



# **Materiaalit ja liittämismenetelmät 3D- tulostetulle venyväälle elektroniikalle**

**Juhani Lahtinen**

OPINNÄYTETYÖ  
Syyskuu 2019  
Biotuote- ja prosessitekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuote- ja prosessitekniikka

LAHTINEN, JUHANI:

Materiaalit ja liittämismenetelmät 3D-tulostetulle venyväälle elektroniikalle

Opinnäytetyö 66 sivua, joista liitteitä 13 sivua  
Syyskuu 2019

---

Tässä työssä kokeiltiin erilaisia filamenttimateriaaleja ja liittämismenetelmiä venyvän elektroniikan rakenteisiin. Lisäksi testattiin 3D-tulostettujen tukirakenteiden vaikutusta venyvän johtimen sähkömekaaniseen kestävyYTEEN.

Käytetyistä filamenteista termoplastinen polyuretaani (TPU) osoittautui yliver-  
taiseksi venyvän elektroniikan tarkoituksiin. Vetokokeissa TPU-pohjaiset näytteet  
venyivät jopa 270 % ja niillä oli ylivertainen venyvyys muihin materiaaleihin ver-  
rattuna. TPU-materiaalin kovuutta vaihtamalla saatiin hyvin erilaisia tuloksia.

Lisäksi työssä verrattiin kuoriutumiskokeiden avulla kahta erilaista menetelmää  
3D-tulostetun rakenteen liittämiseksi substraattikalvolle. Ns. suoratulostusmene-  
telmässä rakenne tulostettiin suoraan kalvon päälle, jolloin sulan materiaalin  
lämpö kiinnitti rakenteen kalvoon. Tulostuslämpötila vaikutti menetelmällä saatu-  
hin tuloksiin, mutta kaiken kaikkiaan menetelmä osoittautui käyttökelpoiseksi.

Vaihtoehtoisena menetelmänä oli rakenteiden liittäminen tekstiilipressin avulla.  
Prässäämällä saadut tulokset olivat suoratulosmenetelmää heikompia. Prässät-  
tyjen näytteiden kestävä keskimääräinen maksimivoima oli 40 N, siinä missä  
suoratulostetuilla näytteillä vastaava arvo oli 48 N. Lisäksi suoratulostuksen  
eduksi osoittautui sen yksinkertaisuus prässäämiseen verrattuna. Suoratulostus-  
menetelmää voidaan näin ollen suositella, kun tarkoituksena on 3D-tulostamalla  
valmistaa venyvän elektroniikan rakenteita ja lisätä niitä TPU-pohjaiselle  
substraattikalvolle.

Lopuksi sovellettiin suoratulostusmenetelmää TPU-tukirakenteiden tulosta-  
miseksi venyväälle johtimelle. Työn viimeisen vaiheen tulokset on esitetty ainoas-  
taan erillisessä salassa pidettävässä liitteessä.

---

Asiasanat: 3D-tulostus, venyvä elektroniikka, puettava elektroniikka, termoplas-  
tinen polyuretaani, kuoriutumiskoe

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Bioproduct and Process Engineering

LAHTINEN, JUHANI:  
Materials and Adhering Methods for 3D-printed Stretchable Electronics

Bachelor's thesis 66 pages, appendices 13 pages  
September 2019

---

In this work, several filament materials and two different adhering methods were tested for the purposes of stretchable electronics. In addition, the effects of 3D-printed support structures for stretchable interconnects were studied.

Of the filaments tested, TPU was the material of choice for stretchable electronics. Tensile tests showed TPU-based filaments had the best stretchability among materials tested. Two different TPU filaments with different hardness produced clearly differing results.

T-peel test was then used to compare two different adhering methods. In so-called direct printing method, structures were 3D-printed directly on a substrate and the heat of the melted material caused the adhesion between the structure and the substrate material.

The adhesion achieved by the direct printing method was compared to using a textile press for connecting the printed structure to the film. The results were favorable to the direct printing method. This, combined with the simplicity of the method, suggests that the method could be used more widely.

Finally, the direct printing method was tested in a practical application of printing support structures for stretchable interconnects. The results of these tests are only available in a separate confidential appendix.

---

Key words: 3D printing, stretchable electronics, wearable electronics, thermo-plastic polyurethane, peel test

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	VENYVÄ ELEKTRONIIKKA.....	7
	2.1 Yleistä .....	7
	2.2 Venyvän elektroniikan rakenteet .....	8
	2.2.1 Yleistä.....	8
	2.2.2 Substraatti .....	9
	2.2.3 Moduulit.....	10
	2.2.4 Johtimet.....	10
3	3D-TULOSTUS.....	13
	3.1 Yleistä .....	13
	3.2 3D-tulostuksen vaiheet.....	14
	3.3 3D-tulostusmenetelmät .....	15
	3.3.1 Yleistä.....	15
	3.3.2 FDM.....	16
	3.3.3 Muita menetelmiä .....	20
4	MATERIAALIT .....	23
	4.1 Termoplastinen polyuretaani (TPU 95A, FlexFill 98A) .....	24
	4.2 Polylaktidi (PLA).....	25
	4.3 Kopolyesteri (nGen, nGen Flex).....	26
	4.4 Polyamidi (Nylon).....	26
5	VETOKOKEET .....	28
	5.1 Koeasetelma .....	28
	5.2 Tulokset .....	30
6	KUORIUTUMISKOKEET .....	36
	6.1 Suoratulostuskokeet.....	36
	6.1.1 Koeasetelma .....	36
	6.1.2 Tulokset.....	38
	6.2 Laminoitinkokeet .....	43
	6.2.1 Koeasetelma .....	43
	6.2.2 Tulokset.....	44
7	SÄHKÖMEKAANISET KOKEET .....	49
8	POHDINTA .....	50
	LÄHTEET.....	52
	LIITTEET .....	54

**LYHENTEET JA TERMIT**

Adheesio	Tartuntavoima
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
FDM	Fused Deposition Modeling, ekstruusioon perustuva 3d-tulostusmenetelmä
FFF	Fused Filament Fabrication, sama kuin FDM
FR4	Piirilevyissä käytettävä lasikuitukomposiittimateriaali
g-code	3D-tulostimien ohjaamiseen käytettävä ohjelmointikieli
Infill	FDM-menetelmällä valmistettavien kappaleiden täyttökuvio
Moduuli	Venyvän elektroniikan venymätön saari, jolle elektroniikkakomponentit sijoitetaan
PA	polyamidi
PET	polyetylenitereftalaatti
PLA	polylaktidi
Silkkipaino	Eräs menetelmä musteen kiinnittämiseksi alustamateriaalin pinnalle
Slicing	viipalointi, kolmiulotteisen digitaalisen mallin jakaminen kerroksiin
Substraatti	Alustarakenne, jonka päälle venyvä elektroniikkamatriisi tulostetaan
TPU	termoplastinen polyuretaani
T-testi	Kappaleiden välistä adheesiota mittaava kuoriutumiskoe, jossa käytetään T:n muotoista testikappaletta

## 1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena oli kartoittaa erilaisia materiaalivaihtoehtoja ja liitännäsmenetelmiä venyvän elektroniikan rakenteille. Erityisesti tarkoituksena oli keskittyä venyvän elektroniikan rakenteiden 3D-tulostamiseen venyvälle TPU-substraattikalvolle. Menetelmässä sulan tulostusmateriaalin lämpö kiinnittää tulostettavan kappaleen kalvolle ilman, että tarvitaan liimaa tai laminointia. Rakenteiden tulostaminen tällä tavoin suoraan kalvon päälle on menetelmänä uusi, ja mikäli menetelmä osoittautuu toimivaksi se mahdollistaa venyvän elektroniikan yksittäiskappaleiden valmistamisen nopeasti ja kustannustehokkaasti.

Tässä työssä venyvän elektroniikan materiaalivaihtoehtoja kartoitetaan ensin suorittamalla vetotestejä 3D-tulostetuille näytteille. Valittujen materiaalien liittämistä venyvälle kalvolle testataan sitten standardin mukaisilla kuoriutumiskojeilla. Suoratulostusmenetelmää verrataan tässä yhteydessä perinteisesti käytettyyn laminointimenetelmään.

Lopuksi suoratulostusmenetelmää testataan vielä käytännössä tukirakenteiden tulostamiseen venyvälle johtimelle. Venyvässä elektroniikassa yksi yleinen tapa toteuttaa venyvät johtimet on hopeamusteen silkkipainaminen venyvälle kalvolle. Kalvoa venytettäessä toivotaan, että mahdollisimman suuri osa jännityksestä kohdistuisi muualle kuin johtimeen, jolloin systeemin sähköiset ominaisuudet säilyisivät hyvinä kovankin venytyksen alaisena. Tässä työssä tukirakenteilla vahvistetun sähköisen johtimen kestävyyttä tutkitaan tarkastelemalla johtimen mekaanisia ja sähköisiä ominaisuuksia. Näiden testien suoritustapa ja tulokset esitetään ainoastaan erillisessä, salassa pidettävässä liitteessä.

Työ tehtiin Tampereen yliopistolla (ent. Tampereen teknillinen yliopisto) osana elastisen elektroniikan ELASTRONICS -projektia. Tampereen yliopiston lisäksi ELASTRONICS -konsortioon kuuluvat Teknologian tutkimuskeskus VTT ja useat teollisuuden yhteistyökumppanit. Projektin tavoitteena on venyvän elektroniikan kehittäminen ja siihen liittyvän liiketoiminnan, tuotannon ja infrastruktuurin rakentaminen Suomessa.

## 2 VENYVÄ ELEKTRONIikka

### 2.1 Yleistä

Venyvällä elektroniikalla tarkoitetaan elektronisia laitteita, jotka voivat hajomatta venyä ja taas palata alkuperäiseen muotoonsa. (Salo) Venyvää elektroniikkaa hyödynnetään mm. erilaisissa puettavan elektroniikan sovelluksissa. Puettavassa elektroniikassa elektroniikka integroidaan ihmisten elämään siten, että elektroniikasta tulee osa asustetta tai vaatetusta. (Suonurmi) Nykyisin on pinnalla käsite esineiden internet (Internet of Things, IoT). IoT -sovelluksissa pyritään siihen, että ihminen voi vuorovaikuttaa ympäristönsä kanssa uusilla, älykällä tavoilla. (Cirani) Puettava, vaatetukseen integroitu elektroniikka tarjoaa kiinnostavia mahdollisuuksia esimerkiksi juuri tämänkaltaisiin sovelluksiin. (Suonurmi)

Puettavaa elektroniikkaa tarvitaan ja käytetään nykyisin niin lääke- ja hoitotieteen sovelluksissa kuin kuluttajatuotteissakin. Älykellot, älyvaatteet ja erilaiset lääketieteelliset mittauslaitteet ovat esimerkkejä puettavan elektroniikan sovelluksista. (Suonurmi) Esimerkiksi sairaanhoitoalalla potilaiden tilan etäseuranta voi tuoda taloudellisia säästöjä, kun sairaaloiden vuodetila ja muut resurssit saadaan tehokkaampaan käyttöön. (Suikkola et al.)

