihajonta	133,8	9,4	0,59	5,9	555	1129	369
		Keskihajonta (%)	7,1	7,3	14,91	15,0	52,8	69,9	27,7
Onyx PA6+CF10 %	zx-suunta								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	2373	57	3,91	26,1	1176	1176	1176
		Keskihajonta	207,9	5,1	0,48	3,2	160	82	77
		Keskihajonta (%)	8,8	8,9	12,24	12,3	13,6	7,0	6,5
Ultem PEI	xy-suunta								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	2417	56	2,03	13,2	1674	2732	2116
		Keskihajonta	42,6	0,8	0,39	2,5	77	1856	1014
		Keskihajonta (%)	1,8	1,5	19,20	19,2	4,6	67,9	47,9
Ultem PEI	zx-suunta								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	4564	96	4,17	27,9	2512	2976	2744
		Keskihajonta	459,3	9,4	1,13	7,5	447	1100	338
		Keskihajonta (%)	10,1	9,8	27,16	27,1	17,8	37,0	12,3
PETG valkoinen	xy-suunta								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	1586	38	0,84	5,6	2572	1929	2250
		Keskihajonta	55,2	1,3	0,03	0,2	712	560	115
		Keskihajonta (%)	3,5	3,5	3,16	3,2	27,7	29,0	5,1
PETG valkoinen	zx-suunta								
n = 5 + 5 kpl		Keskiarvo	1974	46	1,17	7,8	1817	1959	1888
		Keskihajonta	36,9	1,3	0,08	0,5	52	61	28
		Keskihajonta (%)	1,9	3,0	6,72	6,7	2,8	3,1	1,5
		Maksimi	4564	127	27	39	13458	10492	11975
		Minimi	1586	38	1	6	1052	1176	1176

Onyx PA6 + CF10% + hiilikuitu

Taulukko 4. Onyx PA6 + CF10% + hiilikuitu -koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

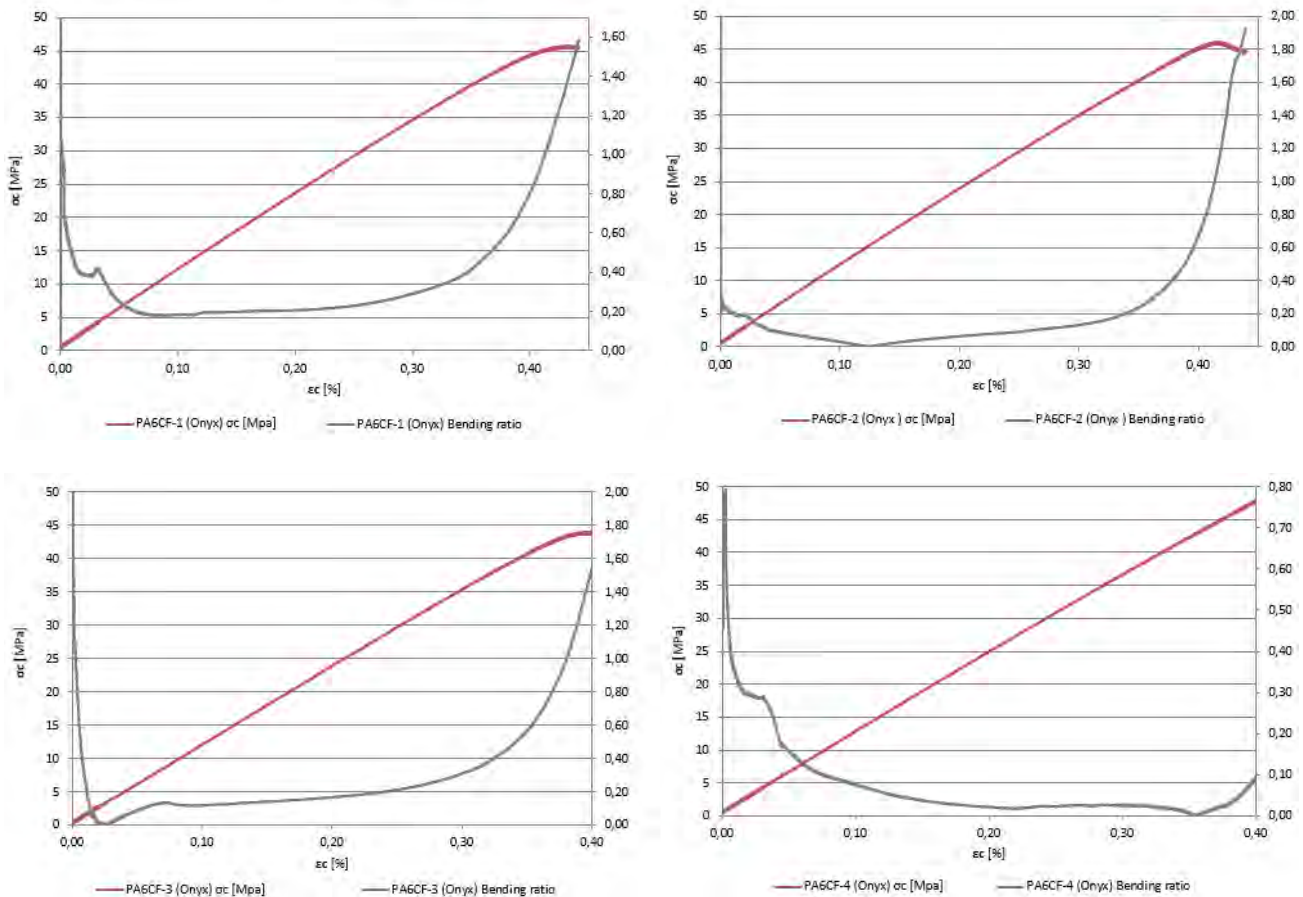
Test results (compressive strength):

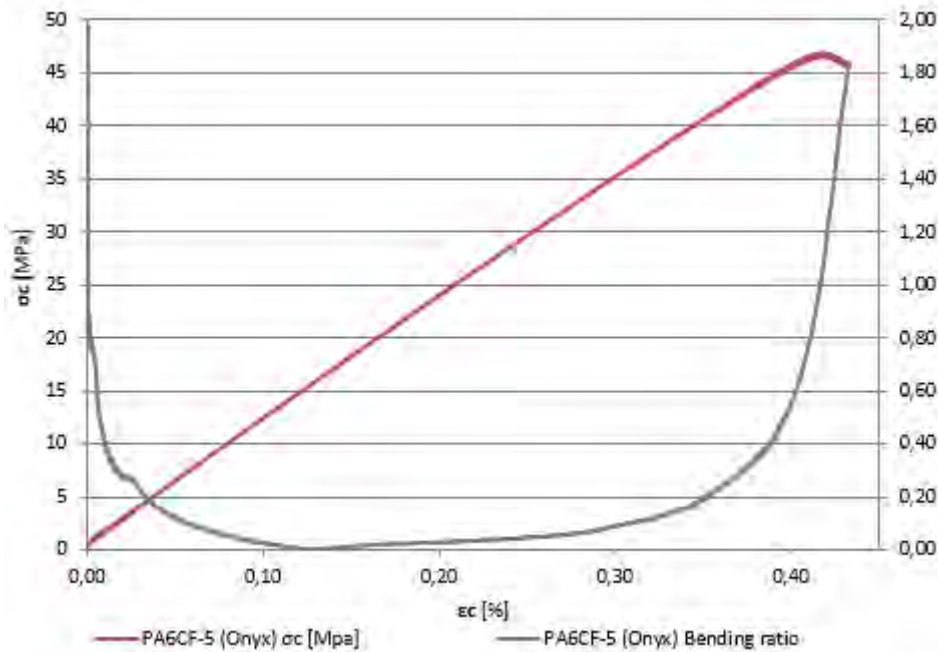
Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	F_M	σ_M	S_{max}	ϵ_M	Failure type
Specimen	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PA6CF-1 (Onyx)	4,01	10,03	20,15	40,22	2 411	60	2,34	11,6	Plastic deformation
PA6CF-2 (Onyx)	4,00	9,98	20,15	39,92	2 455	62	2,53	12,6	Plastic deformation
PA6CF-3 (Onyx)	4,00	10,00	20,14	40,00	2 412	60	1,88	9,3	Plastic deformation
PA6CF-4 (Onyx)	4,01	10,02	20,16	40,18	2 351	59	1,69	8,4	Plastic deformation
PA6CF-5 (Onyx)	4,02	10,11	20,18	40,64	2 453	60	1,68	8,3	Plastic deformation
Average	4,01	10,03	20,16	40,19	2 417	60	2,03	10,1	
St.deviation	0,01	0,05	0,02	0,28	43	1,1	0,39	1,9	
st.dev.-%	0,21	0,50	0,08	0,70	1,8	1,8	19,20	19,2	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1			Face 2			E_0 average [MPa]
				σ'_0 ($\epsilon'_c = 0,1\%$) [MPa]	σ''_0 ($\epsilon''_c = 0,3\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	σ'_0 ($\epsilon'_c = 0,05\%$) [MPa]	σ''_0 ($\epsilon''_c = 0,25\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	
PA6CF-1 (Onyx)	3,98	10,04	39,96	7,87	22,33	14 451	4,82	24,43	9 807	12 129
PA6CF-2 (Onyx)	3,99	10,07	40,18	6,00	33,04	13 522	7,03	27,44	10 204	11 863
PA6CF-3 (Onyx)	3,98	10,02	39,88	7,16	21,53	14 372	6,01	25,69	9 838	12 105
PA6CF-4 (Onyx)	3,99	10,07	40,18	5,66	30,14	12 235	7,63	31,52	11 947	12 091
PA6CF-5 (Onyx)	3,99	10,04	40,06	5,71	31,13	12 711	7,16	28,48	10 661	11 686
Average	3,99	10,05	40,05			13 458			10 492	11 975
St.deviation	0,01	0,02	0,13			985			884	194
st.dev.-%	0,14	0,22	0,33			7,3			8,4	1,6

Graph of the compressive strength and compressive modulus:





Kuvat 27-31. Onyx PA6 + CF10% + hiilikuitu -koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksenä.

Onyx PA6 + CF10% + kevlar

Taulukko 5. Onyx PA6 + CF10% + kevlar -koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

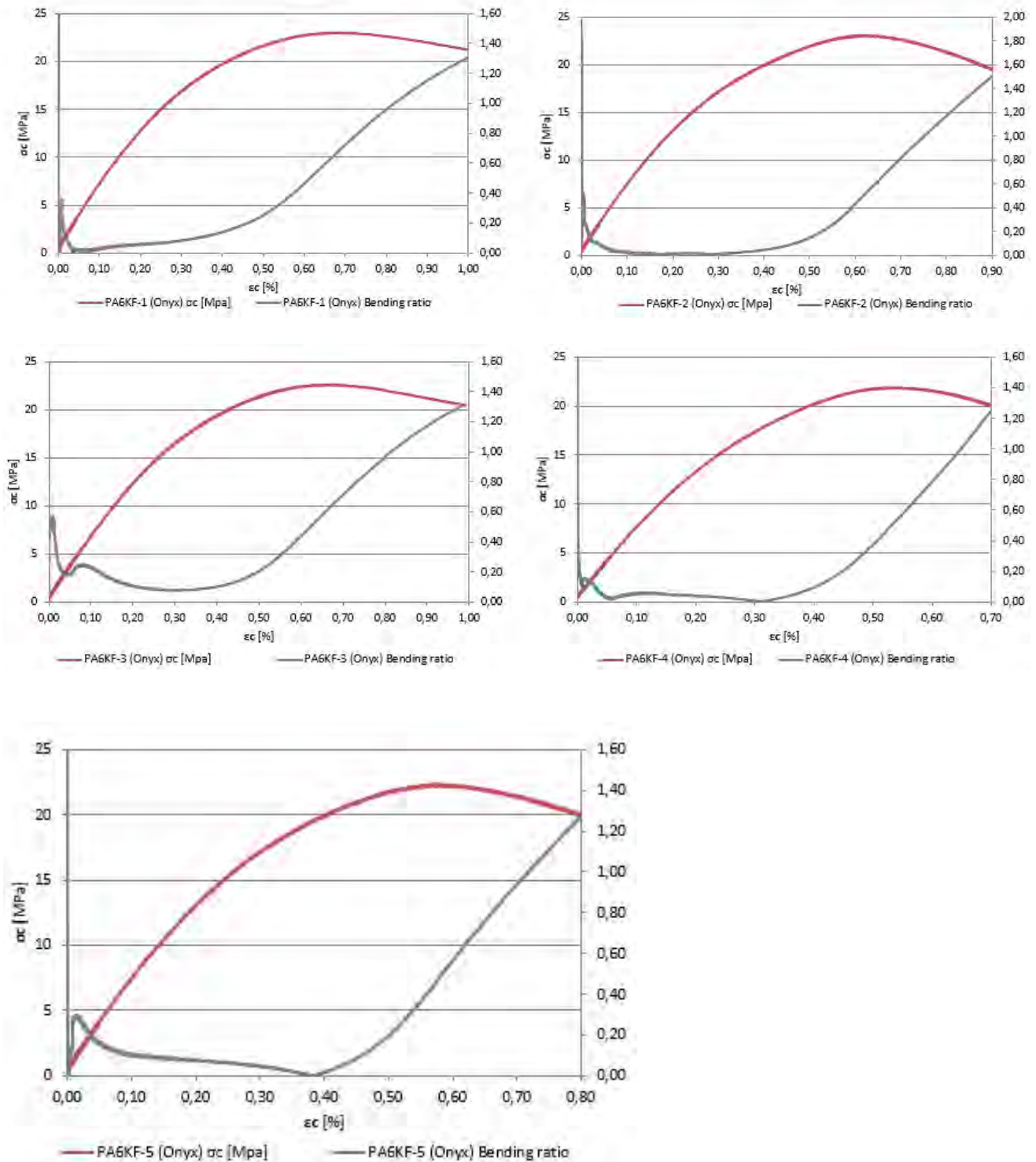
Test results (compressive strength):

Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	F_M	σ_M	S_{max}	ϵ_M^{max}	Failure type
Specimen	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PA6KF-1 (Onyx)	4,02	10,13	20,13	40,72	1 618	40	1,87	9,3	Plastic deformation
PA6KF-2 (Onyx)	4,01	10,18	20,24	40,82	1 699	42	2,36	11,7	Plastic deformation
PA6KF-3 (Onyx)	4,02	10,14	20,20	40,76	1 631	40	2,20	10,9	Plastic deformation
PA6KF-4 (Onyx)	4,03	10,17	20,19	40,99	1 694	41	2,48	12,3	Plastic deformation
PA6KF-5 (Onyx)	4,03	10,01	20,14	40,34	1 681	42	2,47	12,3	Plastic deformation
Average	4,02	10,13	20,18	40,73	1 665	41	2,28	11,3	
St.deviation	0,01	0,07	0,05	0,24	38	0,9	0,25	1,3	
st.dev.-%	0,21	0,67	0,22	0,58	2,3	2,3	11,17	11,1	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1			Face 2			E_0 average [MPa]
				$\sigma'_{0.1}$ ($\epsilon'_{0.1} = 0,1\%$) [MPa]	$\sigma'_{0.3}$ ($\epsilon'_{0.3} = 0,3\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	$\sigma'_{0.05}$ ($\epsilon'_{0.05} = 0,05\%$) [MPa]	$\sigma'_{0.25}$ ($\epsilon'_{0.25} = 0,25\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	
PA6KF-1 (Onyx)	4,00	10,02	40,08	4,02	15,73	5 857	3,89	14,34	5 227	5 542
PA6KF-2 (Onyx)	4,01	9,97	39,98	4,39	15,46	5 536	3,92	15,12	5 597	5 567
PA6KF-3 (Onyx)	4,01	10,03	40,22	4,82	15,61	5 399	3,34	13,86	5 262	5 331
PA6KF-4 (Onyx)	4,00	10,00	40,00	4,32	15,77	5 727	4,12	15,21	5 548	5 638
PA6KF-5 (Onyx)	4,00	9,99	39,96	3,58	14,61	5 507	4,69	15,89	5 597	5 552
Average	4,00	10,00	40,05			5 605			5 446	5 526
St.deviation	0,01	0,02	0,11			184			186	115
st.dev.-%	0,14	0,24	0,27			3,3			3,4	2,1

Graph of the compressive strength and -modulus:



Kuvat 32-36. Onyx PA6 + CF10% + kevlar -koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksenä.

Onyx PA6+CF10% xy-tulostussuunta

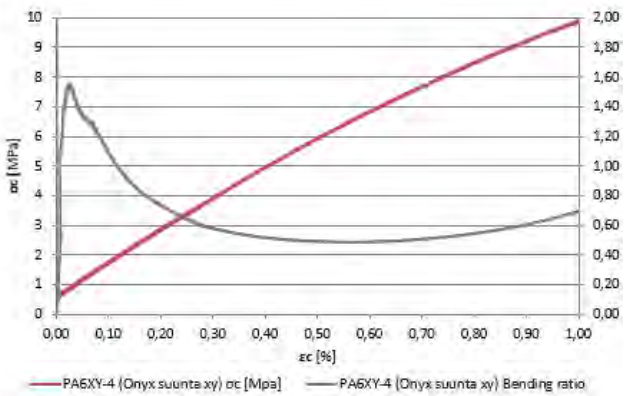
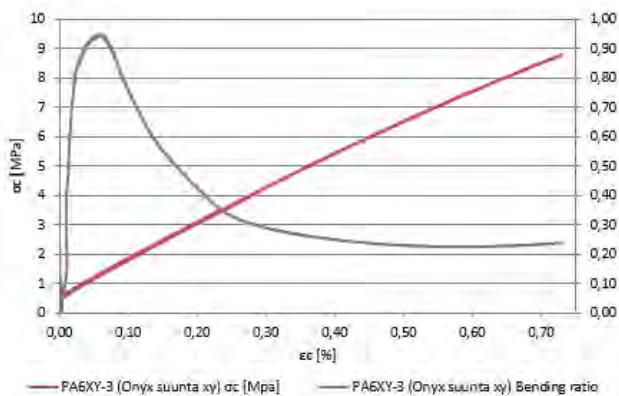
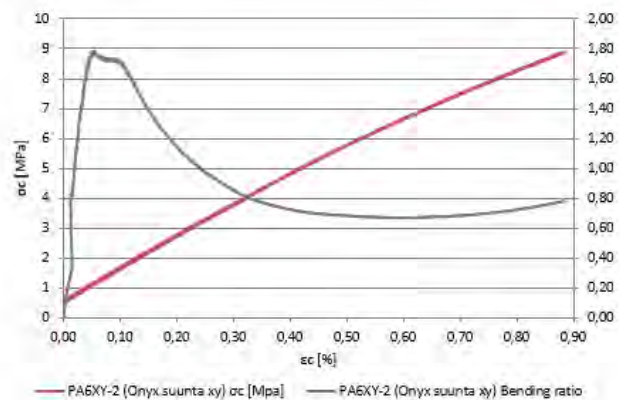
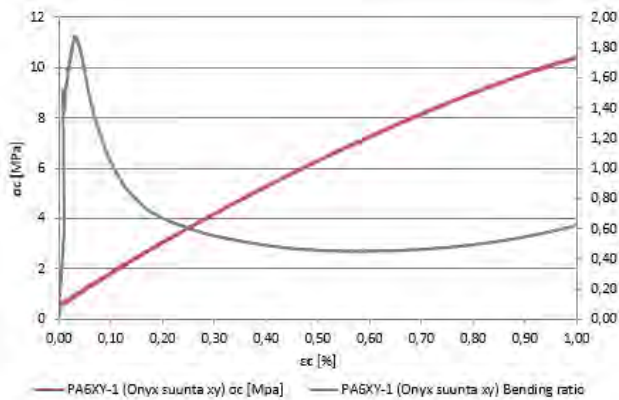
Taulukko 6. Onyx PA6 + CF10% xy-tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

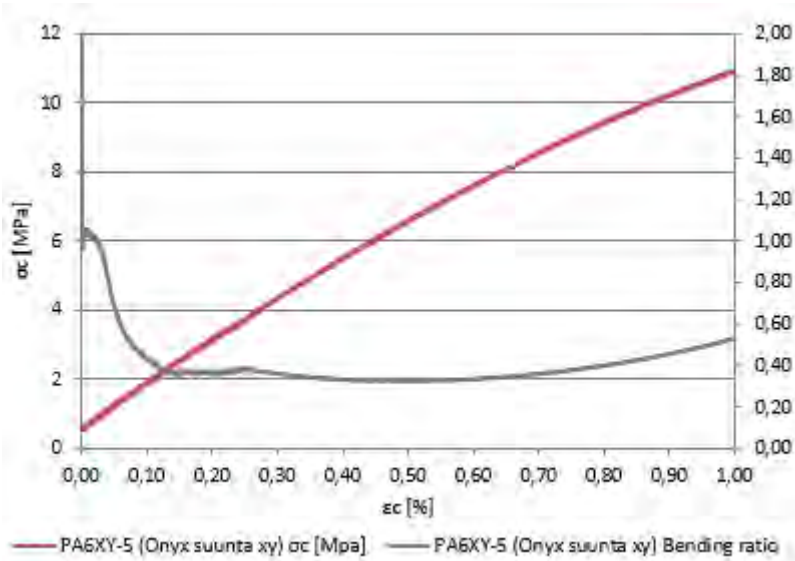
Test results (compressive strength):

Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	F_{Bk}	σ_{Bk}	$S_{Bk,max}$	$E_{Bk,max}$	Failure type
Specimen	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PA6XY-1 (Onyx suunta xy)	3,84	3,84	10,05	14,75	1 725	117	3,39	33,7	Plastic deformation
PA6XY-2 (Onyx suunta xy)	3,84	3,84	10,19	14,75	1 925	131	4,18	41,0	
PA6XY-3 (Onyx suunta xy)	3,83	3,83	10,05	14,67	2 060	140	4,71	46,8	
PA6XY-4 (Onyx suunta xy)	3,84	3,84	10,11	14,75	1 766	120	3,32	32,8	
PA6XY-5 (Onyx suunta xy)	3,83	3,83	10,00	14,67	1 899	129	4,19	41,9	
Average	3,84	3,84	10,08	14,71	1 875	127	3,96	39,3	
St.deviation	0,01	0,01	0,07	0,04	134	9,4	0,59	5,9	
st.dev.-%	0,14	0,14	0,72	0,29	7,1	7,3	14,91	15,0	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1		Face 2				E_o average [MPa]
				σ'_o ($\epsilon'_c = 0,1\%$) [MPa]	σ''_o ($\epsilon''_c = 0,3\%$) [MPa]	E_o [MPa]	σ'_o ($\epsilon'_c = 0,05\%$) [MPa]	σ''_o ($\epsilon''_c = 0,25\%$) [MPa]	E_o [MPa]	
PA6XY-1 (Onyx suunta xy)	3,84	10,05	38,59	0,78	2,28	751	2,76	5,95	1 598	1 174
PA6XY-2 (Onyx suunta xy)	3,84	10,19	39,13	0,79	1,55	381	1,30	7,10	3 533	1 957
PA6XY-3 (Onyx suunta xy)	3,83	10,05	38,49	0,92	2,69	888	2,26	4,83	1 284	1 086
PA6XY-4 (Onyx suunta xy)	3,84	10,11	38,82	2,81	5,84	1 517	0,80	2,06	632	1 074
PA6XY-5 (Onyx suunta xy)	3,83	10,00	38,30	1,79	5,23	1 723	0,89	2,93	1 031	1 377
Average	3,84	10,08	38,67			1 052			1 615	1 334
St.deviation	0,01	0,07	0,32			555			1 129	369
st.dev.-%	0,14	0,72	0,83			52,8			69,9	27,7





Kuvat 37-41. Onyx PA6 + CF10% xy-tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksenä.

Onyx PA6+CF10% zx-tulostussuunta

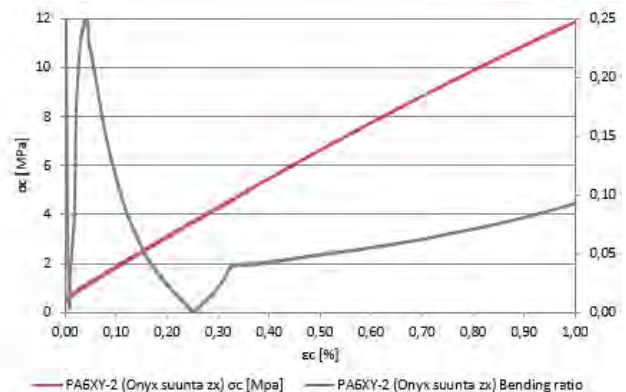
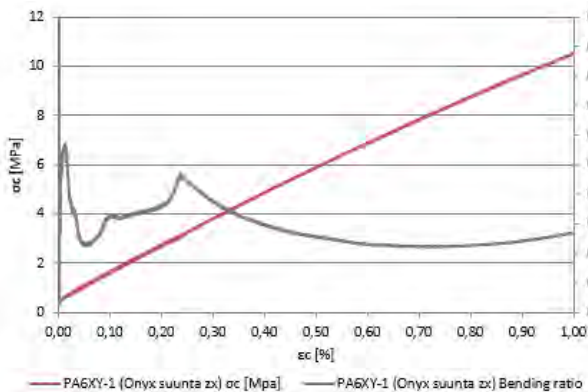
Taulukko 7. Onyx PA6 + CF10% zx-tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

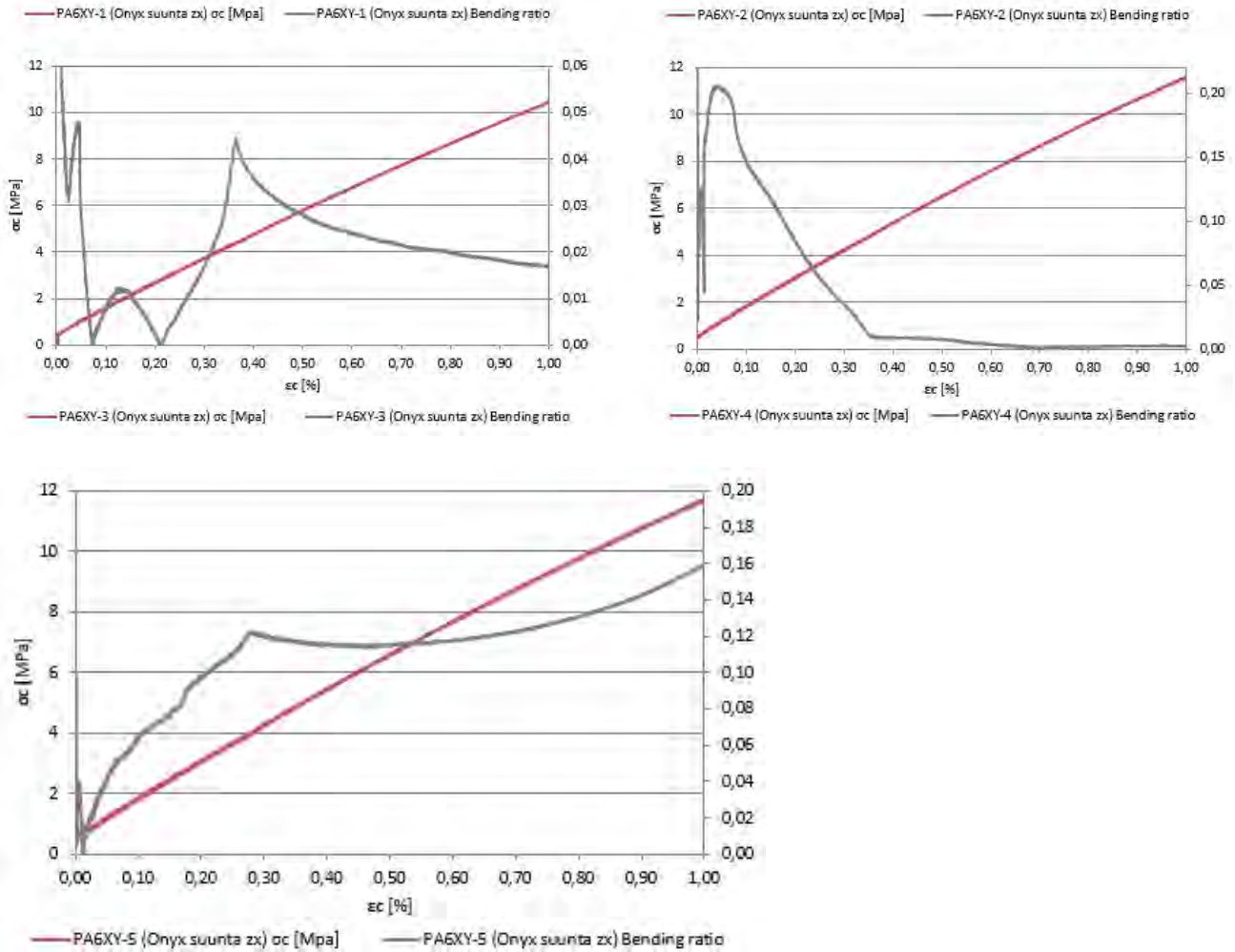
Test results (compressive strength):

Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	F_M	σ_M	S_{max}	$\epsilon_{at\ max}$	Failure type
Specimen	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PA6XY-1 (Onyx suunta zx)	4,10	9,93	15,01	40,71	2 263	56	3,44	22,9	Plastic deformation
PA6XY-2 (Onyx suunta zx)	4,16	10,02	14,97	41,68	2 476	59	3,70	24,7	Plastic deformation
PA6XY-3 (Onyx suunta zx)	4,18	10,00	14,99	41,80	2 060	49	4,71	31,4	Plastic deformation
PA6XY-4 (Onyx suunta zx)	4,13	9,97	15,01	41,18	2 524	61	3,78	25,2	Plastic deformation
PA6XY-5 (Onyx suunta zx)	4,18	9,94	15,01	41,55	2 545	61	3,93	26,2	Plastic deformation
Average	4,15	9,97	15,00	41,38	2 373	57	3,91	26,1	
St.deviation	0,03	0,04	0,02	0,44	208	5,1	0,48	3,2	
st.dev.-%	0,83	0,38	0,12	1,07	8,8	8,9	12,24	12,3	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1		Face 2			E_0 average [MPa]	
				σ'_0 ($\epsilon'_0 = 0,1\%$) [MPa]	σ''_0 ($\epsilon''_0 = 0,3\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	σ'_0 ($\epsilon'_0 = 0,05\%$) [MPa]	σ''_0 ($\epsilon''_0 = 0,25\%$) [MPa]		E_0 [MPa]
PA6XY-1 (Onyx suunta zx)	4,17	10,01	41,74	1,04	3,01	990	1,09	3,49	1 205	1 097
PA6XY-2 (Onyx suunta zx)	4,04	10,00	40,40	1,38	3,69	1 158	1,10	3,68	1 293	1 226
PA6XY-3 (Onyx suunta zx)	4,13	9,96	41,13	1,06	3,25	1 094	1,11	3,29	1 091	1 093
PA6XY-4 (Onyx suunta zx)	4,17	9,98	41,62	1,35	3,77	1 215	1,08	3,44	1 187	1 201
PA6XY-5 (Onyx suunta zx)	4,14	10,02	41,48	1,22	4,07	1 421	1,17	3,37	1 104	1 263
Average	4,13	9,99	41,28			1 176			1 176	1 176
St.deviation	0,05	0,02	0,54			160			82	77
st.dev.-%	1,29	0,24	1,31			13,6			7,0	6,5





Kuvat 42-46. Onyx PA6 + CF10% zx-tulostussuunta--koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksenä.

Ultem PEI xy-tulostussuunta

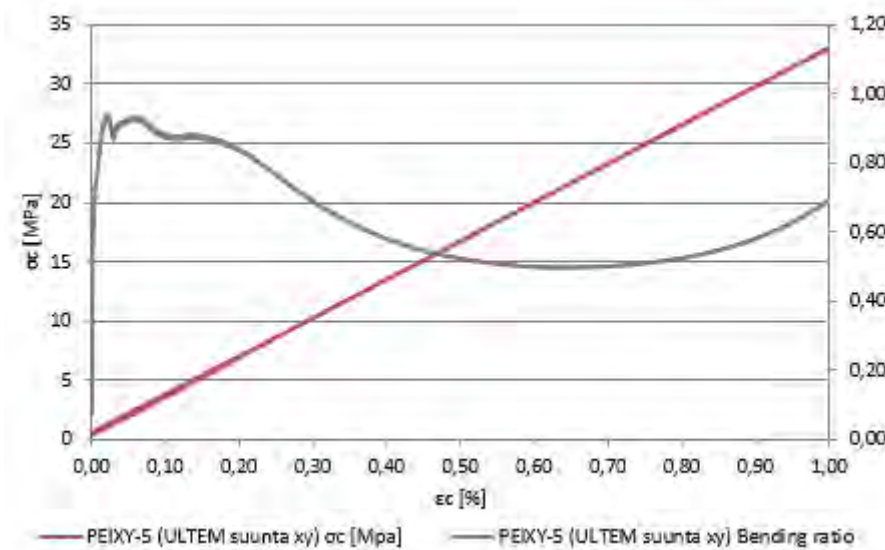
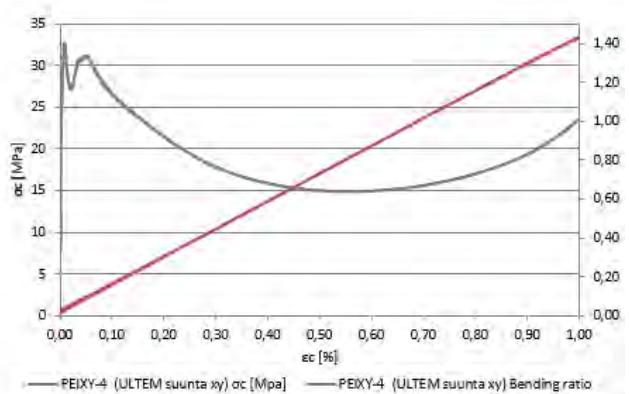
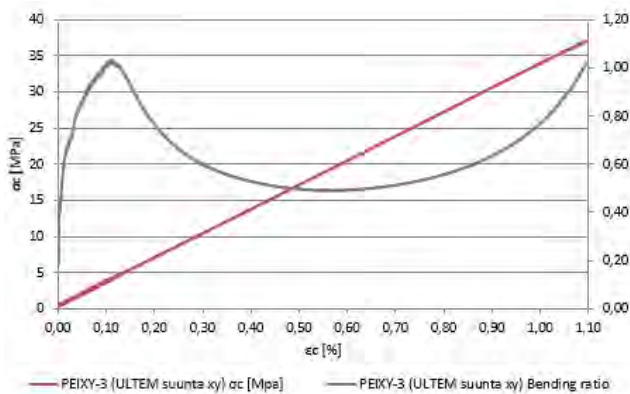
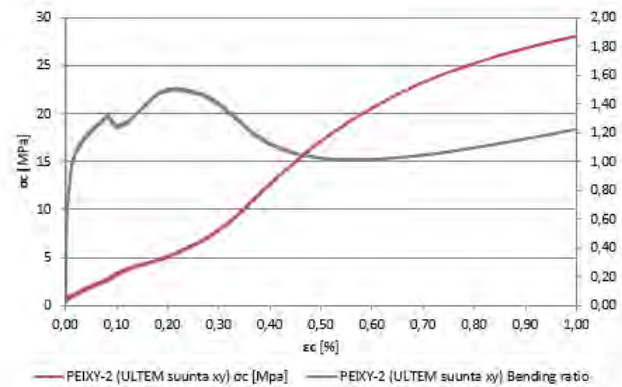
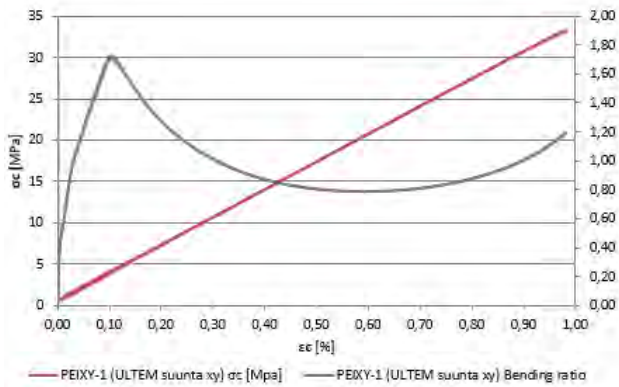
Taulukko 8. Ultem PEI xy--tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

Test results (compressive strength):

Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	F_u	σ_u	S_{max}	$\epsilon_{fl max}$	Failure type
Specimen	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PEDY-1 (ULTEM suunta xy)	4,15	10,38	15,33	43,08	2 411	56	2,34	15,3	Plastic deformation
PEDY-2 (ULTEM suunta xy)	4,21	10,36	15,37	43,62	2 455	56	2,53	16,5	Plastic deformation
PEDY-3 (ULTEM suunta xy)	4,20	10,38	15,37	43,60	2 412	55	1,88	12,2	Plastic deformation
PEDY-4 (ULTEM suunta xy)	4,17	10,38	15,34	43,28	2 351	54	1,69	11,0	Plastic deformation
PEDY-5 (ULTEM suunta xy)	4,21	10,37	15,38	43,66	2 453	56	1,68	10,9	Plastic deformation
Average	4,19	10,37	15,36	43,45	2 417	56	2,03	13,2	
St.deviation	0,03	0,01	0,02	0,25	43	0,8	0,39	2,5	
st.dev.-%	0,64	0,09	0,14	0,58	1,8	1,5	19,20	19,2	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1		E_o	Face 2		E_o	E_o average
				σ'_o ($\epsilon'_o = 0,1\%$)	σ''_o ($\epsilon''_o = 0,3\%$)		σ'_o ($\epsilon'_o = 0,05\%$)	σ''_o ($\epsilon''_o = 0,25\%$)		
Specimen	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
PEDY-1 (ULTEM suunta xy)	3,93	10,30	40,48	3,43	27,06		1,39	3,71	1 162	1 162
PEDY-2 (ULTEM suunta xy)	3,95	10,30	40,69	4,53	24,73		1,33	4,15	1 408	1 408
PEDY-3 (ULTEM suunta xy)	3,92	10,27	40,26	1,45	4,68	1 619	7,36	17,22	4 922	3 271
PEDY-4 (ULTEM suunta xy)	3,97	10,27	40,77	9,17	30,39		1,23	4,40	1 581	1 581
PEDY-5 (ULTEM suunta xy)	3,90	10,23	39,90	1,32	4,78	1 729	8,12	17,29	4 585	3 157
Average	3,93	10,27	40,42			1 674			2 732	2 116
St.deviation	0,03	0,03	0,35			77			1 856	1 014
st.dev.-%	0,69	0,28	0,87			4,6			67,9	47,9



Kuvat 47–51. Ultem PEI xy-tulostussuunta--koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksenä.