Puettavan elektroniikan tuotanto ja myynti ovat kovassa kasvussa. Markkinatutkimusyriety Gartner ennustaa, että puettavia älylaitteita myydään 225 miljoonaa kappaletta vuonna 2019, mikä tarkoittaisi 25,8 prosentin kasvua vuoteen 2018 verrattuna. Merkittävin yksittäinen tuoteryhmä tällä hetkellä ovat älykellot, joita ostetaan arvion mukaan 16,2 miljardilla dollarilla vuonna 2019. (Gartner)

## 2.2 Venyvän elektroniikan rakenteet

### 2.2.1 Yleistä

Venyvä elektroniikka asettaa käyttötarkoituksesta johtuen omia toiveitaan ja rajoitteitaan käytettäville materiaali- ja rakenneratkaisuille. Puettavan elektroniikan tulee muovautua ihmisvartalon muotoihin ja olla kevyttä ja huomaamatonta. Se ei saa häiritä käyttäjän normaalia liikkumista ja sen pitää olla turvallista ja kestävä. Usein saatetaan myös toivoa, ettei elektroniikka näy häiritsevän selvästi ulospäin. (Suonurmi) Myös tuotteiden valmistusprosessien vaatimukset tulee huomioida. Olisi esimerkiksi kätevää ja taloudellista, mikäli olemassa olevia mikropiirien valmistusprosesseja ja komponentteja voitaisiin hyödyntää venyvän elektroniikan teollisessa valmistuksessa. (Suikkola)

Perinteisen, ”jäykän” elektroniikan piirilevy rakentuu yleensä jäykän FR4 –lasi-kuitukomposiitin päälle. Komposiittilevyille kiinnitetään epoksiliimalla kuparifolio, johon etsataan haluttu kytkentäkuviio. Elektroniikkakomponentit kiinnitetään levyille liimalla tai juottamalla.

(Madehow, pcbcart)

Perinteisen elektroniikan puolijohdekomponenttien tärkein materiaali on pii. Pii on kuitenkin haurasta eikä sen venyttäminen ole käytännössä mahdollista, joten venyvä elektroniikka vaatii uudenlaisia materiaalitekniisiä ratkaisuja.

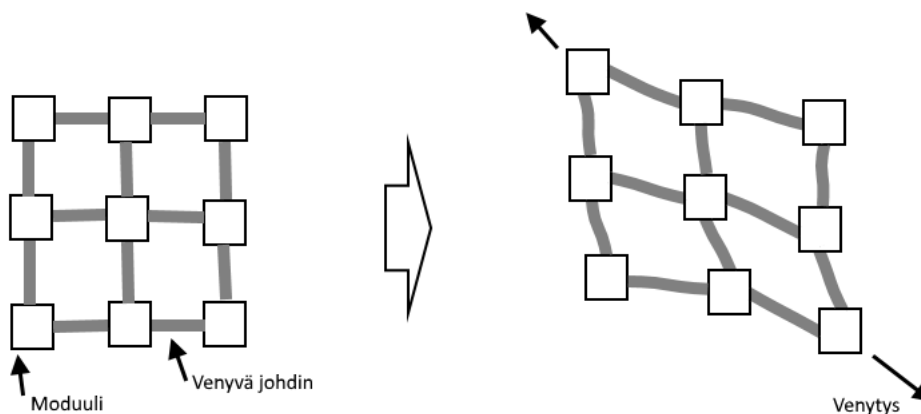
Venyvän elektroniikan valmistamiseen on kaksi pääasiallista lähestymistapaa. Voidaan valmistaa orgaanisista materiaaleista (polymeereista tai komposiiteista) elektroniikkakomponentteja. Käytännössä kuitenkin ongelmaksi muodostuu se, että polymeerimateriaalit ja –komposiitit ovat sähköisiltä ominaisuuksiltaan selvästi perinteisiä materiaaleja heikompia.

(Someya)

Toinen tapa on käyttää perinteisiä, venymättömiä puolijohdemateriaaleja ja yhdistää tällaiset venymättömät komponenttisaaret venyvillä johdinrakenteilla venyväksi matriisirakenteeksi. Tässä menetelmässä siis yksittäiset elektroniikkakomponentit eivät veny, mutta rakenne kokonaisuutena venyy (kuva 1), kun se



rakennetaan FR4 –levyn sijasta venyvän pinnan (nk. substraatin) päälle ja kytkentäkuvio toteutetaan venyvillä johtimilla. Mikäli komponentit ovat kyllin pieniä ja muuten huomaamattomia, tämänkaltainen elektroniikkarakenne on kyllin huomaamaton moniin sovelluksiin. Venyvien ja venymättömien osien välisten rajapintojen tulee kuitenkin olla huolellisesti suunniteltuja, että rakenne kestää ja säilyttää sähköiset ominaisuutensa. (Someya s.3-5) Yleisesti asteittainen siirtymä jäykästä venyvämpään rakenteeseen antaa luotettavimman lopputuloksen. (Vanfleteren et al)



KUVA 1. Venyvän elektroniikan ”piirilevy”. Älykkäät moduulit yhdistyvät venyvien johdinten avulla venyväksi matriisirakenteeksi.

Kuvan 1 matriisi koostuu kolmesta osasta, jotka ovat substraatti, moduulit ja johtimet. Näitä osia käsitellään seuraavaksi tarkemmin.

### 2.2.2 Substraatti

Substraatti on alusta, jonka päälle venyvä elektroniikkamatriisi kokonaisuudessaan rakennetaan. Tästä johtuen substraatin mekaanisilla ominaisuuksilla onkin suurin vaikutus koko integroidun systeemin ominaisuuksiin.

(Salo)

Periaatteessa substraattimateriaalina voidaan käyttää muovikalvoa, metallikalvoa tai kuitumateriaalia (esim. paperia). Muovikalvo on yleisimmin käytetty vaihtoehto mm. koska monet muovit ovat venyviä ja verrattain edullisia ja kevyitä.

(Harris et al.) Usein käytettyjä muovikalvon polymeerimateriaaleja ovat esim. silikonit, polyuretaanit, polyvinyylideenifluoridi (PVDF) sekä akrylaatit. (Someya)

Tässä työssä käytetään elastisena substraattina 100 µm paksuista Platilon U073 TPU (termoplastinen polyuretaani) -kalvoa, jonka päälle venyvät rakenteet ja johtimet liitetään. TPU-kalvo on kiinnitetty irrotettavaan PET-tukikalvoon, joka helpottaa elastisen kalvon käsittelemistä.

### 2.2.3 Moduulit

Moduulit ovat älykkäitä saaria, jotka tehdään jäykästä kaksipuolisesta piirilevystä. Levyn ylemmälle puolelle asennetaan elektroniikkakomponentit, ja alapuoli kiinnittyy substraatille tulostettuihin johtimiin sopivalla kontaktirakenteella. Moduuli voidaan liittää substraattiin esim. liimoilla ja mekaanisilla liitoksilla. (Salo)

Moduulin muodolla voidaan vaikuttaa siihen, miten systeemiin kohdistuvat jännitykset vaikuttavat sen mekaaniseen ja sähköiseen kiinnitykseen. Esimerkiksi apilanmuotoisella moduulilla voidaan ohjata jännityksiä pois johtimien ja moduulin välisistä liitoskohdista, jotka ovat yleensä systeemin heikoimpia alueita. (Salo, WIPO Patenstcope)

Tässä työssä ei keskitytä moduulien sisältämään toiminnallisuuteen vaan lähinnä suoratulostukseen tukirakenteiden kiinnitysmenetelmänä. Myös moduulin ja johtimen välinen rajapinta on tärkeä venyvän systeemin kestävyysvaikuttava tekijä, joka jää tämän työn aiheen ulkopuolelle.

### 2.2.4 Johtimet

Venyvät johtimet voidaan toteuttaa usealla tavalla. Venyvyyteen voidaan vaikuttaa joko rakenteen materiaalivalinnalla tai johdinrakenteen muodolla, tai yhdistää näitä kahta lähestymistapaa.

(Mosallaei et al.)

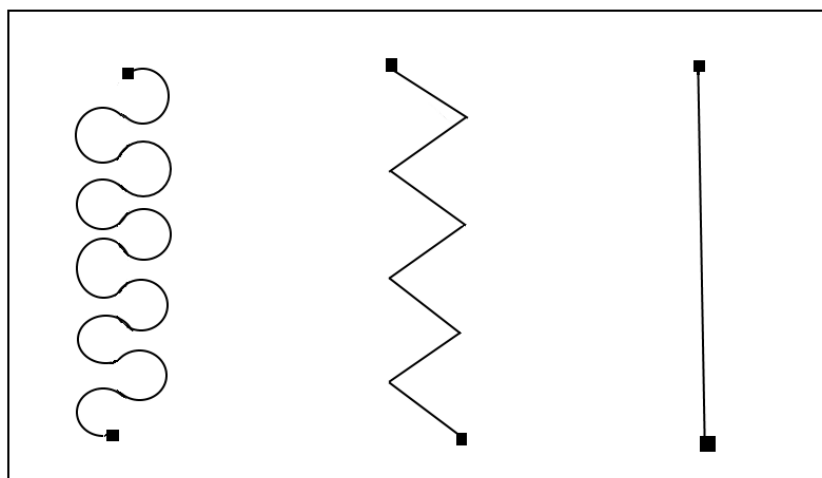
Venyvät, johtavat musteet ovat yksi tavallinen keino toteuttaa johtimet. Musteita on useita erilaisia, ja oikean musteen valinta riippuu musteen koostumuksesta, levitystavasta ja substraatin materiaalista.

Johtimet voidaan toteuttaa tekstiileissä myös johtavan langan avulla. Lanka voidaan esimerkiksi pinnoittaa hopealla, tai se voi sisältää johtavaa täyteainetta. Tämän menetelmän etuna on, että se on helppo integroida tavallisiin tekstiilivalmistusprosesseihin.

(Suikkola et al.)

Johdinraiteen muoto voi myös olla venymistä helpottava. Suoran johtimen asemesta voidaan käyttää mm. hevosenkenkä- tai triangelikuvioita (kuva 2), jolloin johtimet mukautuvat venytyksen mukana ja kestävät näin suurempia venytyksiä. Tällaisissa johtimissa voidaan käyttää myös jäykkiä materiaaleja, joilla on hyvät sähköiset ominaisuudet (esim. kuparia). Toisaalta yksi muotoiltujen johtimien suurimmista ongelmista on suuri pinta-alan tarve, mikä kannustaa suorien johtimien käyttöön. Kun halutaan valmistaa monimutkainen, mutta huomaamaton piirilevy puettavaan sovellukseen, pienempi pinta-ala voi usein olla merkittävämpi etu kuin pienehkö lisäkestävyys.

(Suikkola et al.)



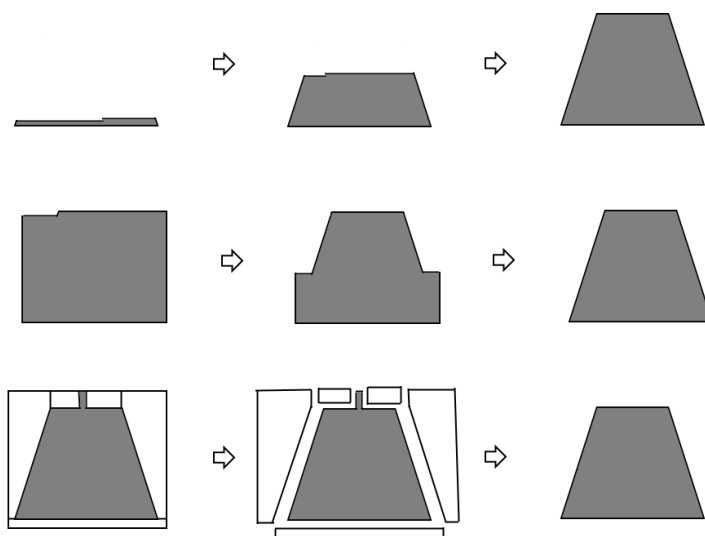
KUVA 2. Potentiaalisia johdinkuvioita, vasemmalta: hevosenkenkä, triangeli, suora johdin.

Tässä työssä tarkasteltiin, voidaanko sopivilla tukirakenteilla parantaa muotoilun johtimen kestävyttä. Johdinkuvioksi valittiin hevosenkenkäkuvio, joka on yksi tutkituimmista ja kestävimmistä johdinkuvioista. (Kim et al.) Tässä työssä suoritettujen kaltaisia testejä voi mahdollisesti olla kiinnostavaa tulevaisuudessa tehdä myös jollain muulla johtimen muodolla.