Ultem PEI zx-tulostussuunta

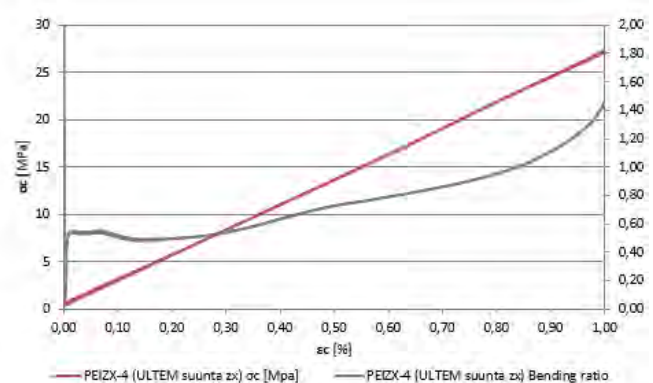
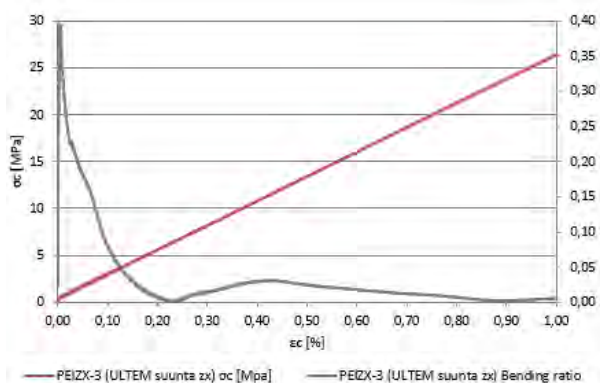
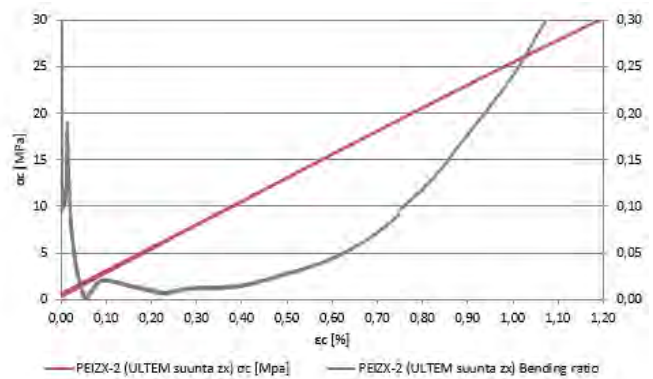
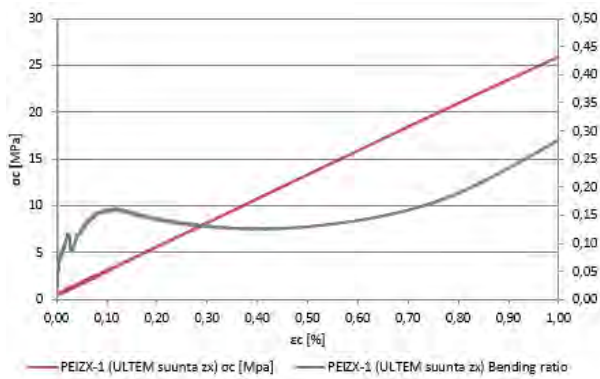
Taulukko 9. Ultem PEI zx--tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

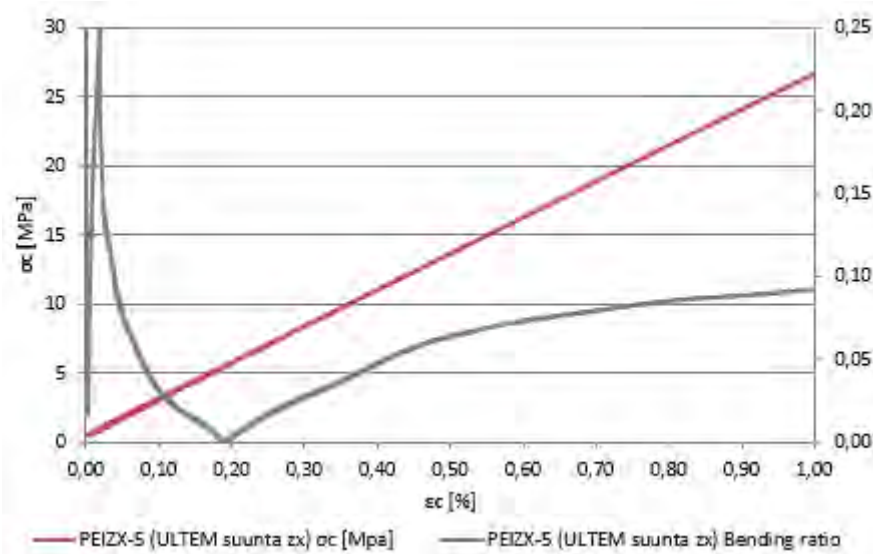
Test results (compressive strength):

Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	F_B	σ_B	S_{max}	$\varepsilon_{B\ max}$	Failure type
Specimen	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PEIZX-1 (ULTEM suunta zx)	4,52	10,44	14,90	47,19	4 353	92	3,58	24,0	Plastic deformation
PEIZX-2 (ULTEM suunta zx)	4,56	10,43	14,97	47,56	4 060	85	3,14	21,0	Plastic deformation
PEIZX-3 (ULTEM suunta zx)	4,54	10,45	14,95	47,44	4 803	101	4,48	29,9	Plastic deformation
PEIZX-4 (ULTEM suunta zx)	4,51	10,41	14,96	46,95	4 368	93	3,64	24,3	Plastic deformation
PEIZX-5 (ULTEM suunta zx)	4,55	10,47	14,97	47,64	5 235	110	6,00	40,1	Plastic deformation
Average	4,54	10,44	14,95	47,36	4 564	96	4,17	27,9	
St.deviation	0,02	0,02	0,03	0,28	459	9,4	1,13	7,5	
st.dev.-%	0,46	0,21	0,20	0,60	10,1	9,8	27,16	27,1	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1			Face 2			E_0 average [MPa]
				σ'_0 ($\varepsilon'_0 = 0,1\%$) [MPa]	σ''_0 ($\varepsilon''_0 = 0,3\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	σ'_0 ($\varepsilon'_0 = 0,05\%$) [MPa]	σ''_0 ($\varepsilon''_0 = 0,25\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	
PEIZX-1 (ULTEM suunta zx)	4,25	10,31	43,82	1,96	7,85	2 953	1,61	6,09	2 241	2 597
PEIZX-2 (ULTEM suunta zx)	4,27	10,37	44,28	1,71	6,82	2 557	1,72	6,71	2 496	2 527
PEIZX-3 (ULTEM suunta zx)	4,17	10,29	42,91	1,58	7,05	2 740	2,06	7,00	2 472	2 606
PEIZX-4 (ULTEM suunta zx)	4,27	10,29	43,94	1,32	4,85	1 770	1,91	3,13	4 916	3 343
PEIZX-5 (ULTEM suunta zx)	4,23	10,20	43,15	1,90	6,98	2 540	1,69	7,21	2 755	2 648
Average	4,24	10,29	43,62			2 512			2 976	2 744
St.deviation	0,04	0,06	0,57			447			1 100	338
st.dev.-%	0,98	0,59	1,31			17,8			37,0	12,3





Kuvat 52–56. Ultem PEI zx-tulostussuunta--koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksenä.

Mitsubishi PETG valkoinen xy-tulostussuunta

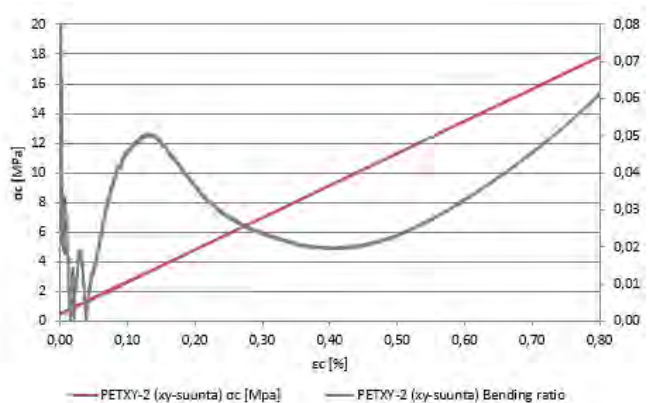
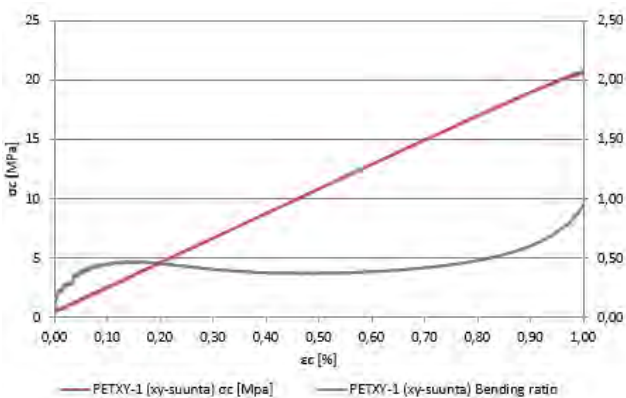
Taulukko 10. Mitsubishi PETG xy-tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

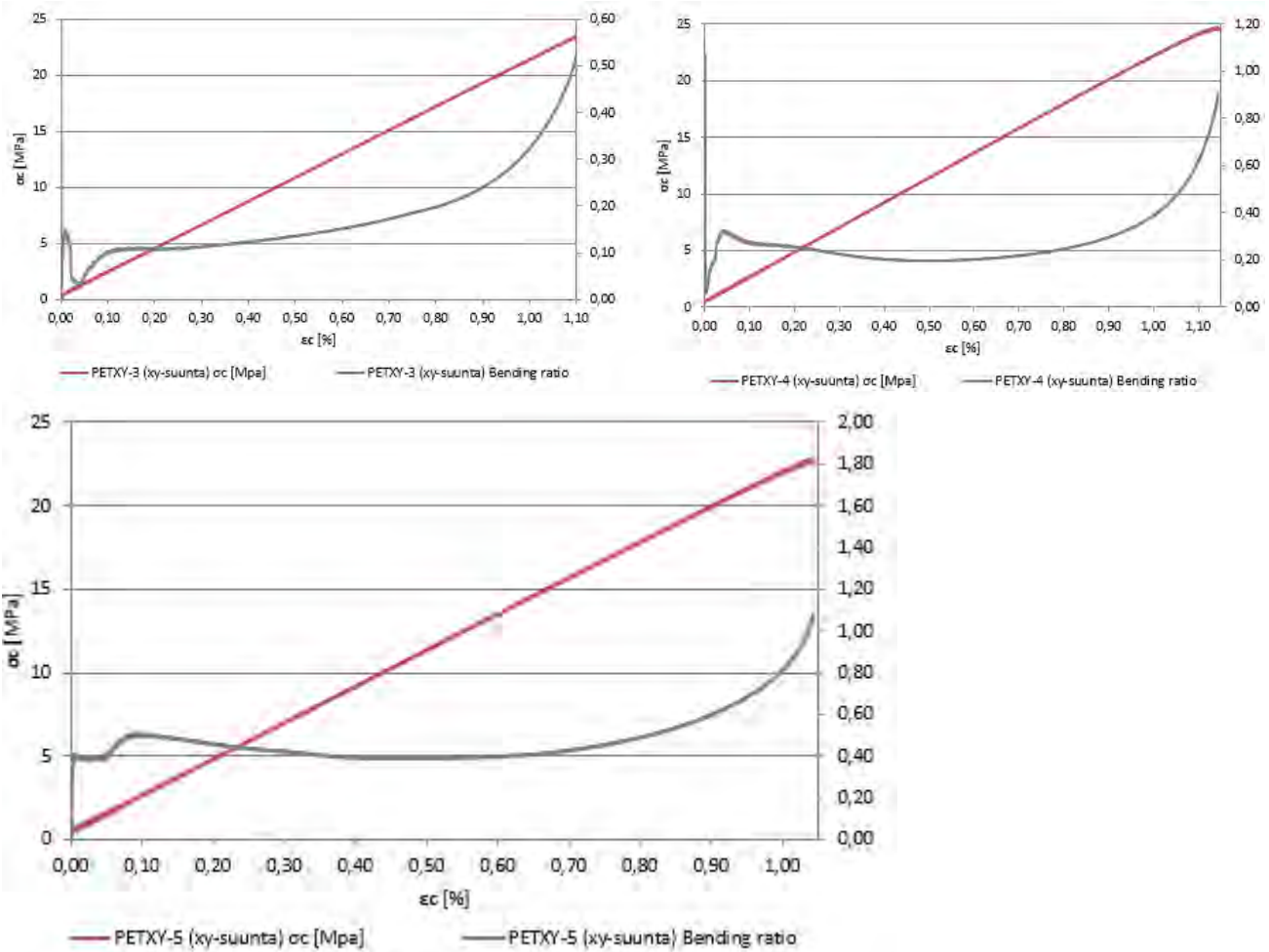
Test results (compressive strength):

Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	F_M	σ_M	S_{max}	ϵ_{Mmax}	Failure type
Specimen	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PETXY-1 (xy-suunta)	4,15	10,17	15,10	42,21	1 681	40	0,87	5,8	Plastic deformation
PETXY-2 (xy-suunta)	4,16	10,16	15,10	42,27	1 589	38	0,81	5,4	Plastic deformation
PETXY-3 (xy-suunta)	4,15	10,18	15,11	42,25	1 547	37	0,86	5,7	Plastic deformation
skirjaa muokattu viimeksi: Juuri nyt	15	10,14	15,08	42,08	1 558	37	0,84	5,6	Plastic deformation
PETXY-5 (xy-suunta)	4,15	10,19	15,11	42,29	1 558	37	0,81	5,4	Plastic deformation
Average	4,15	10,17	15,10	42,22	1 586	38	0,84	5,6	
St.deviation	0,00	0,02	0,01	0,08	55	1,3	0,03	0,2	
st.dev.-%	0,11	0,19	0,08	0,19	3,5	3,5	3,16	3,2	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1			Face 2			E_0 average [MPa]
				σ'_0 ($\epsilon'_0 = 0,1\%$) [MPa]	σ''_0 ($\epsilon''_0 = 0,3\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	σ'_0 ($\epsilon'_0 = 0,05\%$) [MPa]	σ''_0 ($\epsilon''_0 = 0,25\%$) [MPa]	E_0 [MPa]	
PETXY-1 (xy-suunta)	3,96	10,09	39,96	2,35	8,85	3 250	1,27	4,01	1 375	2 312
PETXY-2 (xy-suunta)	4,01	10,14	40,66	1,55	5,74	2 091	1,59	6,04	2 225	2 158
PETXY-3 (xy-suunta)	4,05	10,20	41,31	1,59	6,37	2 396	1,48	5,21	1 867	2 132
PETXY-4 (xy-suunta)	4,01	10,15	40,70	1,31	4,82	1 753	2,03	7,47	2 723	2 238
PETXY-5 (xy-suunta)	4,04	10,12	40,88	2,64	9,38	3 369	1,25	4,15	1 454	2 411
Average	4,01	10,14	40,70			2 572			1 929	2 250
St.deviation	0,04	0,04	0,49			712			560	115
st.dev.-%	0,87	0,40	1,20			27,7			29,0	5,1





Kuvat 57–61. Mitsubishi PETG xy-tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksinä.