### 3 3D-TULOSTUS

#### 3.1 Yleistä

3D-tulostus on kappaleiden valmistamista digitaalisten mallien perusteella. Se tapahtuu lisäämällä ainetta kerros kerrokselta tulostusalustan päälle, verrattuna ainetta poistaviin menetelmiin kuten CNC-jyrsintään tai ainetta muovaamiin menetelmiin kuten ruiskuvaluun (kuva 3). Termejä 3D-tulostus ja materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä (engl. additive manufacturing, AM) käytetäänkin lähinnä synonyymeinä. (Zhou, Redwood et al.) Termistö alalla on kirjavaa ja osin vakiintumatonta mm. kauppanimien runsauden vuoksi. Suomen pikavalmistusyhdistys FIRPA suosittelee virallisiin yhteyksiin käytettäväksi termiä materiaalia lisäävä valmistus. (FIRPA) Tässä esityksessä suositaan kuitenkin lyhyempää, alan yleiseen kielenkäyttöön jokseenkin vakiintunutta termiä 3D-tulostus.



KUVA 3. Kappaleiden valmistusmenetelmät, ylhäältä: ainetta lisäävä valmistus, ainetta poistava valmistus, ainetta muovaava valmistus.

3D-tulostus on muutamassa vuosikymmenessä kasvanut merkittäväksi teknologiaksi. Sitä hyödynnetään nykyisin mm. auto- ja lentokone-teollisuudessa, kulut-

tajatuotteissa, arkkitehtuurissa, puolustusteollisuudessa, lääketieteessä, elintarvikealalla sekä muodin alalla. (Gross et al) Sen olennaisia etuja on kappaleiden suunnittelun vapaus. Se mahdollistaa vapaamman geometrinen muotojen käytön ja useiden materiaalien yhdistelemisen, mikä ei perinteisillä valmistusmenetelmillä ole mahdollista. Lisäksi kappaleiden valmistuksen digitalisointi itsessään tuo uusia mahdollisuuksia helpottaen muun muassa suunnitelmien jakamista ja kappaleiden suuren mittakaavan kustomointia. 3D-tulostus yksinkertaistaa kappaleiden valmistusketjua ja nopeuttaa yksittäisten kappaleiden, kuten prototyyppien ja mallien, valmistusaikaa merkittävästi.

(Zhou)

### **3.2 3D-tulostuksen vaiheet**

Vaikka eri menetelmiä on useita, 3D-tulostuksen päävaiheet ovat CAD-mallinnus, viipalointi eli slicing, tulostus ja jälkikäsittely. (Zhou) Tässä esiteltävät vaiheet pätevät pääpiirteissään kaikkiin 3D-tulostusmenetelmiin, mutta paino on työssä käytettävässä FDM -menetelmässä.

3D-tulostus alkaa kolmiulotteisesta mallista. Malli voidaan hankkia esimerkiksi 3D-skannauksella tai suoraan valmiista internet -säilöistä. Usein se kuitenkin suunnitellaan itse tarkoitukseen sopivalla CAD (Computer Aided Design) -ohjelmistolla. Tällaisia ohjelmistoja ovat esim. Tinkercad, Blender, Autodesk ja Solidworks. CAD-ohjelmistosta malli viedään yleensä STL-tiedostona Slicing -ohjelmistoon.

(Zhou)

Viipalointi- eli slicing-vaiheessa malli jaetaan tulostusalustan suuntaisiin kerroksiin ("viipaloidaan") ja tulostimelle annetaan ohjeet, miten sen tulee kussakin kerroksessa liikuttaa tulostuspäätä kaksiulotteisessa koordinaatistossa ja milloin tulostettavaa ainetta tulee pursottaa. Tässä vaiheessa voidaan tarkentaa erilaisia tulostusta ohjaavia parametreja kuten tulostuksen nopeutta tai kappaleen asemaa tulostusalustalla. Tulostusohje muutetaan g-code -muotoon, joka on yleinen ohjelmointikieli tulostuksen ohjaamiseen. Ohje kertoo tulostimelle tar-

kasti, miten tulostuspäätä tulee liikuttaa ja milloin tulostettavaa ainetta tulee pursoittaa.

(Zhou)

Tulostusvaiheessa tulostin käsittelee tulostusohjeen ja syöttää materiaalin tulostusalustalle kerros kerrokselta kunnes kappale valmistuu. Käytännössä tulostuksen lopputulokseen vaikuttavat itse tulostuslaitteisto ja ympäristötekijät kuten ilman lämpötila ja kosteus, eikä sama g-code takaa täysin ennustettavaa ja toistettavaa tulostusvaiheen lopputulosta.

(Zhou)

Jälkikäsittelyvaiheessa kappale poistetaan tulostimesta ja sitä voidaan puhdistaa tai pintakäsitellä tarpeen mukaan. Menetelmästä ja kappaleen käyttötarkoituksesta riippuen tämä vaihe voi olla joko triviaali tai huomattavan tärkeä ja aikaa vievä osa koko prosessista.

(Zhou, Redwood et al.)

### **3.3 3D-tulostusmenetelmät**

#### **3.3.1 Yleistä**

3D-tulostusmenetelmiä on useita erilaisia. Osa menetelmistä sopii kestävien käyttötavaroiden valmistamiseen, kun taas toiset tuottavat visuaalisesti parempia malleja mekaanisen kestävyuden kustannuksella. Toiset menetelmistä vaativat kalliita, teollisuuden käyttöön suunniteltuja laitteita ja koulutettuja operaattoreita, kun taas toiset ovat edullisia ja helppoja työpöytäkäytössäkin. Myös käytetyissä materiaaleissa on eroa. Tässä esitellään yleisimmät menetelmät. Erityisesti keskitytään työssä käytettyyn FDM -menetelmään.

### 3.3.2 FDM

FDM (fused deposition modeling - myös FFF, fused filament fabrication) on eräs yleisimmin käytetyistä 3d-tulostusmenetelmistä. Siinä käytetään valmistusmateriaalina filamenttia eli tulostuslankaa. Lanka on kiinteää termoplastista materiaalia, joka työnnetään lämmitettyyn suuttimeen. Suutin sulattaa materiaalin, joka pursotetaan suuttimen läpi ohuena nauhana tulostusalustalle.

(Redwood et al.)

FDM:n etuna on, että se on edullinen ja nopea menetelmä ottaa käyttöön. Laitteet ovat verrattain edullisia ja helppoja käyttää eivätkä välttämättä vaadi suurta tilaa. Filamenttimateriaaleja on monipuolisesti saatavilla edulliseen hintaan. Menetelmä sopii hyvin esimerkiksi nopeaan prototyypin ja yksittäiskappaleiden valmistamiseen.

(Redwood et al.)

Koska jokainen kerros tulostetaan yhtenäisenä nauhana kohta kerrallaan, tulostuksen kesto on suoraan riippuvainen kappaleen tiheydestä ja tulostusnauhan kerrospaksuudesta. Tulostamisen vaatiman ajan pienentämiseksi FDM-menetelmällä ei yleensä tulosteta täysin umpinaisia kappaleita. Kun pohjalle on tulostettu riittävä määrä tiiviitä kerroksia, tulostin alkaa tehdä kappaleen keskelle sopivaa infill- eli täyttökuvioita. Täyttökerrokseen tulostin siis valmistaa ensin kappaleen reunat kuten muihinkin kerrokseen, mutta täyttää kappaleen keskustan sopivalla geometrisellä kuviolla (kuva 4). Kuvion tiheyttä säätämällä voidaan vähentää materiaalikustannuksia ja tulostusaikaa. Kiinteän aineen määrä kerroksessa ilmaistaan prosentteina kerroksen pinta-alasta. Sopiva täyttö-prosentin arvo riippuu kappaleen käyttötarkoituksesta. Slicing -ohjelmistoissa täyttöaste on usein oletuksena 20%. Pienempi täyttöaste luonnollisesti nopeuttaa tulostusta, mutta tekee kappaleesta heikomman (ja kevyemmän). Täyttökerrosten jälkeen kappaleen pinnalle tehdään taas tietty määrä kiinteitä kerroksia, jolloin pinnasta saadaan tiivis ja täyttökuvio jää näkymättömiin kappaleen sisälle.

(Redwood et al., Xometry)

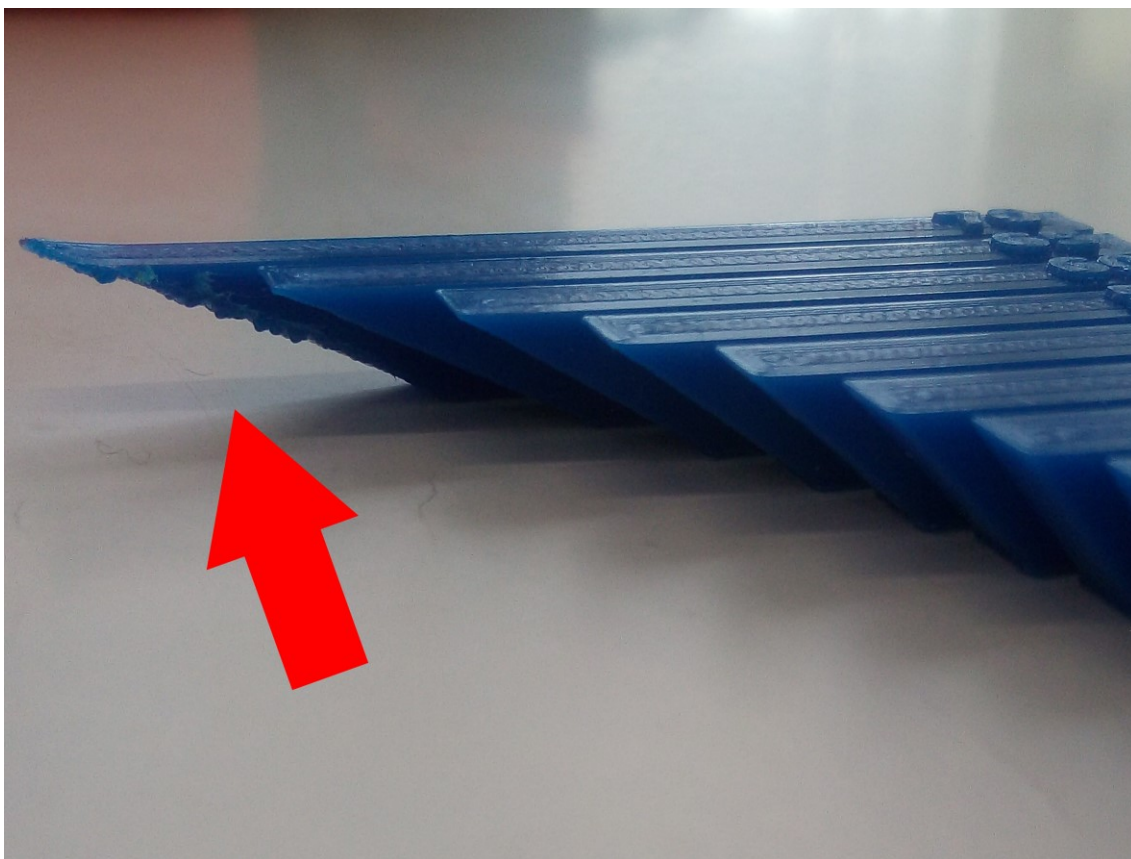




KUVA 4. Täyttökuviota päällikerrosten osalta viimeistelemättömän kappaleen sisällä.

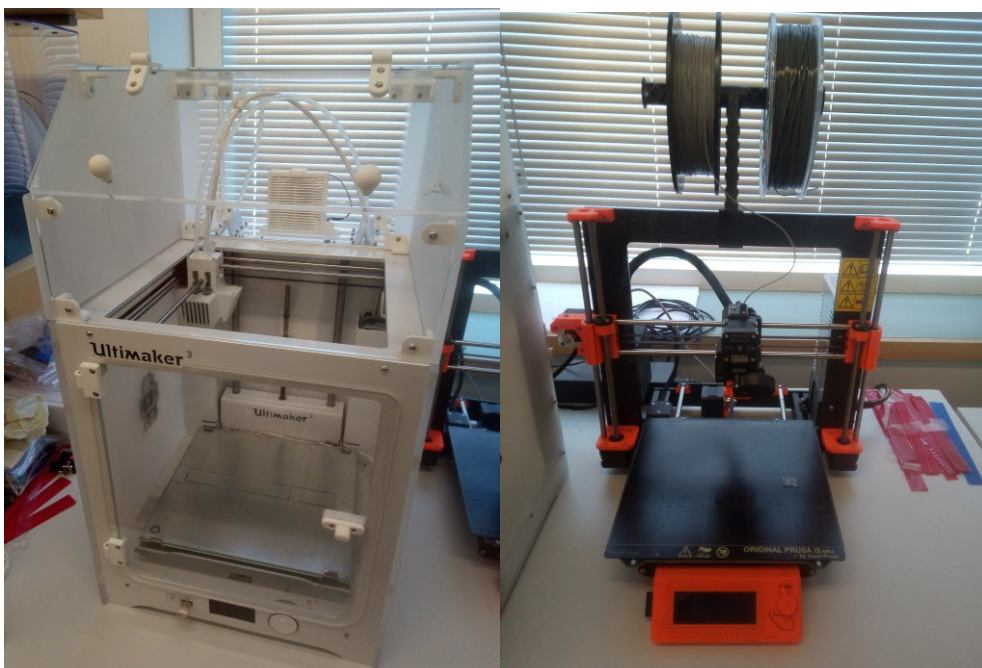
FDM:n huono puoli on valmistusmenetelmästä johtuva kappaleiden anisotropisuus. Kun kappaleet rakennetaan kerros kerrokselta, ne ovat eri suuntiin selvästi eri lujuisia, eli niiden orientointi tulostusalustaan nähden ratkaisee niiden mekaaniset ominaisuudet. Käytännössä orientointi vaikuttaa olennaisesti myös tulostuksen onnistumiseen, esimerkiksi ns. overhang-ominaisuuden takia (kuva 5), joten yleensä ei ole mahdollista vapaasti valita, miten päin kappale halutaan tulostusalustalle rakentaa. Toinen huono puoli on, että FDM-menetelmässä kerrosten väliset rajat jäävät näkyviin ja ne voi olla käyttökohteesta riippuen tarpeen poistaa jälkikäsittelyllä.

(Redwood et al.)



KUVA 5. Overhang-ominaisuus. Ilman päälle tulostaminen ei ole mahdollista, joten tietyn kulman ylittäviin tulostuksiin tarvitaan alle tukirakenteita tai kappale epäonnistuu.

Tässä työssä käytettiin kahta eri FDM-tulostinta. Tulostimet olivat Ultimaker 3 ja Prusa MK3 (kuva 6).



KUVA 6. Käytetyt tulostimet. Vasemmalla Ultimaker 3, oikealla Prusa i3 MK3.

Vaikka molemmat tulostimet ovat FDM-tyyppisiä, ne eroavat toisistaan useilla tavoilla. Tulostinten eroja on tiivistetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Käytettyjen tulostinten vertailua. (Ultimaker UM3, Prusa printers)

<b>tulostin</b>	<b>Ultimaker</b>	<b>Prusa</b>
tulostuskerroksen vaihtaminen	tulostusalusta liikkuu alaspäin	tulostuspää liikkuu ylöspäin
käytettävän filamentin halkaisija	2,85 mm	1,75 mm
filamentin työntömenetelmä	bowden	direct drive
kotelointi	lisävarusteena kotelointi, joka tasaa lämpötilan	ei koteloitu
hinta (kesäkuu 2019)	2995+ALV	kokoamattomana 635,54 EUR+ALV, koottuna 825,62 EUR + ALV

Tulostuskerroksen vaihtaminen on yksi tulostinten eroista. Ultimakerissa tulostettavaa kerrosta vaihdetaan siten, että tulostusalue liikkuu alaspäin (ns. Cartesian machine). Prusassa puolestaan tulostuspää on korkeussuunnassa liikkuva osa. Se siirtyy ylöspäin aina, kun siirrytään valmistamaan seuraavaa kerrosta. (ns. Core machine) (Aranda)

Yksi olennainen ero liittyy myös filamentin työntömenetelmään. Ultimakerin käyttämässä bowden –menetelmässä filamenttia työntävien telojen ja tulostuspään välinen etäisyys on useita kymmeniä senttimetrejä, mikä tekee hyvin elastisten aineiden työntämisestä mahdotonta tai hyvin vaikeaa. Prusan käyttämässä direct drive –menetelmässä filamenttitehojen ja tulostuspään etäisyys on hyvin lyhyt, joten se soveltuu kaikkein elastisimmille materiaaleille paremmin. (Aranda)

Työssä käytetyssä Ultimakerissa on lisävarusteena tulostusalueen kotelointi. Tulostin on koteloitu umpinaiseksi, joten tulostusympäristön lämpötila pysyy tuloksen aikana tasaisempana, mikä vähentää kappaleen kutistumista ja helpottaa kappaleen pysymistä kiinni alustassa.

Ultimakerin viipalointiohjelmistona oli Ultimaker Cura (versio 4.0.0). Prusan viipalointiohjelmistona oli Slic3r Prusa Edition. Käytetyt mallit on suunniteltu käyttäen Solidworks 2017 -ohjelmistoa. Mallien suunnittelu ei kuulunut tämän työn piiriin.

### **3.3.3 Muita menetelmiä**

Ekstruusio menetelmän (FDM) lisäksi voidaan katsoa olevan 6 pääasiallista 3D-tulostusmenetelmäryhmää (ISO/ASTM 52900 -standardi 2015). Osa menetelmistä käyttää polymeerien sijasta materiaalina pääasiassa metalleja, hiekkaa tai selluloosaa. Tässä keskitytään erityisesti yleisimpiin muovien 3D-tulostukseen soveltuviin menetelmiin ja tarkastellaan, miten ne vertautuvat työssä käytettyyn FDM -menetelmään. Lisätietoa menetelmistä löytyy esim. Redwood et al., The 3D Printing Handbook. Menetelmien tärkeimmät erot on tiivistetty taulukossa 1. On kuitenkin syytä muistaa, että kaikki päämenetelmäryhmät pitävät sisällään

useita menetelmiä, joista osa eroaa toisistaan suuresti jopa saman menetelmäryhmän sisällä. Tämänkaltaisessa tiiviissä esityksessä joudutaan väkisinkin tekemään joitain varsin karkeita yleistyksiä.

TAULUKKO 2. Tärkeimpien muovien 3D-tulostusmenetelmien vertailua. (Redwood et al.)

Menetelmä	FDM / FFF	Valokovetus altaassa	Jauhepetisulatus	Materiaalin suihkutus
		Vat Polymerization	Powder Bed Fusion	Material Jetting
<b>Materiaalin tyyppi</b>	Filamenttilanka	Nestemäinen harts	Jauhe	Nestemäinen harts
<b>Tärkeimmät materiaalit</b>	Polymeerit, komposiitit, metallit	Fotopolymeerit	Polymeerit, metallit	Fotopolymeerit
<b>Hinta</b>	Edullinen	Edullinen/kallis	Kallis	Kallis
<b>Laitteiston koko</b>	Pieni/suuri	Pieni/suuri	Suuri	Suuri
<b>Realistinen visuaalinen jälki</b>	Kohtalainen	Hyvä	Kohtalainen	Hyvä
<b>Mekaanisesti kestävien kappaleiden valmistus</b>	Kohtalainen	Heikko	Hyvä	Heikko

Valokovetus altaassa -menetelmässä (engl. Vat Photopolymerization) käytetään fotopolymeerihartsia, joka kovetetaan valon avulla haluttuun muotoon. Valo voidaan laitteesta riippuen kohdistaa joko pohjaan tai pintaan, jolloin kappale valmistuu joko ylhäältä alas tai alhaalta ylöspäin. Niin materiaalien kuin säädettävien tulostusparametrien suhteen menetelmä on rajoitetumpi kuin FDM. Menetelmällä saadaan toisaalta yksityiskohtaisia ja pinnoiltaan tasaisia kappaleita. Heikkona puolena on fotopolymeerimateriaalien rajallinen mekaaninen kestävyys, joten toiminnallisten osien valmistukseen menetelmä ei välttämättä sovellu.

(Redwood et al.)

Jauhepetisulatus (engl. Powder Bed Fusion) on menetelmä, jossa materiaali on jauheena ja sintrataan kiinteäksi lämmön avulla. Materiaalien ja tulostusparametrien suhteen tämäkin menetelmä on melko rajattu. Yleensä valmistaja on asettanut sopivat asetukset jokaiselle materiaalille. Polymeerijauhetta levitetään tulostusalustalle kerros kerrokselta ja se sulatetaan esimerkiksi laserin avulla haluttuun muotoon. Sulamaton jauhe toimii tukirakenteena, mikä helpottaa monimutkaisten geometristen rakenteiden tulostamista. Lisäksi menetelmällä saadaan kestäviä kappaleita. Huonona puolena on kuitenkin, että laitteisto on kallista ja vaatii koulutettuja operaattoreita. Jauhemaisen materiaalin käsittely tuo myös omat haasteensa. Suojavarusteet ovat tietyissä työvaiheissa tarpeen ettei jauhetta joudu hengitysteihin. Mitä karkeampaa jauhetta käytetään, sitä helpompaa sen käsittely yleensä on, mutta toisaalta tulostuspinnasta tulee tällöin myös epätasaisempi.

(Redwood et al.)

Materiaalin suihkutus (Material jetting) -menetelmässä käytetään fotopolymeerimateriaaleja, jotka suihkutetaan tulostusalustalle ja kovetetaan valon avulla. Tuloksena on erittäin tarkka tulostusjälki, joten menetelmä sopii realististen visuaalisten prototyyppien valmistukseen. Kuten muissakin fotopolymeerejä hyödyntävissä menetelmissä, ongelmana on, että valmistetuilla kappaleilla on heikot mekaaniset ominaisuudet. Lisäksi menetelmä on kallias.

(Redwood et al.)

## 4 MATERIAALIT

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti työssä käytetyt materiaalit. Materiaalien tämän työn kannalta kiinnostavimmat ominaisuudet on tiivistetty taulukossa 3 (valmistajan ilmoittamat arvot). Taulukon 3 kaikki arvot eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia, sillä eri valmistajilla on tapana ilmoittaa eri standardien mukaisilla testimenetelmillä mitatut arvot, eivätkä valmistajat edes välttämättä ilmoita kaikkia kiinnostavia arvoja.

TAULUKKO 3. Työssä käytetyt materiaalit. (Ultimaker, Prusa, colorFabb, fillamentum)

materiaali	TPU 95A	PLA	nGen*	nGen Flex**	Nylon	FlexFill 98A
testimenetelmä	ASTM D638	ISO 527	ASTM D638	ASTM D638	ISO 527	DIN 53504
<b>vetomoduuli</b>	26,0 MPa	2346,5 MPa	(ei tietoa)	(ei tietoa)	579 MPa	(ei tietoa)
<b>myötölujuus</b>	8,6 MPa	49,5 MPa	50 Mpa	14 MPa	27,8 MPa	(ei tietoa)
<b>murtolujuus</b>	39,0 MPa	45,6 MPa	35 MPa	22 MPa	34,4 MPa	(ei tietoa)
<b>myötövenymä</b>	55,0 %	3,3 %	4.5%	38 %	20 %	(ei tietoa)
<b>murtovenymä</b>	580,0 %	5,2 %	193 %	400 %	210 %	318 %
	*Eastman Amphora AM3300					
	**Eastman Amphora FL6000					

Taulukossa 3 esitetty materiaalin vetomoduuli (eli ns. Youngin moduuli) kuvaa kappaleen jäykkyyttä. Se saadaan laskettua kaavasta (1)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1)$$

missä  $\sigma$  on lujuus vetosuunnassa ja  $\varepsilon$  kappaleen venymä.  
(Britannica Academic: Young's modulus)

Lujuus (engl. stress) tarkoittaa venyttämiseen käytetyn voiman ja kappaleen poikkipinta-alan suhdetta (2)

$$\sigma = \frac{F}{(w*s)}, \quad (2)$$

missä  $F$  on voima,  $w$  kappaleen leveys ja  $s$  kappaleen paksuus.