Mitsubishi PETG valkoinen zx-tulostussuunta

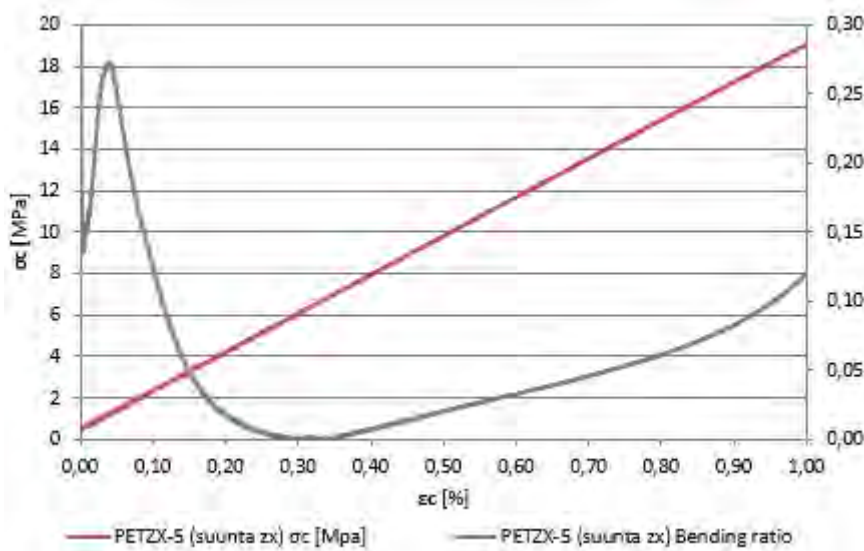
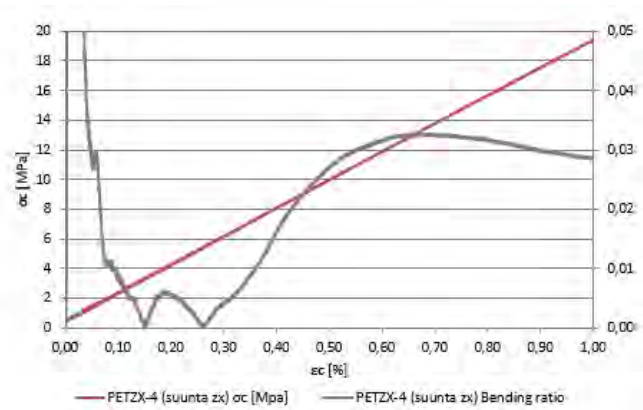
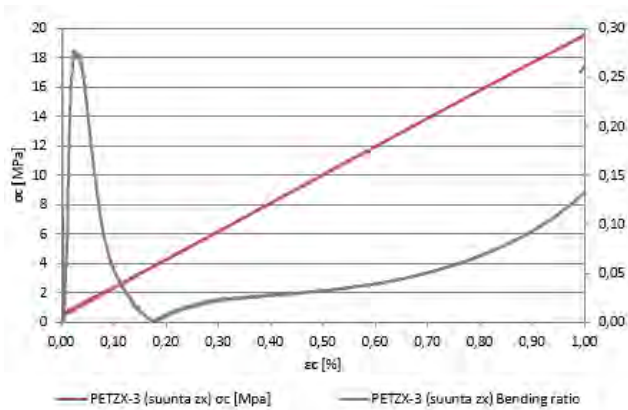
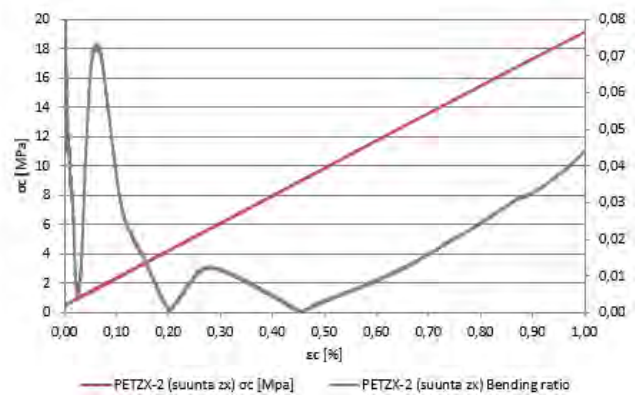
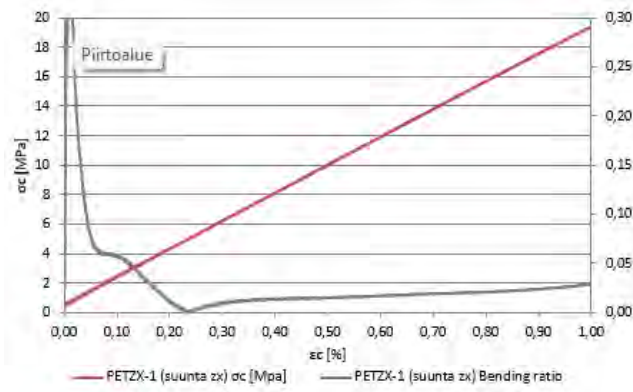
Taulukko 11. Mitsubishi PETG zx-tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot taulukoituna.

Test results (compressive strength):

Compressive test	Thickness	Width	Length	Area	$F_{0.2}$	$\sigma_{0.2}$	S_{max}	$\epsilon_{M max}$	Failure type
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[mm]	[%]	
PETZX-1 (suunta zx)	4,37	10,12	14,94	44,22	2 010	45	1,25	8,4	Plastic deformation
PETZX-2 (suunta zx)	4,31	10,11	14,94	43,57	1 927	44	1,20	8,0	Plastic deformation
PETZX-3 (suunta zx)	4,21	10,18	14,93	42,86	1 970	46	1,04	7,0	Plastic deformation
PETZX-4 (suunta zx)	4,31	10,16	14,98	43,79	1 951	45	1,17	7,8	Plastic deformation
PETZX-5 (suunta zx)	4,15	10,18	14,87	42,25	2 012	48	1,20	8,0	Plastic deformation
Average	4,27	10,15	14,93	43,34	1 974	46	1,17	7,8	
St.deviation	0,09	0,03	0,04	0,79	37	1,3	0,08	0,5	
st.dev.-%	2,07	0,33	0,27	1,81	1,9	3,0	6,72	6,7	

Test results (compressive modulus):

Compressive test	Thickness	Width	Area	Face 1			Face 2			E_0
				σ'_0 ($\epsilon'_0 = 0,1\%$)	σ''_0 ($\epsilon''_0 = 0,3\%$)	E_0	σ'_0 ($\epsilon'_0 = 0,05\%$)	σ''_0 ($\epsilon''_0 = 0,25\%$)	E_0	
Specimen	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	average [MPa]
PETZX-1 (suunta zx)	4,08	10,26	41,86	1,52	5,23	1 854	1,36	5,26	1 950	1 902
PETZX-2 (suunta zx)	4,10	10,21	41,86	1,48	5,10	1 812	1,35	5,19	1 915	1 864
PETZX-3 (suunta zx)	4,13	10,17	42,00	1,69	5,25	1 784	1,29	5,41	2 063	1 923
PETZX-4 (suunta zx)	4,05	10,27	41,59	1,43	5,19	1 883	1,37	5,20	1 914	1 898
PETZX-5 (suunta zx)	4,17	10,28	42,87	1,65	5,16	1 755	1,21	5,12	1 954	1 854
Average	4,11	10,24	42,04			1 817			1 959	1 888
St.deviation	0,05	0,05	0,49			52			61	28
st.dev.-%	1,12	0,46	1,16			2,8			3,1	1,5



Kuvat 62–66. Mitsubishi PETG zx-tulostussuunta-koekappaleiden puristuslujuuden arvot graafisena esityksenä.

2.3.2 Puristuslujuustestien koekappaleet

Puristuslujuuden testit tehtiin kolmella eri koekappalekokoolla (pit.x lev. x kork. [mm x mm x mm]):

15 x 10 x 4

20 x 10 x 4 (ainoastaan koesarjat PA6+CF10 + kevlar ja PA6+CF10 + hiilikuitu)

55 x 10 x 4

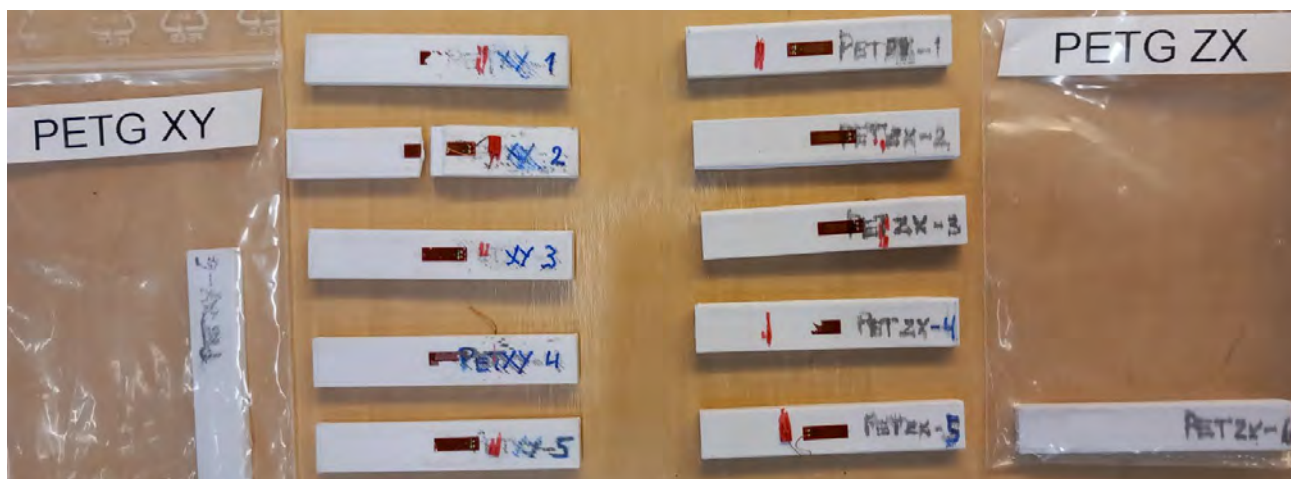
Alla on esitetty kunkin koesarjan puristuslujuuskoekappaleiden kuvat koestuksen jälkeen.



Kuva 67. Onyx CCF- ja Onyx CKF -koesarjojen puristuslujuuskoekappaleet XY-tulostussuunnassa.



Kuva 68. Onyx -koesarjojen puristuslujuuskoekappaleet XY- ja ZX-tulostussuunnassa.



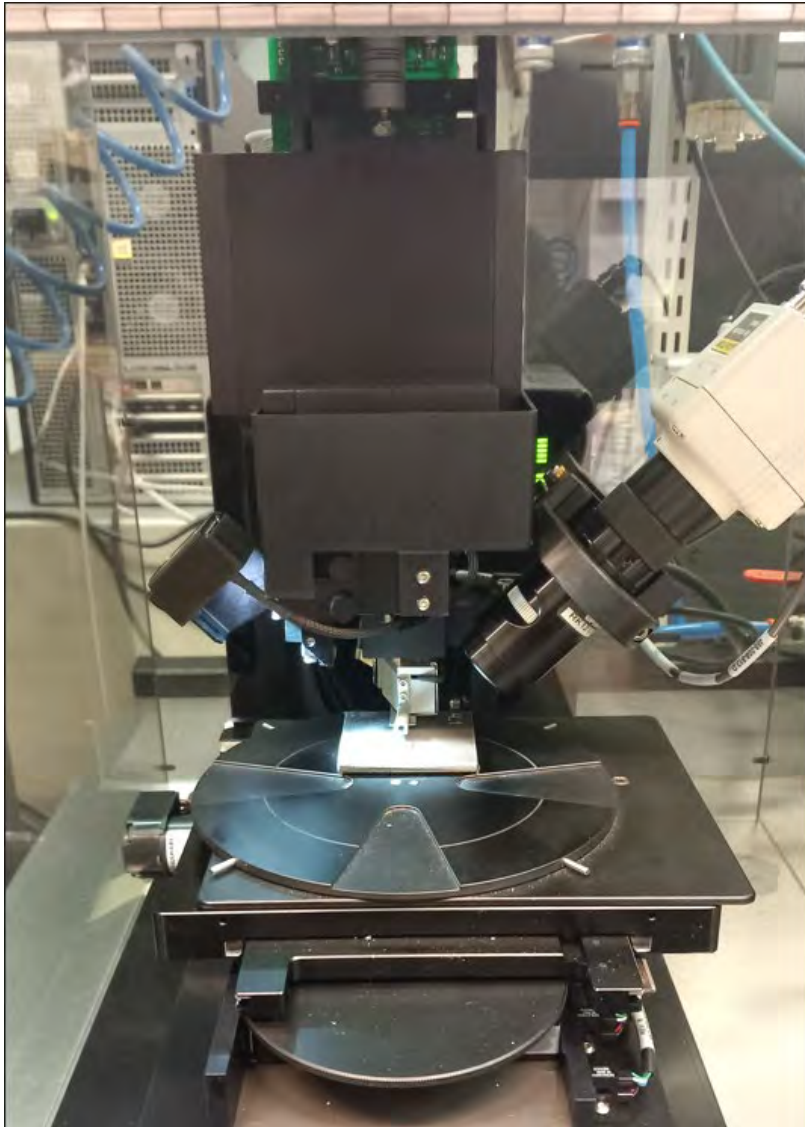
Kuva 69. PETG-koesarjojen puristuslujuuskoekappaleet XY- ja ZX-tulostussuunnissa.



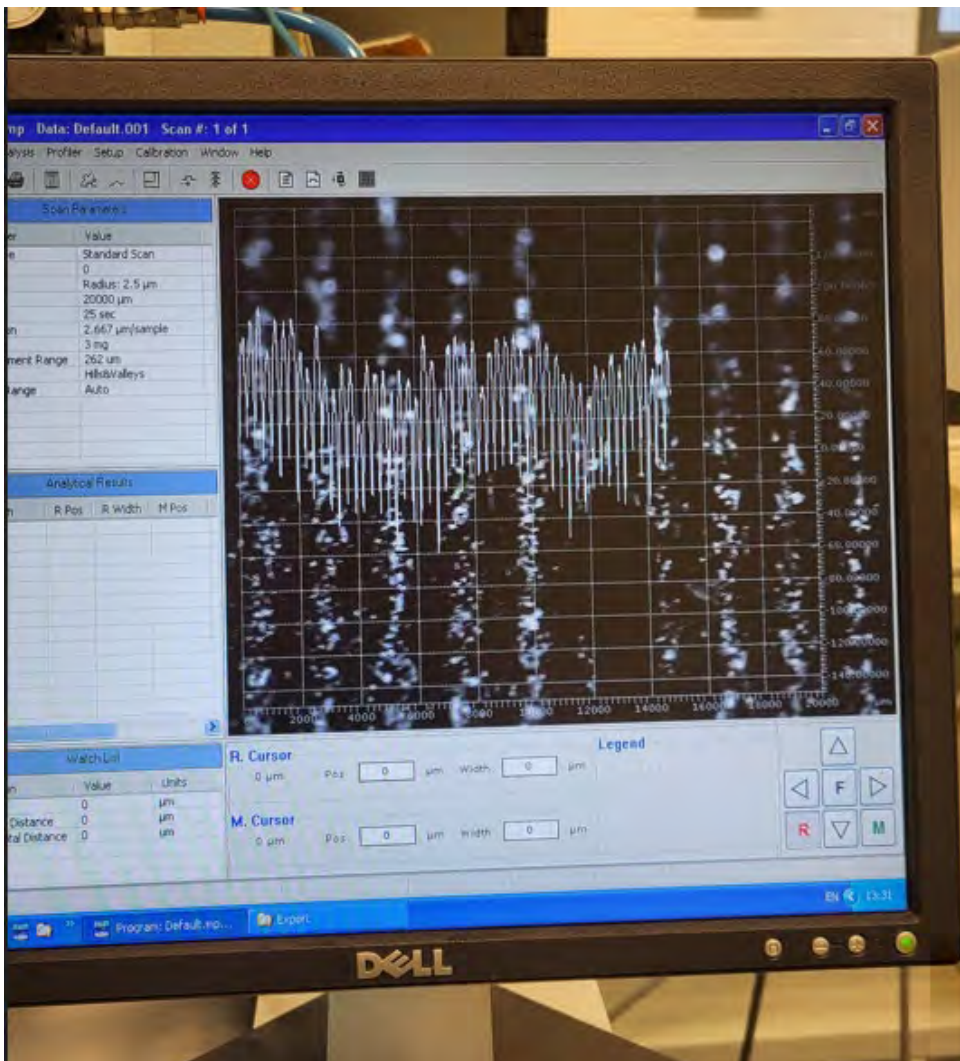
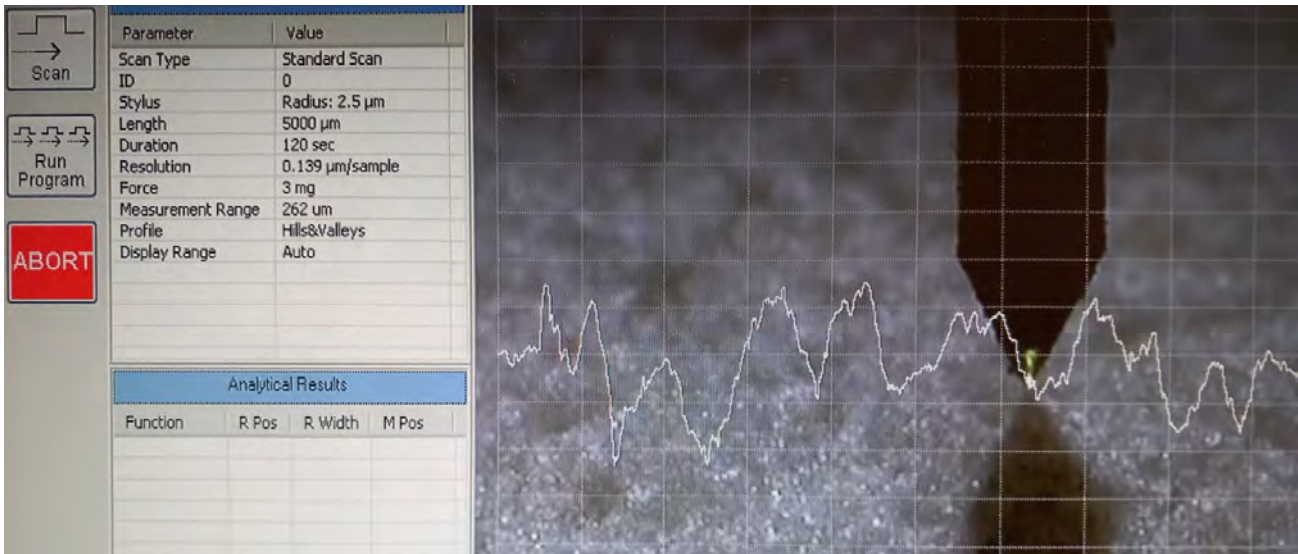
Kuva 70. ULTEM1010-koesarjojen puristuslujuuskoekappaleet XY- ja ZX-tulostussuunnissa.

2.4. Pinnankarheus

Mittauspään mittausalueen pituus oli 20 mm ja kunkin mittauksen kesto aika 120 s.



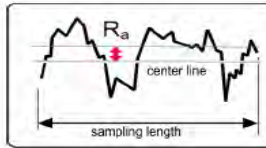
Kuva 71. Pinnankarheusmittaus meneillään Veeco Dektak 6M -profilometrillä.



Kuvat 72–73. Erilaisille pinnoille muodostui yksilölliset ominaiskäyrät.

Pinnankarheuden mittaussuureiden selitteet.

R_a Arithmetical mean deviation. The average roughness or deviation of all points from a plane fit to the test part surface. Available for profile and areal data.



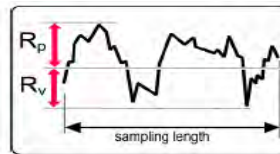
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx$$

R_q
(rms) Root-mean-square (rms) roughness. The average of the measured height deviations taken within the evaluation length or area and measured from the mean linear surface. Available for profile and areal data. R_q is the rms parameter corresponding to R_a.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx}$$

R_v
(Valley) Lowest valley. The maximum distance between the mean line and the lowest point within the sample. It is the maximum data point height below the mean line through the entire data set. Available for profile and areal data. See R_p.

R_p
(Peak) Highest peak. The maximum distance between the mean line and the highest point within the sample. It is the maximum data point height above the mean line through the entire data set. Available for profile and areal data.



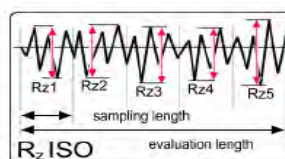
R_t
(PV) Maximum peak-to-valley height. The absolute value between the highest and lowest peaks. Available for profile and areal data.

$$R_t = R_p + R_v$$

R_{sk} Skewness. A measure of symmetry of the profile about the mean line. Negative skew indicates a predominance of valleys, while positive skew indicates a "peaky" surface. Bearing surfaces should have negative skew.

$$R_{sk} = \frac{1}{n(R_q)^3} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i)^3$$

R_z
ISO Average peak-to-valley profile roughness. The average peak-to-valley roughness based on one peak and one valley per sampling length. The single largest deviation is found in five sampling lengths and then averaged. Identical to R_{tm} ISO.



2.4.1 Pinnankarheustestin testitulokset

Pinnankarheuden mittaukset tehtiin molemmin puolin koekappaleita. Silein pinta oli PA6 0 CF10% Onyx AMT postpro jälkikäsittelyllä ja karhein UPM:n Formi 3D20:llä.

Taulukko 12. Pinnankarheudet keskiarvolaskentana.

Materiaali	Kauppanimike	Huomio	Pinnan karheus Ra [µm] (keskiarvo)
Formi 3D20	UPM Formi 3D20	kerroskorkeus 0.2mm	34,1
PA6+CF10	Onyx		8,8
PA6+CF10	Onyx	lasikuulapuhallus jälkikäsittely	5,4
PA6+CF10	Onyx	AMT post pro jälkikäsittely	1,1
PA6+CF10	Onyx	kiillotusrumpu jälkikäsittely	8,1
PETG	Mitsubishi PETG valkoinen	kerroskorkeus 0.2mm	20,6
akryylaatti	IND147	kerroskorkeus 0.05mm	1,9
akryylaatti	Loctite 3172	kerroskorkeus 0.05mm	1,7
PEI	ULTEM 1010		18,2
PA6/66 + CF 20%	Esun ePA-CF		20,5
PA12	PA2200		13,9
PA12	PA2200	AMT post pro jälkikäsittely	4,7

Taulukot 13–24. Pinnankarheuden testitulokset taulukoituna materiaaleittain.

Loctite 3172 -akrylaatti

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
LOCT3172_1_1	1,2	1,5	-6,1	6,1	12,2	1,4	6,1	0,2	8,7
LOCT3172_1_2	1,4	1,8	-5,0	5,8	10,8	1,6	5,8	0,2	9,1
LOCT3172_2_1	1,9	2,4	-6,8	6,1	12,8	2,1	6,8	-0,1	10,4
LOCT3172_2_2	1,6	2,0	-6,0	4,6	10,6	1,9	6,0	-0,4	7,5
LOCT3172_3_1	0,9	1,2	-5,1	6,1	11,1	1,3	6,1	0,9	7,3
LOCT3172_3_2	3,2	4,1	-9,1	13,7	22,8	4,0	13,7	0,7	18,9
LOCT3172_4_1	2,0	2,5	-6,2	6,3	12,5	2,3	6,3	0,0	10,7
LOCT3172_4_2	2,3	3,0	-7,2	10,1	17,3	2,7	10,1	0,6	11,8
LOCT3172_5_1	1,5	1,9	-5,4	8,3	13,8	2,0	8,3	0,7	10,6
LOCT3172_5_2	1,2	1,5	-4,4	6,7	11,1	1,4	6,7	0,3	8,7
Max.	3,2	4,1	-4,4	13,7	22,8	4,0	13,7	0,9	18,9
Min.	0,9	1,2	-9,1	4,6	10,6	1,3	5,8	-0,4	7,3
Average	1,7	2,2	-6,1	7,4	13,5	2,1	7,6	0,3	10,4
St.deviation	0,7	0,8	1,3	2,7	3,8	0,8	2,5	0,4	3,3
st.dev.-%	39,5	38,6	-21,9	36,5	28,2	39,2	33,3	135,9	32,3

PA6/66 + CF 20%

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
Esun ePA-CF 1_1	14,4	17,7	-53,7	38,7	92,4	18,7	53,7	-0,5	74,4
Esun ePA-CF 1_2	14,6	17,7	-53,9	38,3	92,2	15,4	53,9	-0,5	73,7
Esun ePA-CF 2_1	31,4	40,4	-146,8	31,1	177,9	41,1	146,8	-1,6	166,0
Esun ePA-CF 2_2	17,0	23,7	-100,5	33,2	133,7	23,7	100,5	-1,9	118,2
Esun ePA-CF 3_1	13,6	16,9	-53,2	38,2	91,4	18,0	53,2	-0,5	79,9
Esun ePA-CF 3_2	12,4	15,4	-45,8	33,2	79,0	14,6	45,8	-0,5	68,6
Esun ePA-CF 4_1	21,0	25,7	-77,7	40,0	117,7	21,8	77,7	-0,7	108,1
Esun ePA-CF 4_2	31,9	36,8	-98,0	56,5	154,5	33,2	98,0	-0,5	136,4
Esun ePA-CF 5_1	15,3	18,9	-68,4	35,1	103,5	16,9	68,4	-0,8	83,6
Esun ePA-CF 5_2	21,8	26,6	-86,7	40,6	127,3	26,0	86,7	-0,8	113,1
Max.	31,9	36,8	-45,8	56,5	154,5	33,2	98,0	-0,5	136,4
Min.	12,4	15,4	-98,0	33,2	79,0	14,6	45,8	-0,8	68,6
Average	20,5	24,7	-75,3	41,1	116,4	22,5	75,3	-0,6	102,0
St.deviation	7,5	8,2	19,8	9,2	28,0	7,4	19,8	0,2	26,5
st.dev.-%	36,6	33,3	-26,3	22,4	24,1	32,9	26,3	-23,5	26,0

LOCITE IND147 -akrylaatti

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
LOCT147_1_1	3,7	4,6	-14,9	12,6	27,5	3,8	14,9	-0,6	20,8
LOCT147_1_2	2,4	3,0	-9,8	7,5	17,3	3,3	9,8	0,0	13,2
LOCT147_2_1	1,1	1,5	-8,1	5,3	13,4	1,9	8,1	-0,4	7,1
LOCT147_2_2	1,0	1,2	-5,0	4,2	9,2	1,1	5,0	-0,3	6,9
LOCT147_3_1	3,3	4,1	-8,7	12,5	21,1	3,6	12,5	0,3	15,9
LOCT147_3_2	0,4	0,6	-3,6	1,8	5,5	0,6	3,6	-1,1	2,9
LOCT147_4_1	1,4	1,8	-6,7	5,5	12,2	1,9	6,7	-0,6	7,8
LOCT147_4_2	3,5	4,2	-13,4	8,8	22,2	3,9	13,4	-0,5	18,5
LOCT147_5_1	0,8	1,0	-4,2	2,8	7,0	1,0	4,2	-0,3	5,7
LOCT147_5_2	1,2	1,5	-7,2	4,8	12,0	1,3	7,2	-0,1	8,2
Max.	3,7	4,6	-3,6	12,6	27,5	3,9	14,9	0,3	20,8
Min.	0,4	0,6	-14,9	1,8	5,5	0,6	3,6	-1,1	2,9
Average	1,9	2,4	-8,2	6,6	14,7	2,2	8,5	-0,4	10,7
St.deviation	1,2	1,5	3,7	3,7	7,1	1,3	4,0	0,4	6,0
st.dev.-%	65,4	62,9	-45,6	56,8	48,4	57,6	46,5	-105,5	56,1

ONYX LASIKUULAPUHALUS PA6+CF10

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
ONYX LASIK 1_1	2,0	2,5	-7,0	8,2	15,2	1,8	8,2	-0,2	8,8
ONYX LASIK 1_2	6,1	7,1	-15,8	15,7	31,5	5,3	15,8	-0,1	25,8
ONYX LASIK 2_1	4,6	5,6	-14,9	13,9	28,8	3,5	14,9	0,2	18,8
ONYX LASIK 2_2	5,6	7,0	-22,4	17,0	39,4	8,7	22,4	-0,2	30,2
ONYX LASIK 3_1	5,9	7,6	-20,3	21,7	42,0	7,1	21,7	0,1	33,6
ONYX LASIK 3_2	5,9	7,6	-26,8	22,3	49,1	7,4	26,8	-0,1	37,6
ONYX LASIK 4_1	6,1	7,6	-23,1	14,7	37,8	5,7	23,1	-0,2	31,2
ONYX LASIK 4_2	5,3	6,5	-25,6	12,0	37,6	7,0	25,6	-0,4	30,1
ONYX LASIK 5_1	6,6	8,2	-20,4	18,0	38,4	5,7	20,4	0,1	24,7
ONYX LASIK 5_2	5,7	7,0	-20,7	19,5	40,2	6,6	20,7	0,0	32,5
Max.	6,6	8,2	-7,0	22,3	49,1	8,7	26,8	0,2	37,6
Min.	2,0	2,5	-26,8	8,2	15,2	1,8	8,2	-0,4	8,8
Average	5,4	6,7	-19,7	16,3	36,0	5,9	20,0	-0,1	27,3
St.deviation	1,3	1,6	5,8	4,4	9,1	2,0	5,6	0,2	8,3
st.dev.-%	24,4	24,4	-29,6	26,8	25,4	34,3	28,0	-249,5	30,5

ONYX PA6+CF10

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
ONYX_1_1	6,2	8,6	-39,8	17,1	56,9	10,7	39,8	-1,3	33,6
ONYX_1_2	6,4	9,2	-56,3	10,9	67,2	8,8	56,3	-2,3	48,7
ONYX_2_1	9,7	11,8	-37,4	29,6	67,1	11,5	37,4	-0,5	52,4
ONYX_2_2	13,4	16,7	-62,2	30,4	92,6	16,8	62,2	-0,6	70,8
ONYX_3_1	8,0	9,8	-26,7	23,0	49,7	9,9	26,7	-0,1	44,0
ONYX_3_2	7,3	9,1	-27,4	24,6	52,0	8,4	27,4	-0,1	39,4
ONYX_4_1	9,4	11,5	-35,6	28,8	64,4	9,9	35,6	-0,3	49,6
ONYX_4_2	10,9	13,5	-47,1	27,3	74,4	11,2	47,1	-0,5	64,6
ONYX_5_1	8,6	10,5	-28,6	21,0	49,5	7,8	28,6	-0,4	37,0
ONYX_5_2	8,5	10,3	-32,4	24,6	57,0	10,3	32,4	0,0	46,1
Max.	13,4	16,7	-26,7	30,4	92,6	16,8	62,2	0,0	70,8
Min.	6,2	8,6	-62,2	10,9	49,5	7,8	26,7	-2,3	33,6
Average	8,8	11,1	-39,4	23,7	63,1	10,5	39,4	-0,6	48,6
St.deviation	2,2	2,5	12,3	6,1	13,3	2,5	12,3	0,7	11,7
st.dev.-%	24,6	22,1	-31,1	25,7	21,1	23,7	31,1	-115,8	24,1

ONYX AMT PA6+CF10

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
ONYX_AMT_1_1	0,9	1,1	-2,7	3,3	5,9	0,7	3,3	0,1	3,8
ONYX_AMT_1_2	0,9	1,1	-3,5	3,4	6,9	0,7	3,5	-0,4	4,7
ONYX_AMT_2_1	1,5	1,7	-3,7	3,7	7,4	1,4	3,7	-0,1	6,2
ONYX_AMT_2_2	0,9	1,1	-2,8	3,6	6,4	0,6	3,6	0,2	3,8
ONYX_AMT_3_1	0,8	1,0	-2,9	3,2	6,1	0,7	3,2	-0,1	4,3
ONYX_AMT_3_2	0,8	1,0	-2,9	3,6	6,5	1,0	3,6	0,3	3,9
ONYX_AMT_4_1	0,8	1,0	-2,6	2,4	5,1	0,8	2,6	-0,3	3,8
ONYX_AMT_4_2	2,4	3,0	-9,6	6,0	15,6	1,9	9,6	-0,6	11,0
ONYX_AMT_5_1	0,7	0,8	-2,0	2,0	3,9	0,7	2,0	0,1	3,3
ONYX_AMT_5_2	0,9	1,1	-3,5	2,7	6,2	1,0	3,5	-0,4	4,6
Max.	2,4	3,0	-2,0	6,0	15,6	1,9	9,6	0,3	11,0
Min.	0,7	0,8	-9,6	2,0	3,9	0,6	2,0	-0,6	3,3
Average	1,1	1,3	-3,6	3,4	7,0	1,0	3,9	-0,1	4,9
St.deviation	0,5	0,6	2,2	1,1	3,2	0,4	2,1	0,3	2,3
st.dev.-%	49,3	48,4	-59,3	32,1	45,2	42,5	53,8	-276,8	46,4

Mitsubishi PETG valkoinen

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
PETG_1_1	26,8	32,8	-97,9	57,9	155,8	28,8	97,9	-0,5	126,7
PETG_1_2	21,8	26,2	-68,8	33,1	101,9	25,3	68,8	-0,8	98,1
PETG_2_1	7,2	8,3	-15,6	15,4	31,0	7,9	15,6	-0,1	28,6
PETG_2_2	28,0	37,5	-137,6	23,4	161,0	32,3	137,6	-1,9	156,1
PETG_3_1	14,5	17,4	-53,6	29,0	82,6	15,0	53,6	-0,7	68,1
PETG_3_2	14,4	17,4	-49,0	26,6	75,6	14,3	49,0	-0,6	66,9
PETG_4_1	18,1	21,7	-57,6	33,7	91,3	17,4	57,6	-0,5	82,7
PETG_4_2	18,5	22,9	-59,6	50,4	110,0	18,4	59,6	-0,4	90,9
PETG_5_1	16,4	20,3	-58,7	44,3	103,1	18,1	58,7	-0,2	81,8
PETG_5_2	40,2	48,3	-138,1	67,5	205,6	37,5	138,1	-0,7	139,8
Max.	40,2	48,3	-15,6	67,5	205,6	37,5	138,1	-0,1	156,1
Min.	7,2	8,3	-138,1	15,4	31,0	7,9	15,6	-1,9	28,6
Average	20,6	25,3	-73,6	38,1	111,8	21,5	73,6	-0,7	94,0
St.deviation	9,2	11,5	39,3	16,5	49,9	9,2	39,3	0,5	38,0
st.dev.-%	44,7	45,6	-53,4	43,2	44,7	42,7	53,4	-76,4	40,5

ONYX KIILLOTUSRUMPU PA6+CF10

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
ONYX_RU_1_1	11,8	14,4	-39,5	26,0	65,5	17,2	39,5	-0,5	54,5
ONYX_RU_1_2	9,2	11,2	-34,7	19,0	53,7	10,2	34,7	-0,7	49,7
ONYX_RU_2_1	7,6	9,2	-42,4	19,3	61,7	8,4	42,4	-0,3	45,7
ONYX_RU_2_2	3,2	3,9	-7,7	10,5	18,2	2,6	10,5	0,2	13,9
ONYX_RU_3_1	6,8	8,5	-33,3	16,5	49,8	8,1	33,3	-0,5	38,3
ONYX_RU_3_2	7,9	9,7	-26,3	22,8	49,1	9,3	26,3	0,0	41,8
ONYX_RU_4_1	9,6	11,8	-39,8	28,7	68,5	10,9	39,8	-0,4	51,7
ONYX_RU_4_2	8,4	10,4	-31,1	21,3	52,4	9,6	31,1	-0,4	47,1
ONYX_RU_5_1	7,2	8,9	-29,9	21,1	51,0	8,3	29,9	-0,2	40,2
ONYX_RU_5_2	9,0	10,8	-34,1	22,9	57,1	9,3	34,1	-0,2	46,2
Max.	11,8	14,4	-7,7	28,7	68,5	17,2	42,4	0,2	54,5
Min.	3,2	3,9	-42,4	10,5	18,2	2,6	10,5	-0,7	13,9
Average	8,1	9,9	-31,9	20,8	52,7	9,4	32,1	-0,3	42,9
St.deviation	2,2	2,7	9,8	5,1	13,9	3,6	9,1	0,3	11,4
st.dev.-%	27,4	27,3	-30,8	24,3	26,3	37,9	28,2	-83,9	26,5

PA2200 PA12

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
PA2200_1_1	10,5	14,1	-49,8	34,5	84,2	15,4	49,8	-0,7	50,4
PA2200_1_2	15,9	19,9	-58,3	52,3	110,6	23,3	58,3	0,0	79,3
PA2200_2_1	23,0	29,2	-104,7	69,2	173,9	23,9	104,7	-0,4	111,2
PA2200_2_2	11,2	13,3	-30,6	25,5	56,1	10,5	30,6	-0,2	47,1
PA2200_3_1	18,8	20,7	-43,2	31,8	75,0	4,8	43,2	-0,3	33,1
PA2200_3_2	14,3	17,6	-42,0	45,2	87,2	12,7	45,2	-0,1	58,4
PA2200_4_1	14,0	18,4	-77,2	44,7	121,9	21,1	77,2	-0,6	68,5
PA2200_4_2	10,9	12,5	-29,6	27,0	56,5	9,1	29,6	-0,1	44,3
PA2200_5_1	8,7	11,0	-31,2	26,0	57,2	11,2	31,2	-0,6	42,3
PA2200_5_2	11,7	14,7	-38,8	46,9	85,7	16,1	46,9	0,4	60,6
Max.	23,0	29,2	-29,6	69,2	173,9	23,9	104,7	0,4	111,2
Min.	8,7	11,0	-104,7	25,5	56,1	4,8	29,6	-0,7	33,1
Average	13,9	17,1	-50,6	40,3	90,9	14,8	51,7	-0,3	59,5
St.deviation	4,3	5,3	24,0	14,0	36,7	6,4	23,6	0,3	22,6
st.dev.-%	31,2	31,1	-47,5	34,8	40,4	43,1	45,6	-130,3	38,0

PA2200 AMT PA12

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
PA2200_AMT_1_1	3,4	3,9	-8,3	7,7	16,1	2,5	8,3	0,1	9,9
PA2200_AMT_1_2	5,1	6,3	-12,4	16,2	28,5	4,8	16,2	0,0	17,1
PA2200_AMT_2_1	5,2	6,5	-16,1	17,1	33,1	6,5	17,1	0,3	20,7
PA2200_AMT_2_2	8,1	10,1	-22,5	23,1	45,6	5,8	23,1	0,2	24,2
PA2200_AMT_3_1	5,4	6,7	-19,9	14,8	34,7	4,3	19,9	-0,2	23,5
PA2200_AMT_3_2	3,1	3,7	-6,8	7,2	14,0	1,8	7,2	0,0	8,7
PA2200_AMT_4_1	4,8	5,8	-12,8	13,0	25,8	3,9	13,0	0,2	18,5
PA2200_AMT_4_2	2,3	2,7	-6,6	5,7	12,3	1,3	6,6	-0,4	8,0
PA2200_AMT_5_1	3,3	4,2	-12,6	7,7	20,3	3,6	12,6	-0,6	14,4
PA2200_AMT_5_2	6,7	8,3	-22,0	16,2	38,2	4,8	22,0	-0,2	24,1
Max.	8,1	10,1	-6,6	23,1	45,6	6,5	23,1	0,3	24,2
Min.	2,3	2,7	-22,5	5,7	12,3	1,3	6,6	-0,6	8,0
Average	4,7	5,8	-14,0	12,9	26,9	3,9	14,6	0,0	16,9
St.deviation	1,8	2,3	6,0	5,6	11,2	1,7	6,0	0,3	6,4
st.dev.-%	37,4	38,8	-42,6	43,8	41,6	42,2	41,3	-563,1	37,7