(Britannica Academic: Stress)

Venymä (engl. elongation) puolestaan tarkoittaa kappaleen siirtymän ja alkuperäisen pituuden suhdetta (3)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100\%, \quad (3)$$

missä  $\Delta L$  on kappaleen pituuden muutos eli siirtymä ja  $L_0$  kappaleen alkuperäinen pituus.

(Britannica Academic: Strain)

Myötölujuus ja -venymä tarkoittavat kyseisiä arvoja pisteessä, jossa testikappale myötää, eli tapahtuu pysyvä muodonmuutos. Murtolujuus ja -venymä puolestaan viittaavat vastaaviin arvoihin kappaleen murtumapisteessä. Kaavoista (1-3) nähdään, että lopulliset arvot riippuvat olennaisesti testiolosuhteista (esim. testikappaleen koosta), joten eri standardien mukaiset arvot voivat erota hyvin paljon keskenään.

Kuitenkin esimerkiksi murtovenymä-arvojen eroista voidaan saada jonkinlainen kuva siitä, miten eri materiaalit mahdollisesti käyttäytyvät venytettäessä. Työssä käytetyt materiaalit valittiin siten, että ne edustavat laajaa skaalaa erilaisia mekaanisia ominaisuuksia ja tyyppillisiä, kaupallisesti saatavilla olevia polymeereja, jotka ominaisuuksiensa puolesta voisivat sopia venyvän elektroniikan sovelluksiin.

#### 4.1 Termoplastinen polyuretaani (TPU 95A, FlexFill 98A)

Polyuretaanit ovat hyvin monipuolisia polymeereja. Niitä on hyvin monenlaisia erilaisilla ominaisuuksilla ja käyttökohteilla. Kemiallisesti ne ovat uretaaniryh-



män (NH-CO-O) sisältäviä kopolymeerejä, jotka syntyvät reaktiossa isosyanaattien ja muiden yhdisteiden, kuten glykolien, välillä.

(Britannica Academic: Polurethane)

Termoplastinen polyuretaani (TPU) on monesta syystä kiinnostava materiaali venyvän elektroniikan sovelluksiin. Polyuretaanit ovat hyvin elastisia. Niillä on hyvä vahvuus, kestävyys ja hankauksenkesto. Lisäksi termoplastiset tuotantoprosessit ovat taloudellisia ja mahdollistavat teollisen massatuotannon.

(Someya, 171-181)

Tässä työssä TPU:ta käytettiin kahdessa muodossa. Ensimmäkin käytettiin ohutta TPU-kalvoa, jolle pyrittiin tulostamaan venyvän elektroniikan rakenteita. Tämä kalvo toimi siis periaatteessa ns. substraattina (kts luku 2.2.2), vaikka työssä ei varsinaista toiminnallista elektroniikkaa sen päälle valmistettukaan.

Lisäksi TPU-filamentteja käytettiin materiaalina tulostetuissa rakenteissa. Erityisesti käytettiin Ultimakerin TPU 95A -filamenttia. Valmistajan mukaan sen tärkeisiin ominaisuuksiin kuuluvat mm. hyvä kulumisen kesto sekä hyvä korroosionkesto monia yleisiä teollisuuden öljyjä ja kemikaaleja vastaan. (Ultimaker: TPU95A). Toinen työssä käytetty TPU-pohjainen filamentti oli filamentum -yrityksen FlexFill 98A.

## 4.2 Polylaktidi (PLA)

Polylaktidit (PLA) ovat termoplastisia polyestereitä, jotka valmistetaan uusiutuvista raaka-aineista, kuten maissista tai sokeriru'osta. Kemiallisesti ne ovat maitohaposta johdettuja alifaattisia polyestereitä. PLA on biohajoava ja biohyteensopiva, mikä on osaltaan lisännyt kiinnostusta sitä kohtaan viime vuosina. PLA:n huonot puolet liittyvät sen kestävyteen. Sitä ei voida käyttää pitkäaikaisesti ulkotiloissa eikä se kestä korkeita lämpötiloja.

(Ultimaker PLA; Kumar et al.; Hamad et al.)

Tässä työssä käytettiin Prusa PLA –filamenttia. Valmistajan mukaan se on helposti tulostettava materiaali, mutta hauras ja huonosti lämpöä kestävä. Vaikka PLA on materiaalina turvallista elintarvikekäytössä, sitä ei suositella tämänkaltaisiin sovelluksiin, koska 3D-tulostettujen rakenteiden epätasaisiin pintoihin voi kertyä bakteerikasvustoja.

(Prusa pla)

### **4.3 Kopolyesteri (nGen, nGen Flex)**

Polyesterit ovat esteriryhmän sisältäviä polymeerejä. Kopolyesteriksi kutsutaan modifioituja polyestereitä, joiden polymerisaatioprosessissa käytetään useampaa kuin yhtä dikarboksyylihappoa tai diolia. Ne ovat kestäviä, helposti työstettäviä ja niillä on hyvä kemiallinen resistanssi.

(Sastri)

Tässä työssä käytettiin kahta ominaisuuksiltaan varsin erilaista kopolyesterifilamenttia. nGen on colorFabb –yrityksen valmistama filamenttimateriaali, joka perustuu Eastman Amphora AM3300 –kopolyesteriin. Sitä markkinoidaan luotettavana ja helposti tulostettavana materiaalina.

(colorFabb nGen)

nGen Flex on myös colorFabb –yrityksen valmistama filamenttimateriaali, joka perustuu Eastman Amphora –kopolyesteriin. Se on valmistajan mukaan puolijoustava (semi-flexible), mikä tekee siitä nopeasti tulostettavan ja mahdollistaa helpon yhdistelemisen jäykkien materiaalien kanssa.

(colorFabb nGen Flex)

### **4.4 Polyamidi (Nylon)**

Polyamidit ovat termoplastisia polymeereja, joita käytetään etenkin synteettisten kuitujen valmistukseen. Kemiallisesti polyamidi on polymeeri, jossa monomeerimolekyylit ovat liittyneet ketjuksi amidisidoksin (sidoksen kemiallinen kaava CO-NH). Tärkein ja tunnetuin polyamidien ryhmä ovat Nylonit, jotka kehitti DuPont-yritys vuonna 1935. Ne ovat monikäyttöisiä ja kestävät hyvin kulumista, lämpöä

ja kemikaaleja. Vaikka synteettiset kuidut ovat ylivoimaisesti tärkein Nylonien käyttökohde, niitä voidaan hyvin käyttää myös muovituotteiden valmistuksessa, esimerkiksi ruiskuvalussa tai 3D-tulostimien filamenttimateriaalina.

(Britannica Academic: Polyamide, Nylon; Feldman)

Tässä työssä käytettiin Ultimaker Nylon –filamenttia. Valmistaja kuvailee Nylonia iskun- ja hankauksenkestäväksi. Sillä on hyvä vahvuus suhteessa painoon, alhainen kitkakerroin ja hyvä korroosionkestävyys. Se ei kuitenkaan sovellu elintarvikekäyttöön eikä yli 80°C:n lämpötiloihin.

(Ultimaker Nylon)

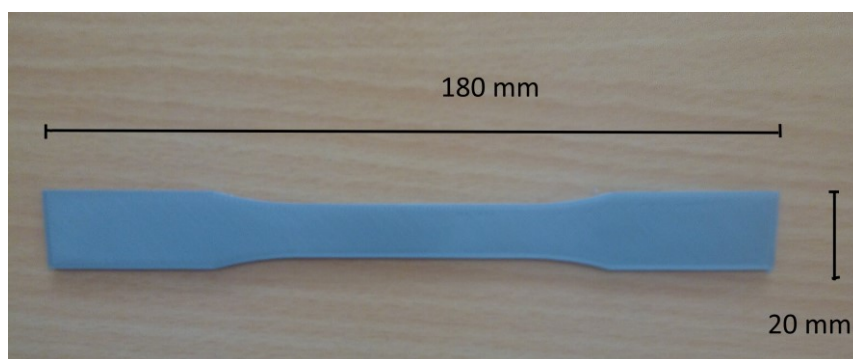
## 5 VETOKOKEET

### 5.1 Koeasetelma

Filamenttimateriaalien ominaisuuksia kartoitettiin vetokoneen avulla. Valmistettiin 3D-tulostamalla koiranluun muotoisia näytekappaleita seuraavista materiaaleista (suluissa tulostin, jota kappaleen valmistuksessa käytettiin):

- Ultimaker TPU95A (Ultimaker)
- Prusa PLA (Prusa)
- ColorFabb nGen (Ultimaker)
- ColorFabb nGen Flex (Prusa)
- fillamentum FlexFill 98A (Prusa)

Käytetyt materiaalit on esitelty tarkemmin luvussa 4. Kustakin materiaalista valmistettiin 5 rinnakkaisnäytettä, jotka mukailivat ASTM D638-standardia. Näytteet olivat luun muotoisia testikappaleita, joiden pituus oli 180 mm ja leveys 20 mm (kuvat 7 ja 8). Näytteissä käytettiin tulostinten ja viipalointiohjelmistojen oletusasetuksia kullekin materiaalityypille. Joidenkin materiaalien kanssa jouduttiin kuitenkin säätämään hieman asetuksia tulostuksen onnistumiseksi, esim. lämpötilojen osalta.



KUVA 7. Testeissä käytetty luun muotoinen testikappale.



KUVA 8. Erivärisiä tulostettuja testikappaleita.

Vetokokeissa käytettiin Tinius Olsen H5KT -vetokonetta (kuva 9). Koneessa käytettiin 5000 newtonin voimaselliä ja kitojen etäisyys oli 150 mm. Näytetikut kiinnitettiin vetokoneen kitoihin ja niitä venytettiin, kunnes ne murtuivat. Vetokokeissa käytettiin standardia mukailleen nopeutta 50 mm/min. Mitattiin venymä ja näytteen venyttämiseen ja murtamiseen vaadittu voima. Mikäli murtumista ei tapahtunut, vetämistä jatkettiin, kunnes kidat olivat noin 400 mm etäisyydellä toisistaan. Materiaaleista TPU95A ja FlexFill eivät murtuneet testin aikana.



KUVA 9. nGen-näyte vetokoneessa.

## 5.2 Tulokset

Käsitellään seuraavaksi vetokokeiden tärkeimmät tulokset. Tarkat tulokset on esitetty liitteessä 1.

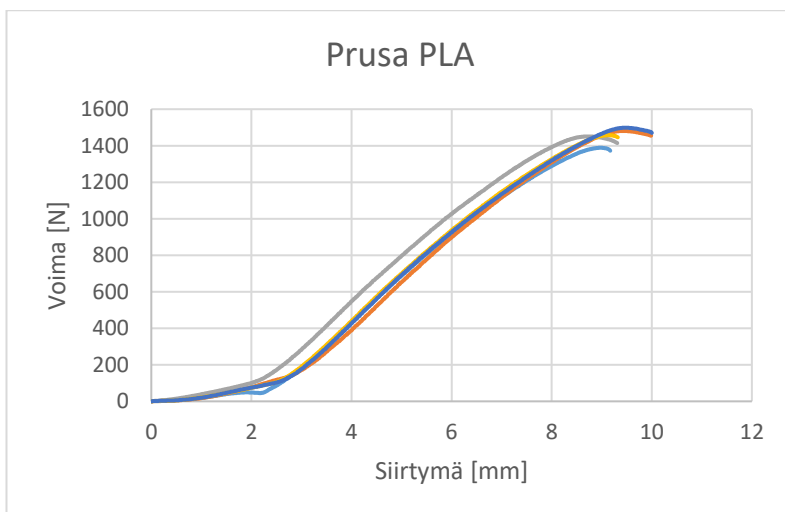
Vetokokeissa mitattiin siirtymä ja näytteiden venyttämiseen ja murtamiseen vaadittu voima. Materiaaleista TPU 95A ja FlexFill 98A eivät murtuneet testin aikana. Tulokset on tiivistetty taulukossa 4. Käsitellään seuraavaksi tarkemmin taulukon 4 tuloksia.