ULTEM 1010 PEI

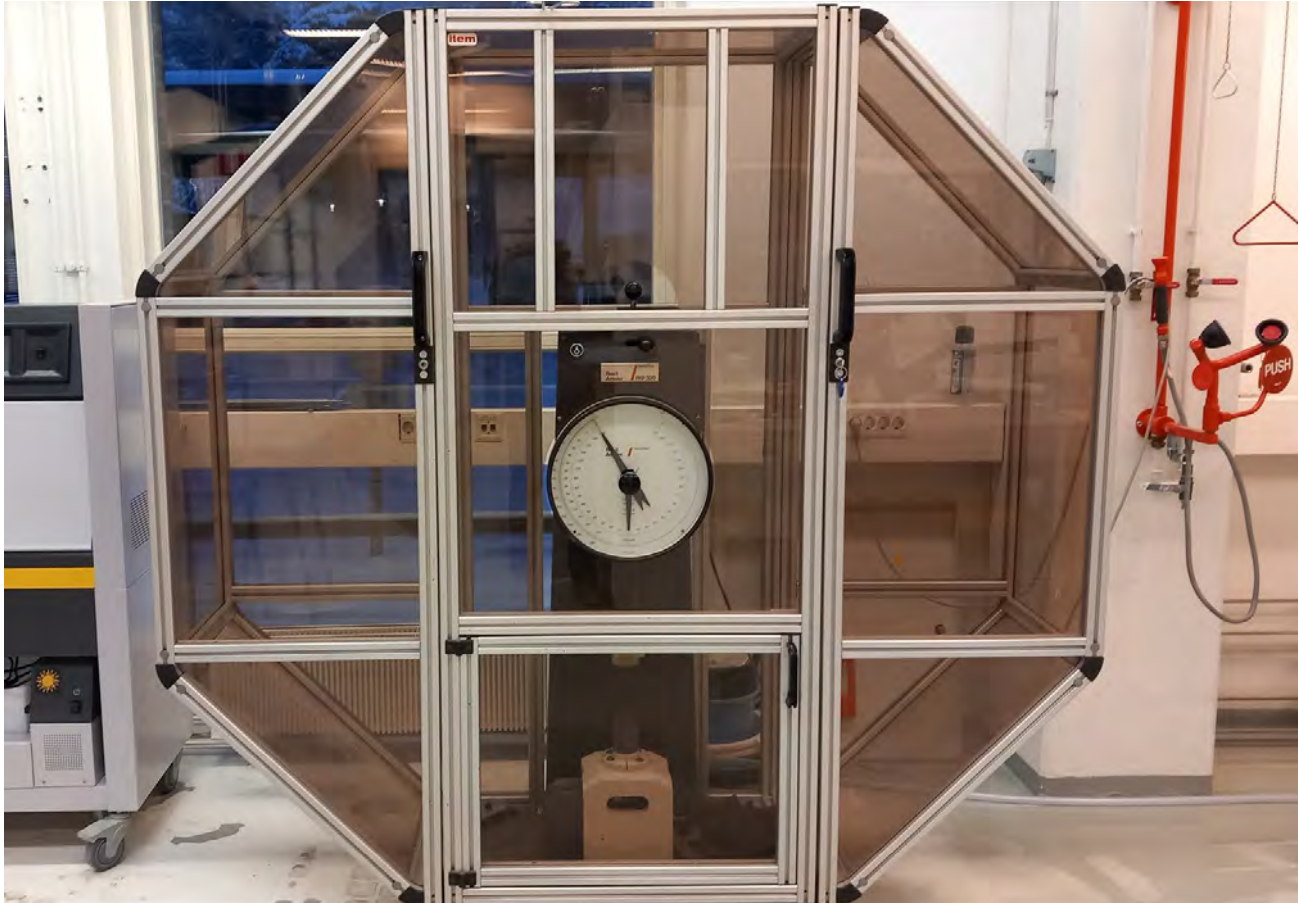
Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
ULTEM_1_1	14,8	17,9	-52,5	28,6	81,1	17,3	52,5	-0,7	72,2
ULTEM_1_2	15,2	18,3	-49,8	24,9	74,7	15,9	49,8	-0,8	68,0
ULTEM_2_1	13,0	17,5	-86,6	24,9	111,5	14,9	86,6	-1,9	78,1
ULTEM_2_2	7,7	9,7	-17,9	28,8	46,7	9,0	28,8	0,7	40,7
ULTEM_3_1	15,1	18,3	-53,3	30,8	84,2	16,7	53,3	-0,6	73,8
ULTEM_3_2	15,4	18,5	-51,8	27,3	79,1	16,4	51,8	-0,8	71,5
ULTEM_4_1	19,1	22,9	-61,3	33,1	94,4	21,5	61,3	-0,8	84,5
ULTEM_4_2	22,4	27,3	-85,7	39,5	125,2	24,8	85,7	-0,9	114,6
ULTEM_5_1	33,6	39,1	-73,9	50,1	124,0	37,6	73,9	-0,7	117,1
ULTEM_5_2	25,2	30,3	-92,6	39,1	131,7	30,4	92,6	-0,9	114,4
Max.	33,6	39,1	-17,9	50,1	131,7	37,6	92,6	0,7	117,1
Min.	7,7	9,7	-92,6	24,9	46,7	9,0	28,8	-1,9	40,7
Average	18,2	22,0	-62,5	32,7	95,3	20,4	63,6	-0,7	83,5
St.deviation	7,3	8,3	22,6	8,0	27,2	8,4	20,4	0,6	24,8
st.dev.-%	40,3	37,6	-36,2	24,5	28,6	41,2	32,0	-86,9	29,7

UPM Formi 3D20

Specimen / measurement	Ra [µm]	Rq [µm]	Rv [µm]	Rp [µm]	Rt [µm]	MaxRa [µm]	MaxDev [µm]	Skew [µm]	RzDin [µm]
UPM_1_1	43,4	52,6	-93,8	107,4	201,2	30,9	107,4	0,0	181,8
UPM_1_2	51,2	57,5	-111,1	114,9	226,0	51,5	114,9	0,2	160,4
UPM_2_1	42,4	51,4	-68,7	128,5	197,2	59,8	128,5	0,5	160,5
UPM_2_2	34,1	43,0	-94,1	110,8	205,0	36,7	110,8	0,2	159,8
UPM_3_1	3,5	4,2	-13,1	12,7	25,8	3,8	13,1	-0,3	18,5
UPM_3_2	9,1	10,5	-27,6	21,0	48,5	7,2	27,6	-0,3	35,1
UPM_4_1	32,7	42,0	-122,8	101,9	224,6	36,8	122,8	0,3	168,8
UPM_4_2	41,5	52,8	-164,3	98,3	262,6	47,4	164,3	-0,2	209,4
UPM_5_1	44,8	53,3	-128,7	106,0	234,7	50,0	128,7	-0,1	174,9
UPM_5_2	38,5	49,5	-176,6	89,2	265,9	60,4	176,6	-0,6	180,8
Max.	51,2	57,5	-13,1	128,5	265,9	60,4	176,6	0,5	209,4
Min.	3,5	4,2	-176,6	12,7	25,8	3,8	13,1	-0,6	18,5
Average	34,1	41,7	-100,1	89,1	189,1	38,4	109,5	0,0	145,0
St.deviation	15,7	18,7	53,1	39,5	83,6	19,9	52,1	0,3	64,1
st.dev.-%	45,9	44,9	-53,0	44,3	44,2	51,8	47,6	-895,5	44,2

2.5 Iskulujuus

Iskulujuus testattiin Roell Amsler RKP 300 -iskutestauslaitteella. Osalla testattavista materiaaleista oli heikko iskukestävyys, jolloin mitta-asteikonlukeminen oli epätarkkaa ja tulokset ovat tältä osin vain suuntaa antavia. Paremmin iskua kestävien materiaalien testitulokset olivat luettavissa, mutta niissäkin saattaa olla epätarkkuutta johtuen mittalaitteen analogisuudesta.



Kuva 74. Iskulujuustesteissä käytetty testilaite.

2.5.1 Iskulujuuden testitulokset

Paras iskulujuus oli ASA-ruiskuvalettu-koekappalesarjalla ja huonoin ASA 3D-tulostetulla sekä PA6/66 + CF20% tulostussuunnassa zx.

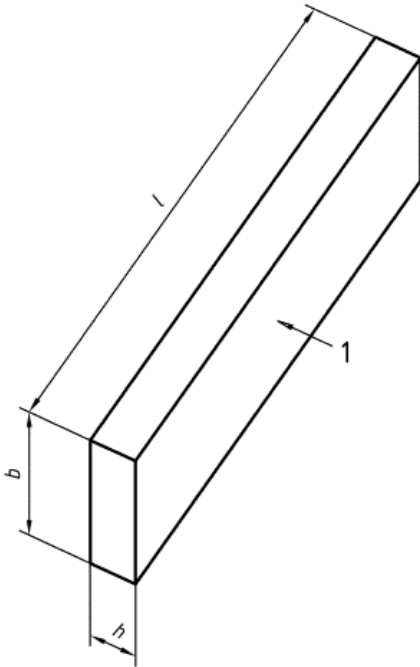
Iskulujuuden aineistot (raakadata, csv, Excel-taulukot yms.) ovat kansiossa [Iskulujuus](#).

Taulukko 25. Iskujuustestin tulokset taulukoituna.

Material	Specimen	Direction	Width, b [mm]	Thickness, h [mm]	Length, l [mm]	Energy absorbed, E [J]	a_{eU} [kJ/m ²]	a_{eU} average and standard deviation
PA6/66 + CF 20%	PAG-1	XY	20,13	4,03	80±0,5	2,3	28,4	30,9 ± 5,7
	PAG-2	XY	20,14	4,00	80±0,5	2,8	34,8	
	PAG-3	XY	20,17	4,02	80±0,5	3,0	37,0	
	PAG-4	XY	20,04	4,01	80±0,5	2,9	36,1	
	PAG-5	XY	20,15	4,03	80±0,5	2,0	24,6	
	PAG-6	XY	20,17	4,02	80±0,5	2,0	24,7	
Average			20,13	4,02		2,5		
PA6/66 + CF 20% 3D-tulostettu	PAG-1	XZ	20,11	4,00	80±0,5	2,1	26,1	27,9 ± 2,9
	PAG-2	XZ	20,10	4,03	80±0,5	2,1	25,9	
	PAG-3	XZ	20,12	4,05	80±0,5	2,2	27,0	
	PAG-4	XZ	20,15	4,03	80±0,5	2,2	27,1	
	PAG-5	XZ	20,11	4,13	80±0,5	2,8	33,7	
	PAG-6	XZ	20,13	4,16	80±0,5	2,3	27,5	
Average			20,12	4,07		2,3		
PA6/66 + CF 20%	PAG-1	ZX	20,03	4,06	80±0,5	0,1	1,2	2,2 ± 1,9
	PAG-2	ZX	20,05	4,07	80±0,5	0,1	1,2	
	PAG-3	ZX	20,04	4,09	80±0,5	0,1	0,6	
	PAG-4	ZX	20,05	4,06	80±0,5	0,1	1,2	
	PAG-5	ZX	20,03	4,02	80±0,5	0,5	6,2	
	PAG-6	ZX	20,05	4,06	80±0,6	0,2	2,5	
	PAG-7	ZX	20,00	4,03	80±0,5	0,2	2,5	
Average			20,04	4,06		0,2		
ASA 3D-tulostettu 3D-tulostettu	A3D1	XY	21,11	3,55	80±0,5	2,8	37,4	35,2 ± 4,1
	A3D2	XY	20,68	3,72	80±0,5	2,8	36,4	
	A3D3	XY	21,06	3,60	80±0,5	2,9	38,3	
	A3D4	XY	20,87	3,72	80±0,5	2,3	29,0	
	A3D5	XY	20,97	3,68	80±0,5	3,0	38,9	
	A3D6	XY	20,20	3,58	80±0,5	2,3	31,1	
Average			20,82	3,64		2,7		
ASA 3D-tulostettu	A3D1	XZ	19,84	4,41	80±0,5	6,9	78,9	59,5 ± 16,4
	A3D2	XZ	20,00	4,79	80±0,5	6,0	62,6	
	A3D3	XZ	19,95	4,92	80±0,5	4,2	42,8	
	A3D4	XZ	19,91	4,81	80±0,5	4,4	45,9	
	A3D5	XZ	19,96	4,68	80±0,5	4,5	48,2	
	A3D6	XZ	19,78	4,43	80±0,5	6,9	78,7	
Average			19,91	4,67		5,5		
ASA 3D-tulostettu	A3D1	ZX			80±0,5			Vioittunut 0,8 ± 0,3
	A3D2	ZX	19,00	3,88	80±0,5	0,1	0,7	
	A3D3	ZX	19,08	3,96	80±0,5	0,1	0,7	
	A3D4	ZX	18,91	3,93	80±0,5	0,1	1,3	
	A3D5	ZX	18,88	3,85	80±0,5	0,1	0,7	
	A3D6	ZX	18,87	3,97	80±0,6	0,1	0,7	
Average			18,95	3,92		0,1		
ASA-ruiskuvalettu	ARV1	-	19,92	4,16	80±0,5	11,5	138,8	118,5 ± 27,7
	ARV2	-	19,96	4,17	80±0,5	9,2	110,5	
	ARV3	-	19,82	4,14	80±0,5	11,9	145,0	
	ARV4	-	20,06	4,15	80±0,5	6,0	72,1	
	ARV5	-	20,13	4,18	80±0,6	9,0	107,0	
	ARV6	-	19,89	4,17	80±0,5	11,4	137,4	
Average			19,96	4,16		9,8		

2.5.2 Iskulujuustestin koekappaleet

Koekappaleiden ASA 3D-tulostettu mitat eivät olleet standardin ISO 179-1/1fUc mukaisen toleranssien sisässä: $l=80\pm 2$, $b=20,0\pm 0,2$ ja $h=4,0\pm 0,2$. Muut materiaalit sisältyivät annettuihin toleransseihin.



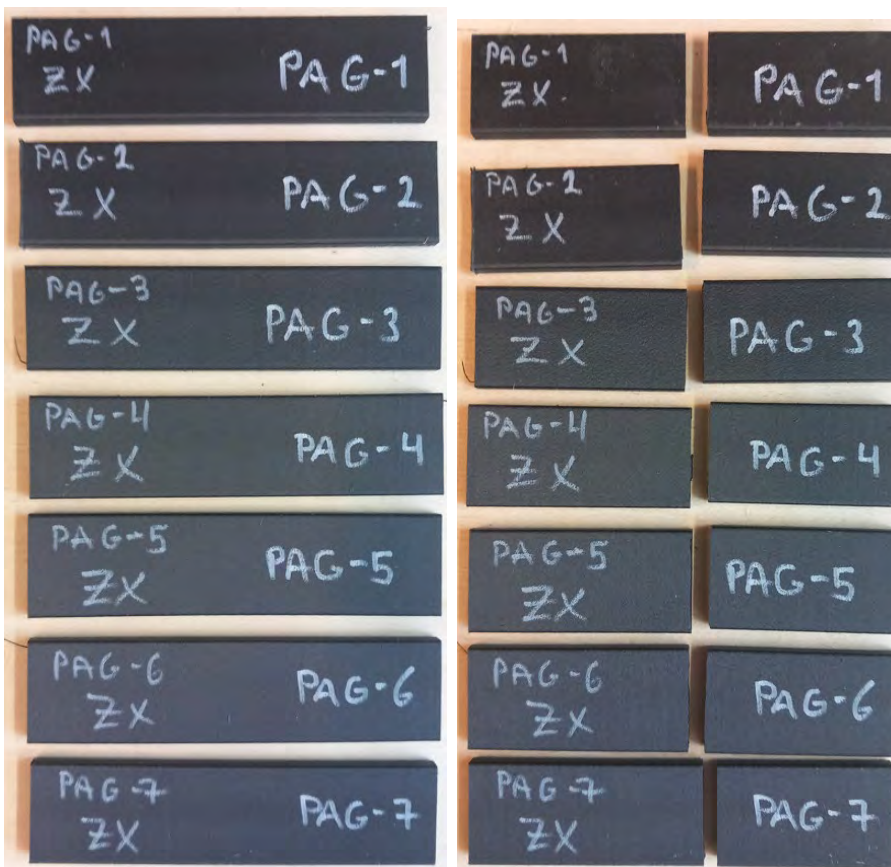
Kuva 75. Kaikkien iskulujuuden koekappaleiden keskiarvomitat olivat: leveys $b = 20,01$ mm, paksuus $h = 4,08$ mm ja pituus $l = 80$ mm.



Kuva 76. PA6/66 + CF 20 % xy-suunta-koesarjan iskulujuuden koekappaleet ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 77. PA6/66 + CF 20 % xz-suunta-koesarjan iskulujuuden koekappaleet ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 78. PA6/66 + CF 20 % zx-suunta-koesarjan iskulujuuden koekappaleet ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 79. ASA 3D-tulostettu xy-suunta-koesarjan iskulujuuden koekappaleet ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 80. ASA 3D-tulostettu xz-suunta-koesarjan iskulujuuden koekappaleet ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 81. ASA 3D-tulostettu zx-suunta-koesarjan iskulujuuden koekappaleet ennen ja jälkeen koestuksen.



Kuva 82. ASA ruiskuvalettu-koesarjan iskulujuuden koekappaleet ennen ja jälkeen koestuksen.

2.6 Dynaamismekaaninen-termoanalyysi (DMA)

Testit suoritettiin NETZSCH DMA 242 E -DMA-laitteistolla.