TAULUKKO 4. Vetokokeiden tärkeimmät tulokset.

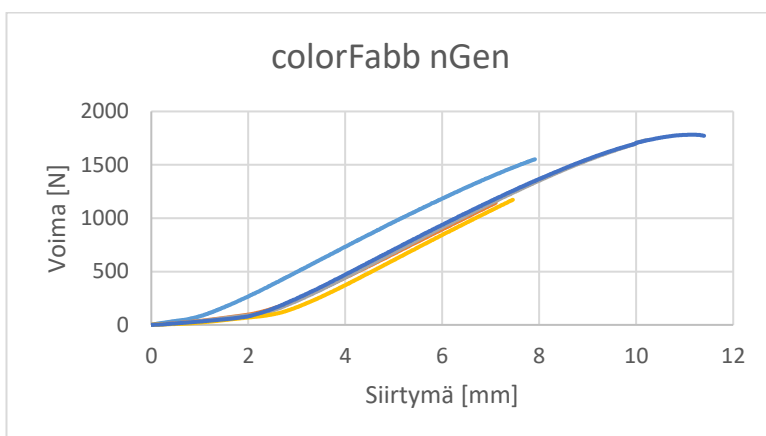
	Prusa PLA	nGen	nGen Flex	TPU95A	fillamentum FlexFill
Max N keskimäärin	1456	1476	308	434	1068
Max mm keskimäärin	9	9	145	404	405
Max Mpa keskimäärin	34	34	8	10	24
Max venymä-% keskimäärin	6	6	97	269	270

Näytteiden käyttäytyminen ja hajoaminen on esitetty materiaaliakohtaisesti voima-siirtymä-kuvaajissa (kuviot 1-5). Kaikkien materiaalien kaikki 5 tikkua käyttäytyivät melko samalla tavalla eikä selkeitä outlier-tapauksia tullut vastaan, mikä on ainakin 3D-tulostusmenetelmän luotettavuutta ja tulosten toistettavuutta ajatellen hyvä merkki.

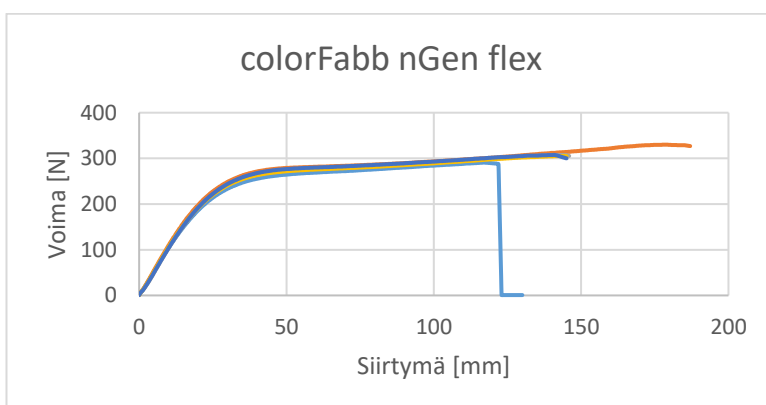
Kuvioista 1-2 nähdään, että PLA ja nGen eivät juuri veny. Lähes kaikki näytteet katkesivat jo ennen 10 mm venymää. TPU 95A ja FlexFill 98A puolestaan venyivät erittäin hyvin (kuviot 5-6), eikä niitä saatu testissä käytetyllä noin 400 mm maksimivenytyksellä murrettua (kuva 10). Huomionarvoista TPU 95A:n ja FlexFill 98A:n kuvaajissa on, että ne vaikuttavat käyttäytyvän muuten keskenään samankaltaisesti, mutta venymisen vaatima voima (y-akseli) on FlexFillin kohdalla kutsuinkin kaksinkertainen. nGen Flex (kuvio 4) oli jotain näiden kahden selkeästi toisistaan erottuvan ryhmän välistä. Se venyi jonkin verran, mutta murtui lopulta. Tämän voitaneen ajatella olevan linjassa valmistajan filamentista käyttämän termin ”puolijoustava” kanssa.



KUVIO 1. Prusa PLA –näytteiden käyttäytyminen ja hajoaminen.

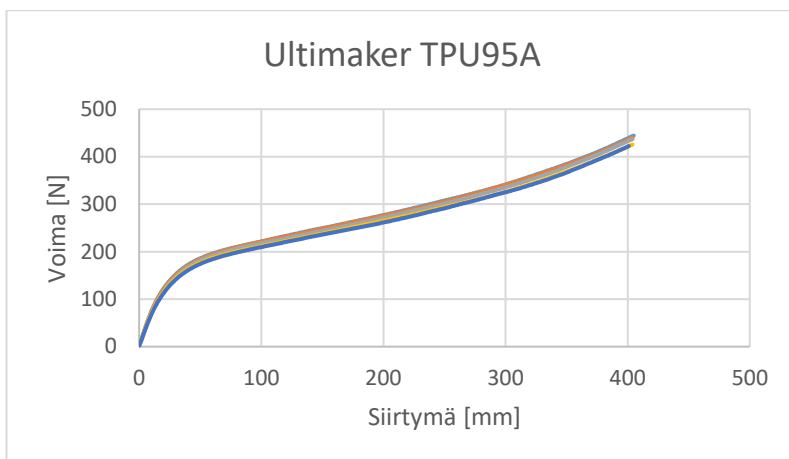


KUVIO 2. ColorFabb nGen –näytteiden käyttäytyminen ja hajoaminen.

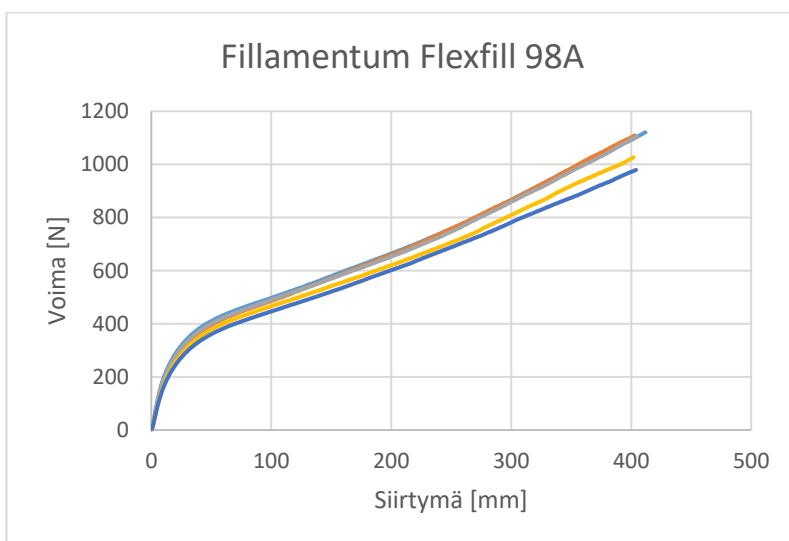


KUVIO 3. ColorFabb nGen flex –näytteiden käyttäytyminen ja hajoaminen.





KUVIO 4. TPU 95A –näytteiden käyttäytyminen ja hajoaminen.

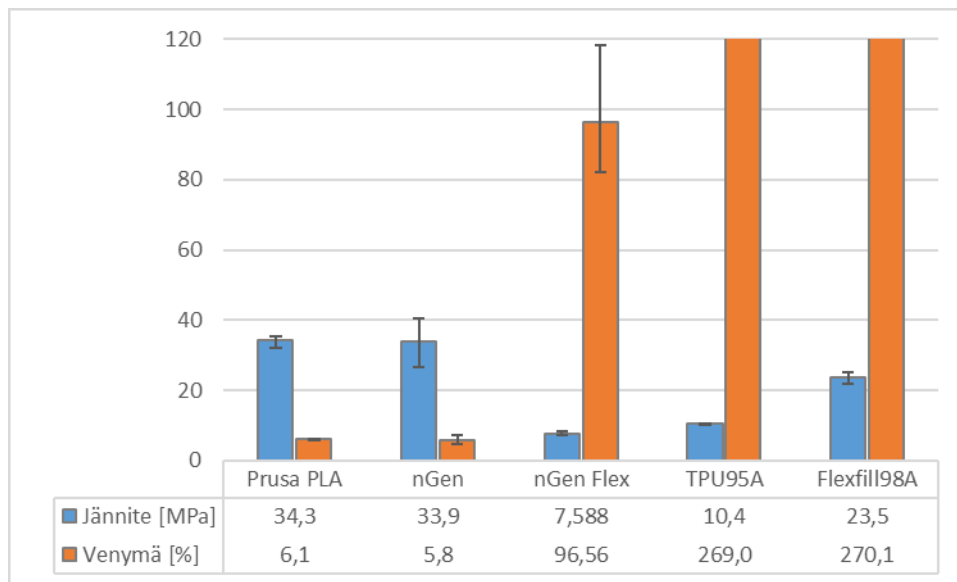


KUVIO 5. FlexFill 98A -näytteiden käyttäytyminen ja hajoaminen.



KUVA 10. TPU-näyte venyi moninkertaiseksi eikä katkennut testissä.

Materiaalien keskimääräiset prosentuaaliset venymät saadaan helposti laskettua mitattujen siirtymien avulla kaavalla (3) (kts luku 4). Näitä laskettuja keskimääräisiä venymiä ja jännityksiä on vielä vertailtu kuviossa 6. On syytä huomioida, että TPU-pohjaiset näytteet eivät lainkaan murtuneet testiolosuhteissa ja niiden venymät poikkesivat suuresti muista näytteistä, joten niiden todelliset venymät olisivat todellisuudessa vieläkin korkeampia.



KUVIO 6. Materiaalien venymät ja venyttämiseen vaaditut jännitykset vertailussa. Huomioitava on, että TPU-pohjaiset näytteet eivät rikkoutuneet ja venyivät 270%, mikä ei skaalauksen vuoksi näy kuvaajassa.

Valmistajien tarjoamien tietojen perusteella (kts luku 4 materiaalit) voitiin jo odottaa TPU-pohjaisten filamenttien venyvän parhaiten, ja näin myös tapahtui. Tämä tekee TPU:sta ensisijaisen materiaalivaihtoehdon tukirakenteille. Vaikka sekä Ultimaker TPU 95A että FlexFill 98A venyvät paljon, niiden venyttämiseen vaadittu voima erosi selvästi. FlexFillin venyttämiseen tarvittiin kaksinkertainen TPU 95A:han nähden, vaikka materiaalien kovuusero Shore A –kovuusasteikolla on vain 3 yksikköä (95 vs. 98). Tulosten perusteella siis pelkästään TPU:n tyyppiä vaihtamalla voidaan saada valmistettua hyvin eri kovuisia tukirakenteita. On hyvä kuitenkin muistaa, että tuloksiin voivat vaikuttaa kovuuseron lisäksi tulostusparametrien pienet erot: esim. täyttörakenteen (infill) määrä (kts luku 3.3.2), joka on oletuksena Ultimakerin Slicing-ohjelmistossa 20% ja Prusan Slicing-ohjelmistossa 15%, sekä tulostusnopeus.

## 6 KUORIUTUMISKOKEET

### 6.1 Suoratulostuskokeet

#### 6.1.1 Koeasetelma

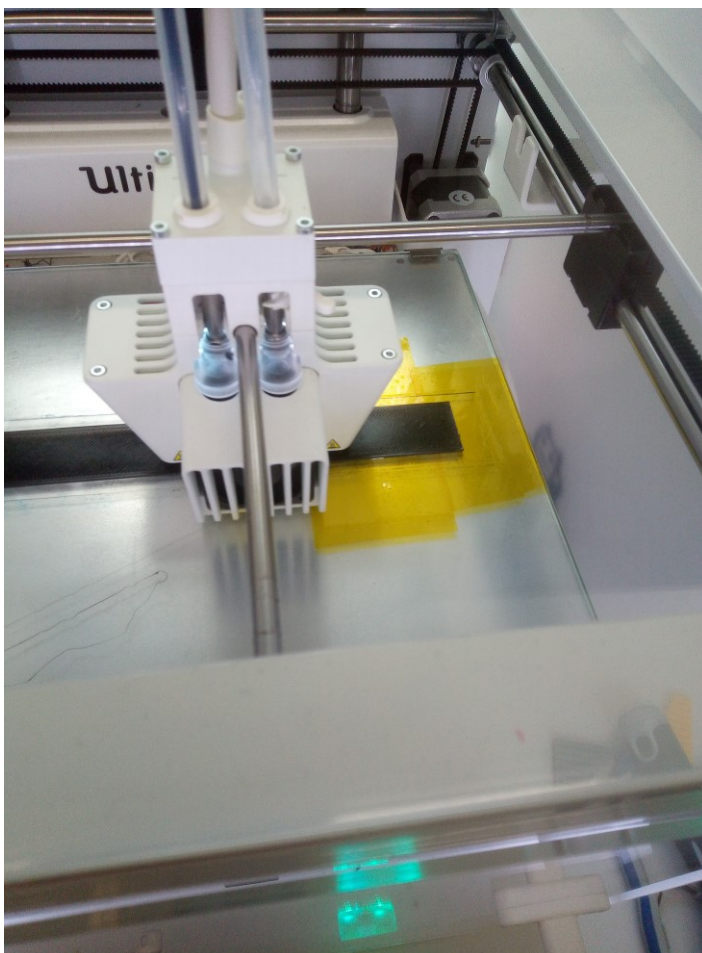
Verrattiin kuoriutumiskokeiden avulla kahta eri liittämismenetelmää. Ensimmäisessä, ns. suoratulostusmenetelmässä tarkoituksena oli 3D-tulostaa TPU-rakenne suoraan ohuen tulostusalustalle asetetun TPU-kalvon päälle, jolloin pelkkä sulatetun materiaalin lämpö kiinnittää rakenteen kalvoon ilman että avuksi tarvitaan esimerkiksi liimaa tai painetta. Käytettiin Platilon TPU U073 -kalvoa, jonka toisella puolella oli apuna PET-muovista tehty carrier-kalvo, joka helpotti ohuen TPU-kalvon asentamista tasaisesti tulostusalustan suuntaisesti ilman ryppyjä tai ilmakuplia. Tarkoituksena oli tarkastella liittämismenetelmän kestävyyttä ja luotettavuutta. Useiden testisarjojen avulla voitiin verrata, miten eri tekijät, kuten tulostuslämpötila ja käytettävä materiaali, vaikuttavat suoratulostetun kappaleen ja kalvon väliseen adheesioon eli tartuntavoimaan. Näytteet valmistettiin Ultimaker 3 –tulostimella käyttäen seuraavia materiaaleja ja lämpötiloja:

- Ultimaker TPU 95A, 240°C lämpötilalla
- Ultimaker TPU 95A, 260°C lämpötilalla
- Ultimaker Nylon, 260°C lämpötilalla
- colorFabb nGen, 235°C lämpötilalla

Tulostusalustan lämpötila oli 80C. Näytteet olivat kooltaan 210 mm \* 25 mm. Suunniteltu paksuus oli 0,5 mm. Materiaalien ja tulostusasetusten vuoksi paksuudet vaihtelivat käytännössä jonkin verran testisarjojen välillä.

Testimenetelmänä käytettiin EN ISO 11339 –standardin mukaista T-kuoriutumistestiä. Näytteen valmistamiseksi asetettiin aluksi TPU-kalvo 80-asteiseksi lämmitetylle tulostusalustalle siten, että alustan lämpö suoristi PET –tukikalvon ja samalla siihen kiinnitetyn TPU-kalvon. Kalvon pää peitettiin 5 cm matkalta lämmönkestävällä Kapton-teipillä, joka oli niin ohut, ettei se vaikuttanut olennai-

sesti tulostettujen rakenteiden tasaisuuteen. Näin saatiin tulostettua kuoriutumistesteihin soveltuva T:n muotoinen näyte, jossa kalvo ja tulostettu rakenne ovat kiinni toisissaan 16 cm matkalta ja (kun teippi on poistettu) erillään 5 cm matkalta (kuva 11). Tulostamisen jälkeen näytteestä poistettiin niin teippi kuin apuna ollut PET-tukikalvokin, jolloin saatiin standardin mukainen T:n muotoinen testikappale.



KUVA 11. Musta Nylon-näyte tulostumassa TPU-kalvon päälle. Keltainen Kapton-teippi pitää huolen, että tulostettava rakenne ei kosketa kalvoa koko matkalta.

Kuoriutumistestin suorittamiseksi kiinnitettiin tulostettu rakenne vetokoneen yläkitaan ja kalvo alakitaan ja vedettiin niitä erilleen (kuva 12). Aiempiin vetokokeisiin verrattuna tällä kertaa käytettiin T-testistandardin mukaista hieman korkeampaa nopeutta 100 mm/min. Testissä mitattiin kuoriutumisen vaatima voima ja vetokoneen yläkidan testinaikainen siirtymä.



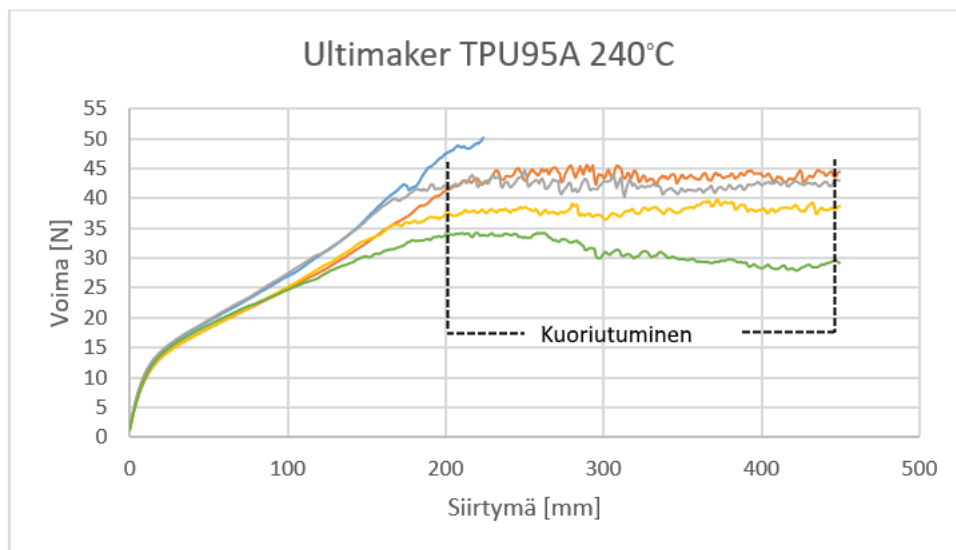
KUVA 12. T-kuoriutumistesti.

### 6.1.2 Tulokset

Käsitellään tässä suoratulostuskokeiden tärkeimmät tulokset. Tarkat tulokset on esitetty liitteessä 2.

Ensimmäinen testi suoritettiin TPU95A –materiaalilla (kuvio 7) 240°C tulostuslämpötilalla. Näytteen kuoriutuminen tapahtuu kuvaajan suhteellisen vaakasuoralla alueella, joka on merkitty kuvaajaan. Standardin mukaisessa testissä poistetaan varmuuden vuoksi kuoriutumisen alusta ja lopusta jonkin matkaa tuloksia

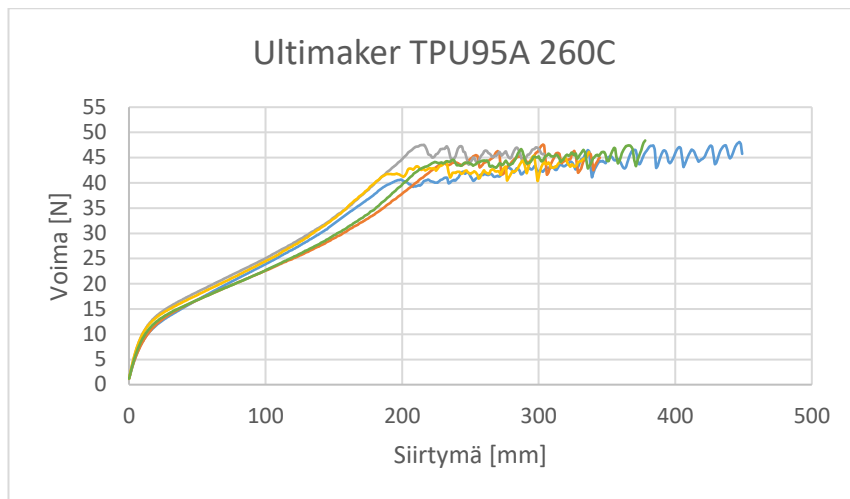
laskiessa. Tässä tapauksessa kuitenkin näytteiden suuren alkuvenyvän ja katkeilun vuoksi tuloksista huomioitiin laskennallisesti maksimivoimat keskimääräisten kuoriutumisten sijaan.



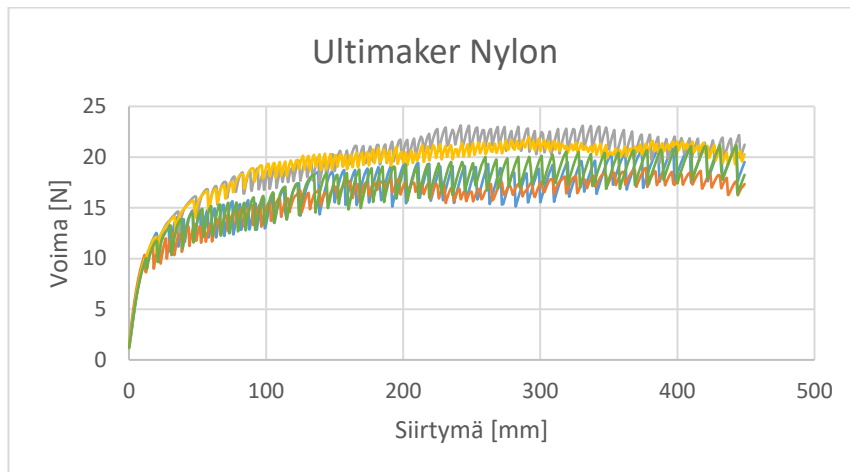
KUVIO 7. TPU95A kuoriutumistestin kuvaaja. Kuoriutuminen tapahtuu voimavenymä-kuvaajan suhteellisen vaakasuoralla alueella n. 200 – 450 mm venymän kohdalla.

Suoritettiin lisää T-kuoriutumistestejä siten, että TPU-kalvon päälle tulostettiin rakenne eri asetuksin. Ensin tulostettiin samalla TPU –materiaalilla 260°C tuloslämpötilalla, jolloin voitiin tarkastella lämpötilan vaikutusta adheesioon. Vertailun vuoksi tulostettiin testisarjat myös Nylon ja colorFabb nGen –materiaaleilla.