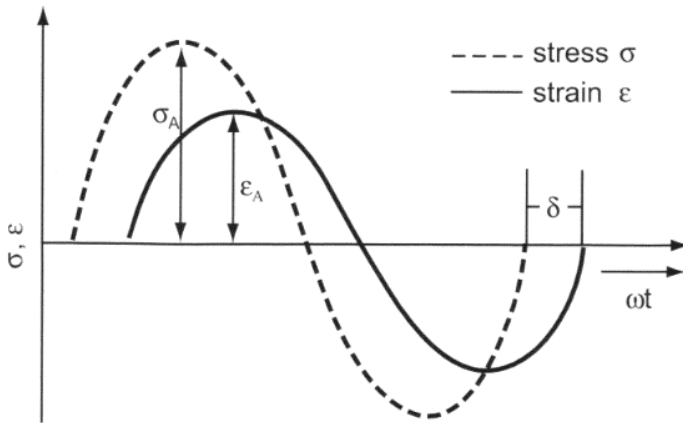
Kuva 83. DMA-testeissä käytetty laitteisto.

2.6.1 DMA teoriaa

Dynaaminen mekaaninen analyysi (DMA) antaa tietoa näytteen mekaanisista ominaisuuksista, jotka on asetettu pieneen värähtelevään sinimuotoiseen voimaan. Käytetty mekaaninen jännitys σ_A saa aikaan vastaavan venymän ε_A , ja näiden kahden amplitudi ja vaihesiirto voidaan määrittää, kuva 84. Kompleksimoduuli E^* on jännityksen amplitudin suhde venymän amplitudiin ja edustaa materiaalin jäykkyyttä:

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} \quad (1)$$

Kompleksimoduuli koostuu tallennusmoduulista E' (reaaliosa) ja häviömoduulista E'' (imaginaari-osa).



Kuva 84. Lineaarisesti viskoelastisen materiaalin sinimuotoinen värähtely ja vaste; δ = vaihekulma, σ = jännitys ja ε = venymä.

ISO 6721-1 -standardin mukaan varastointimoduuli E' edustaa viskoelastisen materiaalin jäykkyyttä ja on verrannollinen latausjakson aikana varastoituu energiaan. Se on suunnilleen yhtä suuri kuin yksittäisen, nopean jännityksen kimmomoduuli pienellä kuormituksella ja palautuvalla muodonmuutoksella.

Häviömoduuli E'' määrittellään verrannolliseksi yhden latausjakson aikana hävinneeseen energiaan. Se edustaa energiahäviötä lämpönä ja on värähtelyenergian mitta, joka on muunnettu värähtelyn aikana ja jota ei voida ottaa talteen.

Moduulin todellista osaa voidaan käyttää elastisten ominaisuuksien arvioimiseen ja kuvitteellista osaa viskoosiominaisuuksiin. Moduularvot ilmaistaan megapascaleina.

Vaihekulma δ on dynaamisen jännityksen ja dynaamisen jännityksen välinen vaihe viskoelastisessa materiaalissa, joka on altistettu sinimuotoiselle värähtelylle. Vaihekulma ilmaistaan radiaaneina. Häviökerroin $\tan \delta$ on häviömoduulin ja varastointimoduulin suhde. Se on energiahäviön mitta, joka ilmaistaan talteen otettavana energiana, ja se edustaa mekaanista vaimennusta tai sisäistä kitkaa viskoelastisessa järjestelmässä. Häviökerroin ilmaistaan dimensiottomana lukuna. Korkea $\tan \delta$ -arvo osoittaa, että materiaalissa on korkea ei-elastinen komponentti, kun taas pieni arvo osoittaa, että yksi komponentti on joustavampi.

Laskentakaavat E^* , E' , E'' ja $\tan \delta$:

$$|E^*| = \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2} \quad (2)$$

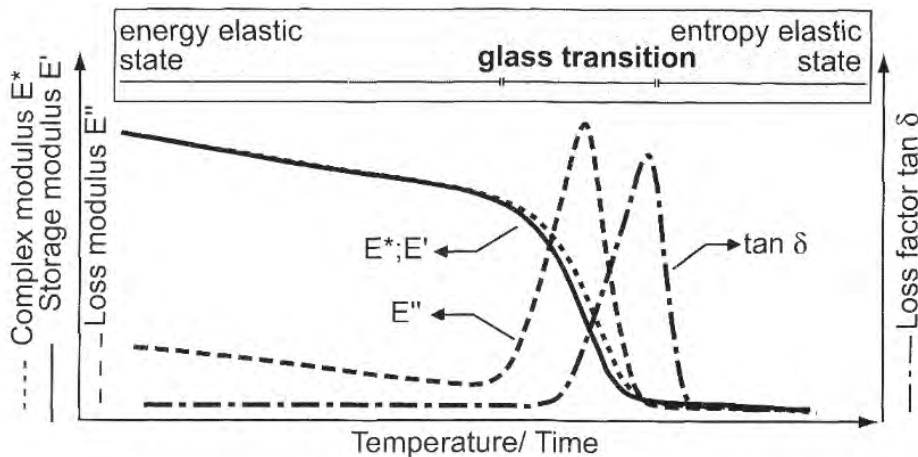
$$E'(\omega) = |E^*| \cdot \cos \delta \quad (3)$$

$$E''(\omega) = |E^*| \cdot \sin \delta \quad (4)$$

$$\tan \delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} \quad (5)$$

Tyypilliset amorfisen polymeerin muutoskäyrät on esitetty kuvassa 85. Alhaisissa lämpötiloissa molekyylit ovat niin liikkumattomia, että ne eivät pysty resonoimaan värähtelyvoiman kanssa ja siksi materiaali pysyy jäykkänä. Korotetuissa lämpötiloissa molekyylisegmentit tulevat helposti liikkuviksi ja voivat resonoida värähtelyvoimalla. Lasittumislämpötilassa, kun molekyyli liikkeen aikaskaalaus on

sama kuin mekaanisen muodonmuutoksen aika, jokainen värähtely muuttuu sisäiseksi kitkaksi ja ei-elastiseksi muodonmuutokseksi. Häviömoduuli (energiahäviö) saavuttaa maksimiarvon. T_g -lämpötilassa varastointi vähenee lämmityksen aikana murto-osaan alkuperäisestä lasittumis-arvostaan.



Kuva 85. Kaavio tyypillisistä DMA-käyristä amorfiselle polymeerille.

2.6.2 DMA-testitulokset

DMA-esitestien ja varsinaisten testien graafit ovat kansiossa [DMA](#)

Laminaattimateriaaleille käytetyt DMA-testiparametrit on lueteltu alla:

- Kolmen pisteen taivutus, jänneväli 40 mm
- Suhteellisuuserroin 1,3
- Max. amplitudi 10,0 μm
- Max. dynaaminen voima näytteeseen 6,1 N
- Näytteen jatkuva staattinen voima 0,05 N
- Sinitaajuus 1,0 Hz
- Lämpötilasykli:
 - alkulämpötila 20 °C
 - lämmitysjakso 260 °C asti

Oikea lämpötila-alue haettiin tehtyjen esitestien avulla.

Testitulokset koostettuna

Ultem1010:

- selkeä lasittumislämpötila johtuen amorfisesta rakenteesta, $T_g = 186$ °C määritettynä varastomodulin onset-arvosta
- näytteen jäykkyys heikkeni lineaarisesti lämpötilan funktiona aina T_g -lämpötilaan asti

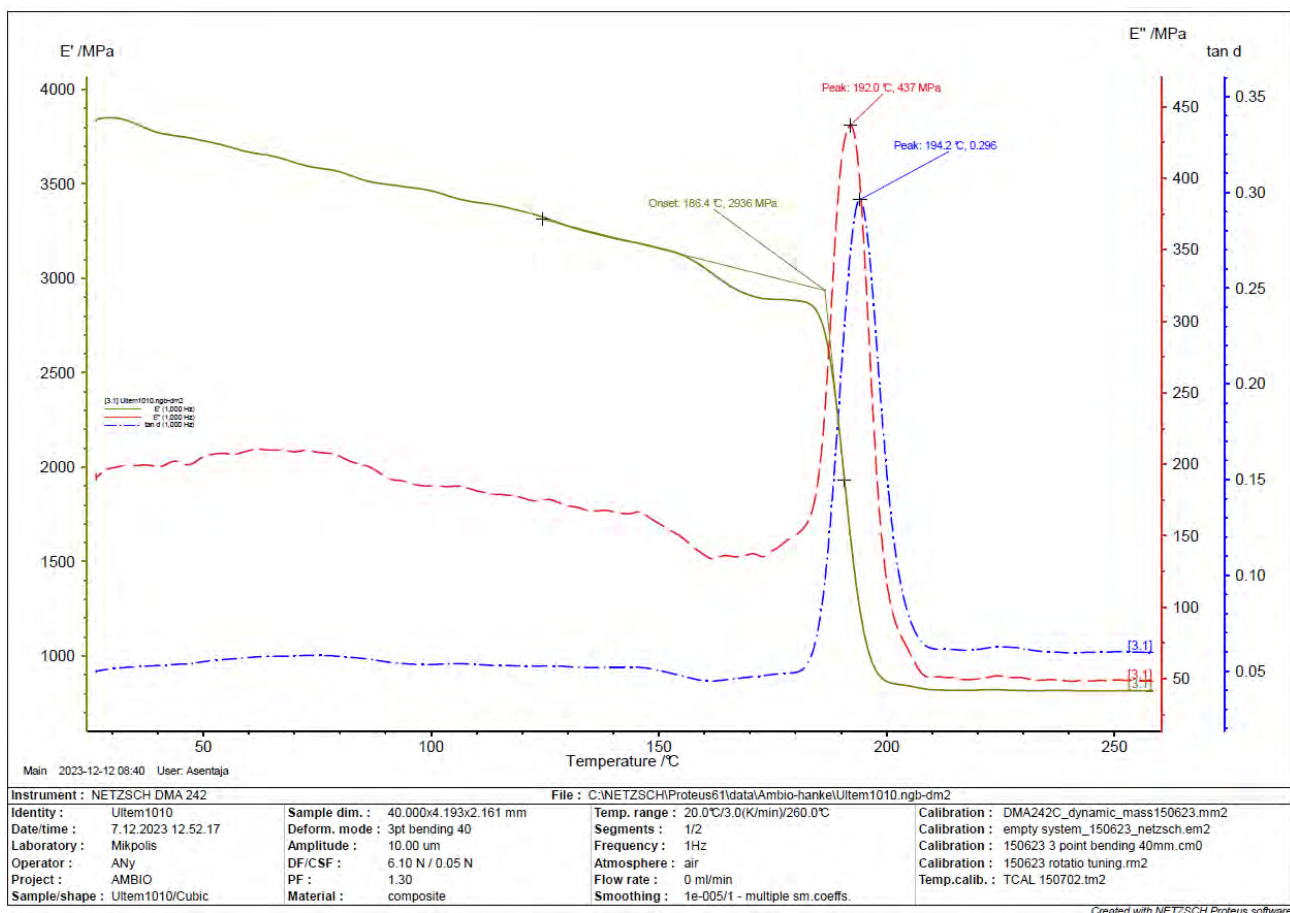
Rigid 10K:

- lasittumislämpötila-alue oli laaja (ΔT oli noin 100 °C); jäykkyyden muutos alkaa matalassa lämpötilassa
- T_g -lämpötila määritettynä E' :n onset-menetelmällä oli 40°. $\tan d$ huippuarvolla määritettynä T_g on noin 110 °.

Onyx:

- DMA:lla määritettiin kaksi transiilämpötila-aluetta johtuen materiaalimuutoksista amorfisessa sekä kiteisessä faaseista. T_g -lämpötilat määritettynä onset-menetelmällä varastomoduligraafista ovat noin 8 °C ja 154 °C
- ensimmäinen lasittumislämpötila-alue on laajahko (ΔT oli n. 50 °C); jäykkyyden muutos alkaa matalassa lämpötilassa. Jäännösjäykkyys romahtaa lähelle 0-arvoa noin 150 °C kohdalla ja jatkaa laskua sen jälkeen.

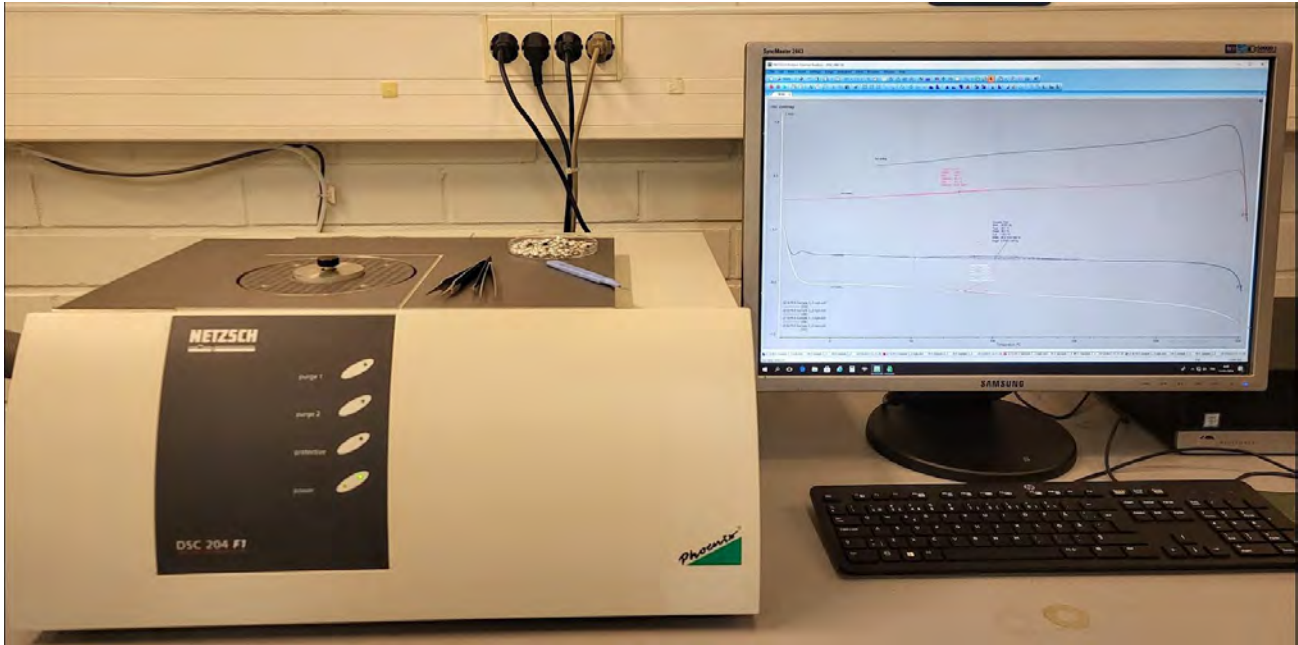
Kuvassa 86 on esitetty DMA-testin graafit koekappaleelle ULTEM1010. Tutkittavan näytteen ominaisuuksien mukaan DMA:lla voidaan määrittää viskositeettia ja elastisuutta. DMA mittaa näytteen jäykkyyttä ja vaimennusta. Jäykkyys ilmoitetaan moduulina (modulus) ja vaimennus häviön tangenttina (loss tangent, tan d). Moduuli jaetaan edelleen varastomoduliin (E') ja häviömoduliin (E''), jotka vastaavat elastisia ja viskoottisia komponentteja.



Kuva 86. Kuvassa koekappaleen Ultem1010 E' -, E'' - ja tan d -kuvaajat.

2.7 Sulamislämpötila-alueen määrittäminen (DSC)

Testit suoritettiin NETZSCH DSC 204 FI -DSC-laitteistolla (kuva 87).

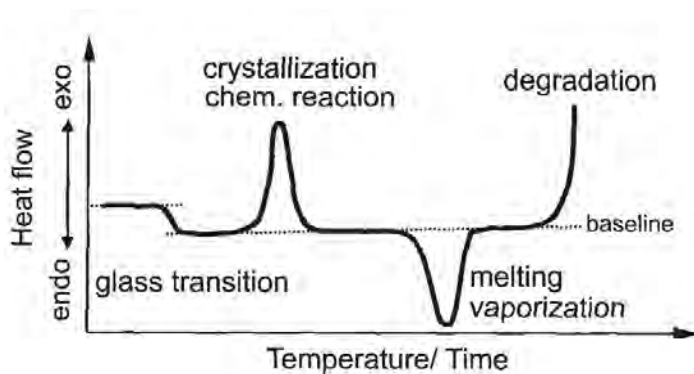


Kuva 87. DSC-testeissä käytetty laitteisto.

2.7.1 DSC teoriaa

Kalorimetria on tekniikka, jolla määritetään fysikaalisen tai kemiallisen muutoksen läpikäyvän aineen joko absorboima tai vapauttama lämpömäärä. Tämä muuttaa aineen sisäistä energiaa. Vakiopaineessa sisäinen energia tunnetaan entalpiana, H . Entalpiaa lisäävät prosessit, kuten sulaminen, haihtuminen tai lasisiirtymä, ovat endotermisiä. Ne, jotka alentavat entalpiaa, ovat eksotermisiä, kuten kiteytyminen, progressiivinen kovettuminen ja hajoaminen.

Entalpiian muutos mitataan kalorimetrillä tallentamalla lämpövuon siirtymä perusviivasta (käyrän lineaarinen osa), kuva 88.



Kuva 88. DSC-kaavio, jossa näkyy tärkeimmät siirtymät.

2.7.2 DSC-testitulokset

DSC-aineiston raakadata ja graafit ovat kansiossa [DSC](#)

CFRP:n DSC-analyysit:

- Kalorimetriset analyysit kahdella rinnakkaisella näytteellä näyte-erästä
- Analyysiohjelma: 2 x 0...300 °C (lämmitys/jäähdytysnopeus 20 °C/min) 5 min isotermissillä sykleillä ennen/välillä dynaamisia syklejä, näytemassa 5...15 mg, N₂-atmosfääri
- Näytteiden kokonaisuudessa on mukana
- Tyhjä vertailuastia

Aluksi tehtiin esitestit materiaalin termisen hajoamislämpötilan määrittämiseksi.

Woodyly:

- materiaalin hajoamislämpötila yli 300 °C
- ensimmäisessä lämmityssyklissä havaittavissa kaksi endotermistä aluetta, jotka liittyvät materiaalin pehmenemiseen tai sulamiseen
- toisen lämmityssyklin perusteella materiaalin sulaminen alkaa 150 °C kohdalla; polymeerin kiteinen rakenne on sulanut noin 170 °C kohdalla. Sulamisentalpian suuruus noin 1,8 J/g
- materiaalin kiteytyminen jäähdytyksen aikana alkaa noin 140 °C lämpötilassa

RPET:

- materiaalin hajoamislämpötila yli 350°
- ensimmäisessä lämmityssyklissä on havaittavissa lasittumis- sekä sulamislämpötila-alueet
- lasittumislämpötila onset-arvoon perustuen on noin 76 °C
- toisen lämmityssyklin perusteella materiaalin sulaminen alkaa 230 °C kohdalla, polymeerin kiteinen rakenne on sulanut noin 240 °C kohdalla. Sulamisentalpian suuruus noin 54,7 J/g
- materiaalin kiteytyminen jäähdytyksen aikana alkaa noin 200 °C lämpötilassa

PES:

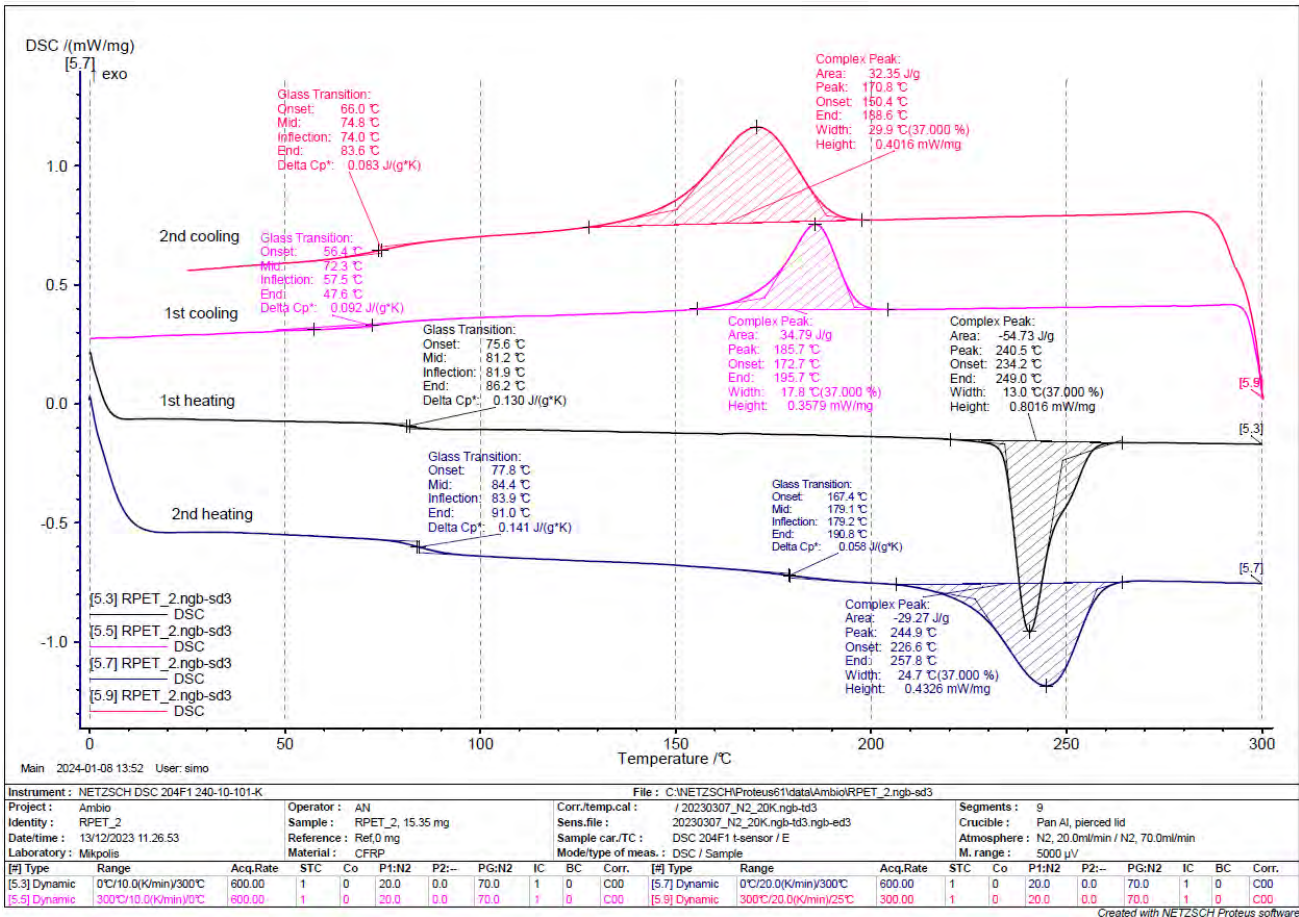
- ei havaittavissa selkeää lasittumista
- PES:n jatkuva lämmönkesto on maksimi 180 °C ja lyhyessä lämpökuomituksessa maks. 210 °C. Sen lasittumislämpötila on 225 °C (kirjallisuus)
- PES on periaatteessa amorfinen muovi, mutta siitä löytyi vastoin odotuksia sulamislämpötila
- Sample 3 PES (Vihreä kierrätetty polyesteri) sulaminen alkoi noin 247 °C kohdalla ja saavutti maksimin 254 °C kohdalla. Vastaavat arvo näytteelle Sample 4 PES (Sininen kierrätetty polyesteri) olivat likipitään samat.

Taulukossa 26 on esitetty tärkeimmät tulokset koostettuna.

Taulukko 26. Materiaalien sulamispiste, hajoamislämpötila ja kiteytyminen jäähdytyksessä.

Tärkeimmät lämpötila-alueet	Woodyly	RPET	PES
Sulamisen alkaa (°C)	150	230	247
¹⁾ Hajoamislämpötila (°C)	300	350	>350
Kiteytyminen jäähdytyksessä (°C)	140	200	n. 200
¹⁾ Hajoamispiste määritetty ennen varsinaista testiä (tunnus ref)			
oikean skaalauksen saamiseksi.			

Kuvassa 89 on esitetty DMC-analyysin vaiheet. Kuva on RPET 2-näytteestä. Analyysiohjelma: 2 x 0...300 °C (lämmitys/ jäähdytysnopeus 20 °C/min) 5 min isoteremisillä sykleillä ennen/välillä dynaamisia syklejä, näytemassa 5...15 mg, N₂-atmosfääri.



Kuva 89. Esimerkki DMC-analyysistä. Näytteenä RPET 2.

2.8 MicroCT

MicroCT avulla haluttiin selvittää materiaalien sisäistä rakennetta ja kiinteyttä. Mikro-CT on 3D-kuvantamistekniikka, jossa käytetään röntgensäteitä objektin sisäpuolelle siivu kerrallaan. Mikro-CT, jota kutsutaan myös mikrotomografiaksi tai mikrotietokonetomografiaksi, muistuttaa sairaaloiden tietokonetomografia- tai CAT-kuvausta, mutta se on pienimuotoinen ja sen resoluutio on huomattavasti suurempi. Näytteitä voidaan kuvata jopa 100 nanometrillä pikselikoolla, ja kohteita voidaan skannata jopa 200 millimetrin halkaisijalla.

MicroCT-testeissä koekappaleina olivat Ultem1010, Rigid 10K ja Onyx. Kappaleet erosivat siten, että Rigid 10K on tulostettu nestehartsikoneella (DLP) ja Ultem1010 sekä Onyx kerroksittain Fused Filament Fabrication/Fused Deposition Modelling -tekniikalla kelalta. Näissä kerroksisuus näkyi selvästi toisin kuin Rigid 10K -koekappaleessa.

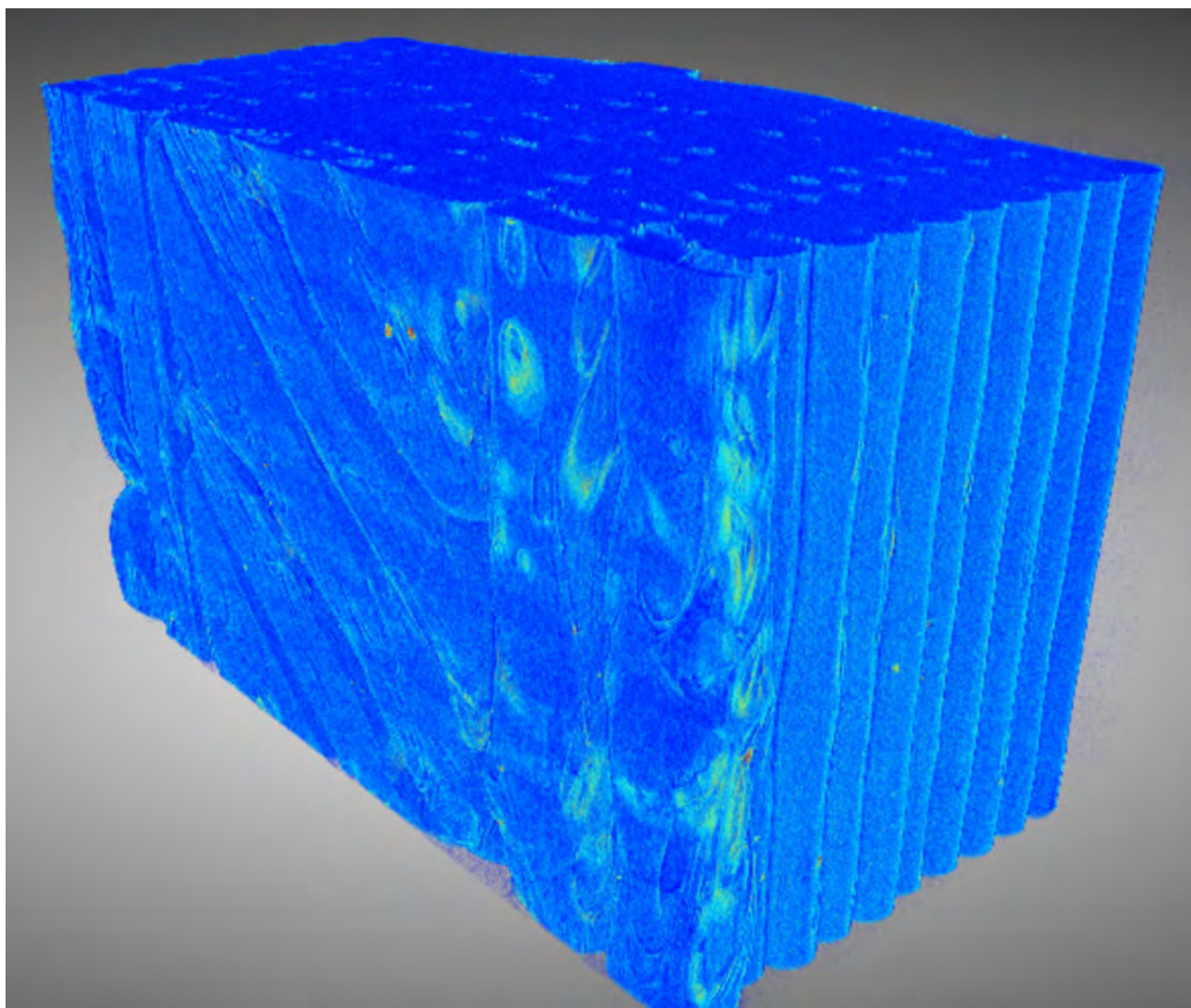
Näytteet näyttivät tasa-aineisilta, joten niissä kiinnitettiin huomioita ennen kaikkea ilmahuokosiin. Taulukossa 27 on esitetty koekappaleiden ilmanpitoisuus eli ilmahuokosten määrä verrattuna koko koekappaleen tilavuuteen.

Taulukko 27. Tutkittujen koekappaleiden ilmapitoisuudet, jotka johtuivat kappaleen sisäisistä ilmahuokosista.

Koekappale	Ilmapitoisuus-%
Ultem1010	4,7
Onyx	5,6
Rigid 10K	1,3

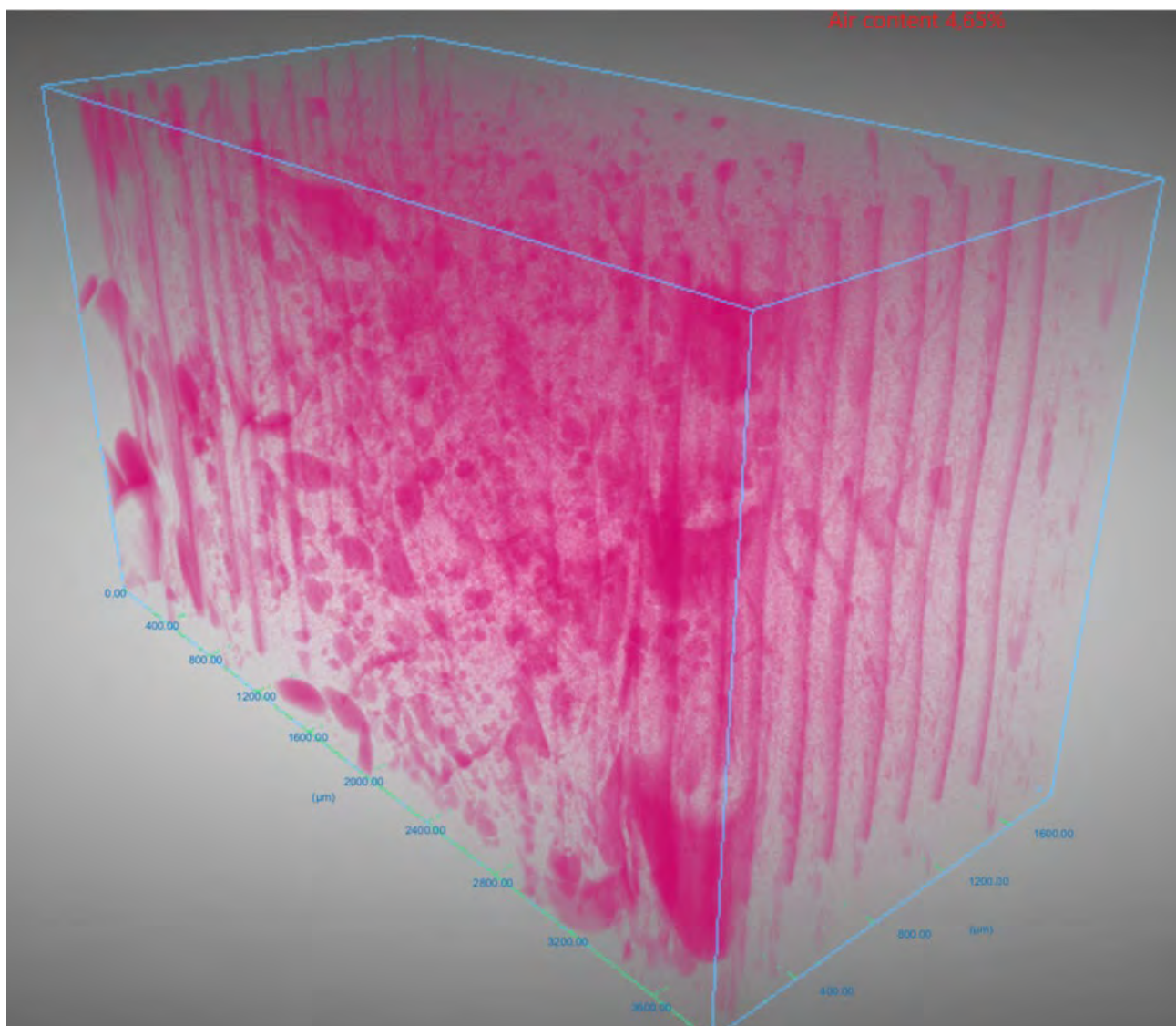
Taulukosta 27 voidaan havaita, että nestehartsitekniikalla 3D-tulostettuna on saatu tasa-aineisempi kappale, jonka ilmapitoisuus on pienempi kuin FFF-tekniikalla valmistetuilla koekappaleilla.

Kuvassa 90 on esitetty Ultem1010-koekappaleen [Neoscan CTS N80](#) MicroCT-laitteella skannattu kuva.



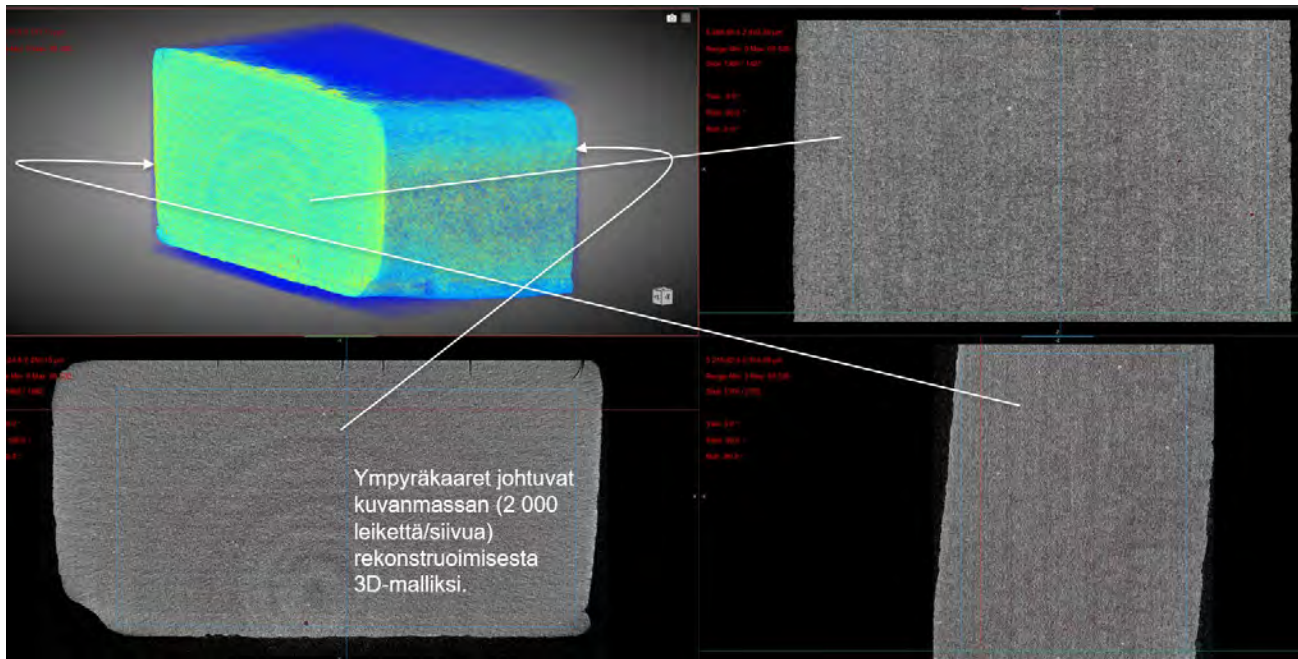
Kuva 90. Ultem1010-koekappaleessa kerroksisuus ja huokoisuus näkyy selvästi.

Kuvassa 91 punertava osa on ilmaa. Se on selvästi havaittavissa kerrostulostamisessa pystysuuntaisina "sauvoina".



Kuva 91. Utem1010-koekappaleessa "ilmakanavat" ovat selvästi havaittavissa. Kappaleen mitat näkyvät tahkoissa (µm).

Kuvassa 92 on esitetty Rigid 10K -koekappaleen projektiot. Tasa-aineisuus on havaittavissa.



Kuva 92. Rigid 10K-koekappaleen projektiot kolmesta suunasta.

MicroCT- mikrotomografialaitteella otetut kuvat löytyvät kansioista [MicroCT](#).