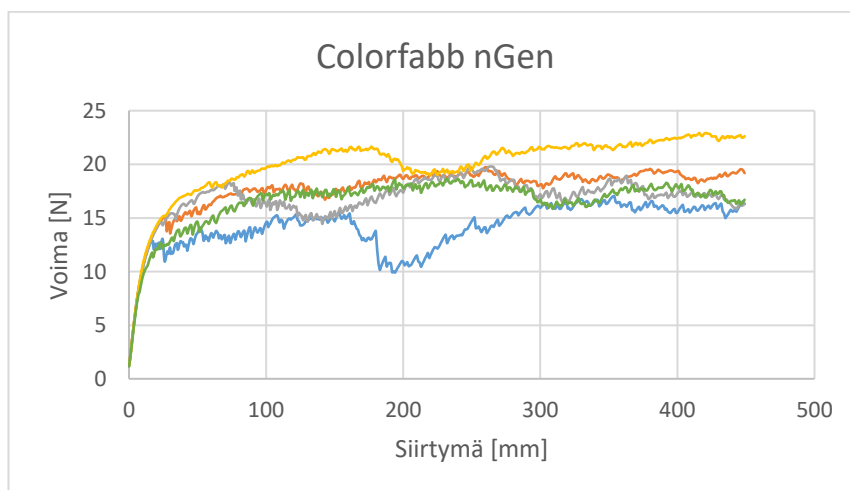
Testien voima-siirtymä-kuvaajat on esitetty kuvioissa 7-10. 240-asteisena tulostetun TPU:n kuvaaja (kuvio 7) näyttää, että tuloksissa on varsin paljon vaihtelua. Syy tähän ei selvinnyt ja vaatisi lisätutkimusta. Kun lämpötilaa nostettiin, saatiin selvästi yhdenmukaisempia tuloksia (kuvio 8), mutta nyt useimmat näytteet katkesivat ennen maksimisiirtymää 450 mm. Nylon ja nGen (kuviot 9-10) kuoriutuivat testissä hyvin pienellä venytyksellä eli niiden kohdalla adheesio oli selvästi heikompi. Erityisesti Nylon kuoriutui selkeästi pykälittäin, mikä näkyy kuvaajassa voimakkaana sahalaitakuviona.



KUVIO 8. TPU95A 260°C kuoriutumistestin kuvaaja.



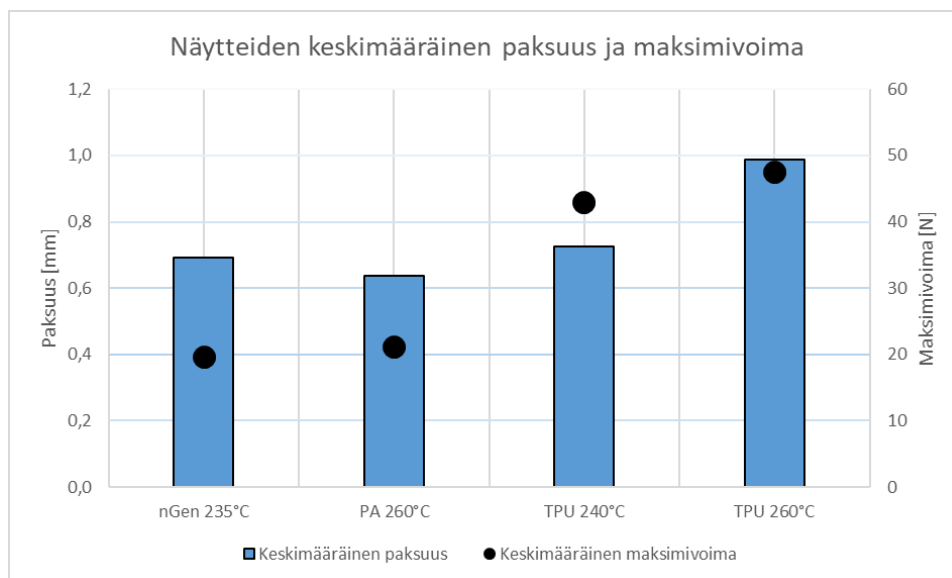
KUVIO 9. Ultimaker Nylon kuoriutumistestin kuvaaja.



KUVIO 10. ColorFabb nGen kuoriutumistestin kuvaaja.



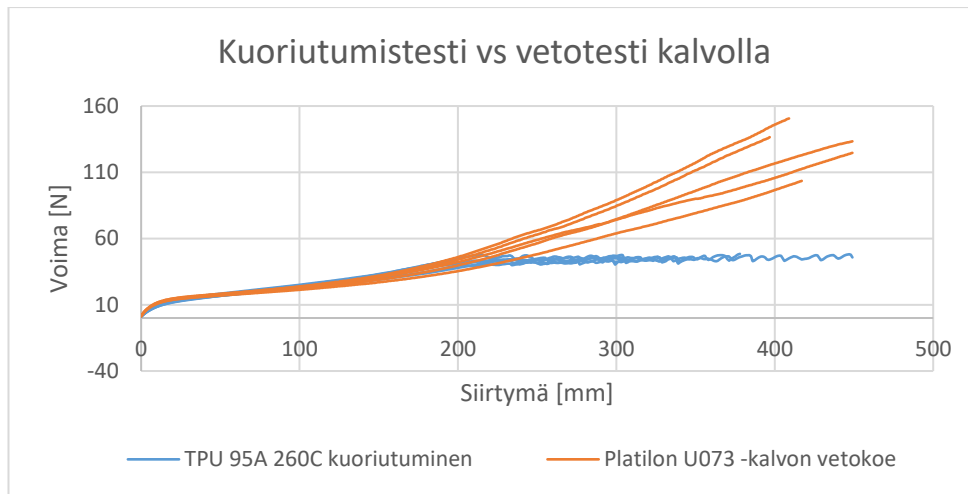
Kuten aiemmin mainittiin, näytteiden paksuudet testisarjojen välillä erosivat hieman. Tästä johtuen näytteiden keskimääräisiä paksuuksia ja maksimivoimia on vielä vertailtu kuviossa 11. Samoin kuin aiemmissa vetokokeissa, taas on ilmeistä, että TPU on ensisijainen materiaalivaihtoehto venyvien rakenteiden tulostamiseen. Lisäksi kuvioista 7-8 nähdään, että TPU:n tulostuslämpötila vaikuttaa selvästi sillä saavutettaviin tuloksiin, mutta optimaalisen lämpötilan suosittelminen vaatisi vielä lisätutkimusta eikä ole näiden tulosten perusteella yksiselitteistä.



KUVIO 11. Näytteiden keskimääräinen paksuus ja niiden kestävä keskimääräinen maksimivoima.

TPU-kuvaajista (kuviot 7-8) nähdään myös, että kalvo venyy melko paljon ennen kuin kuoriutuminen alkaa n. 200 mm kohdalla. Haluttiin vielä selvittää, onko kuvaajissa näkyvä kalvon venyminen luonnollista käyttäytymistä ja vaikuttaako kuorintakoeasetelma siihen, joten kuoriutumistestien tuloksia täydennettiin vetokokeilla, joissa vedettiin ainoastaan TPU-substraattikalvoa. Leikattiin TPU –kalvosta mitoiltaan kuoriutumistestin mallikappaleita vastaavia kappeleita, jotka testattiin samalla tavalla kuin kuoriutumisnäytteet. Poikkeuksena ainoastaan kitojen välinen etäisyys oli puolet kuoriutumistestien etäisyydestä (35 mm), jolloin TPU-kalvon pituus kokeen alussa oli sama kuin kuoriutumistesteissä.

Kuviossa 12 verrataan kuoriutumistestin ja kalvon vetokokeen kuvaajia. Huomataan, että kuvaajat ovat melko yhdenmukaiset ennen kuoriutumisen alkamista. Siis kalvon venyminen T-kuoriutumistestissä on ollut luonnollista eikä esim. tulostusmenetelmä tai kuoriutumistestin koeasetelma ole olennaisesti vaikuttanut kalvon käyttäytymiseen kuoriutumiskuvaajien venytys-alueella. Lisäksi on havaittavissa, että pelkkä kalvo kestää yli kaksinkertaisen voiman kuoriutumistestin vaatimaan voimaan verrattuna. Kuoriutumistestissä kalvo mahdollisesti katkeaa ennenaikaisesti, koska se taittuu ja venyy epätasaisesti sauma-alueella. Lisäksi kuoriutuneen kalvon pinta on epätasainen ja vaurioitunut (kuva 13), mikä voi aiheuttaa ennenaikaisen katkeamisen. Tähän luultavasti vaikuttaa korkeampi tulostuslämpötila, sillä 240 asteessa tulostetuista näytteistä ei testissä katkennut kuin yksi.



KUVIO 12. 260°C kuoriutumistestin ja pelkän kalvon vetotestit sovitettuna samaan kuvaajaan.



KUVA 13. Kuoriutuneen T-testinäytteen kalvolla (kuvan alaosa) on nähtävissä tulostettua TPU-materiaalia, mikä osoittaa materiaalien sulaneen tiiviisti kiinni toisiinsa.

## 6.2 Laminointikokeet

### 6.2.1 Koeasetelma

Tutkittiin vertailun vuoksi, millaisia tuloksia saadaan, kun suoratulostusmenetelmää verrataan perinteisempään laminointiin, jossa lämmön lisäksi rakenteiden substraattikalvolle kiinnittämiseen käytetään painetta.

Valmistettiin samanlaisia testikappaleita kuin aiemmissa T-testeissä (kts. luku 6.1.1), mutta tällä kertaa hieman eri tavalla. Ensin tulostettiin Ultimakerilla TPU95A –materiaalista saman kokoinen kappale kuin aiemmissakin kokeissa (210 mm \* 25 mm, paksuus 0,5 mm). Tämän jälkeen leikattiin TPU-kalvosta so-

pivan kokoinen, hieman tulostettua kappaletta suurempi pala. Nämä liitettiin toisiinsa Thermopatch n15R –tekstiiliprässillä (kuva 14). Jälleen käytettiin kappaaleen toisessa päässä Kapton -teippiä estämään liitoksen muodostuminen. Lisäksi käytettiin testikappaleen suojaamiseen teflon-kangaskappaleita, jotka estivät prässäyspintaa vasten olevan TPU-kalvon sulamisen kiinni prässiin.



KUVA 14. Työssä käytetty tekstiiliprässi ja näytteen suojana ollut beesi teflonkangaskappale.

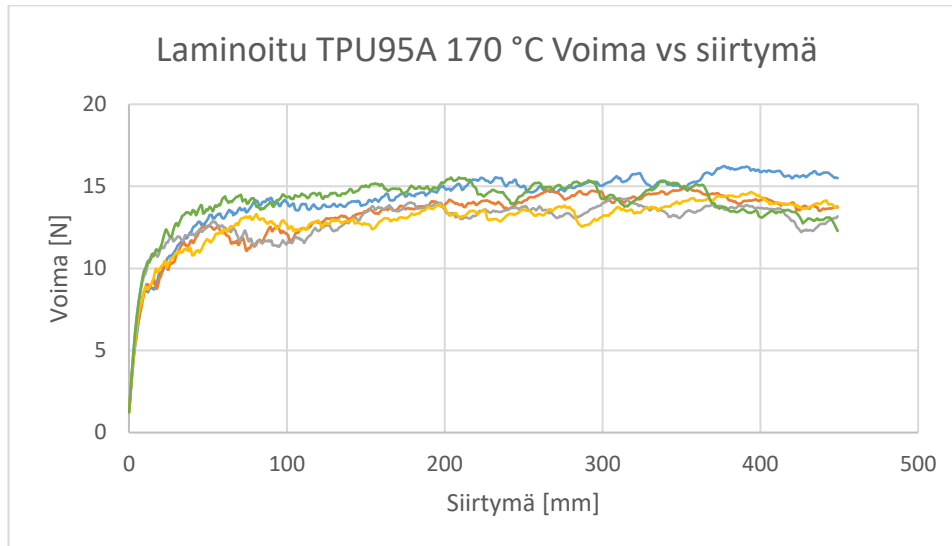
Valmistettiin 3 testisarjaa siten, että käytettiin 170, 190 ja 210 asteen lämpötiloja. Jokaiseen sarjaan tehtiin 5 testikappaletta. Paineena kaikissa sarjoissa käytettiin 5 baria ja prässäysaika oli 10 sekuntia.

## 6.2.2 Tulokset

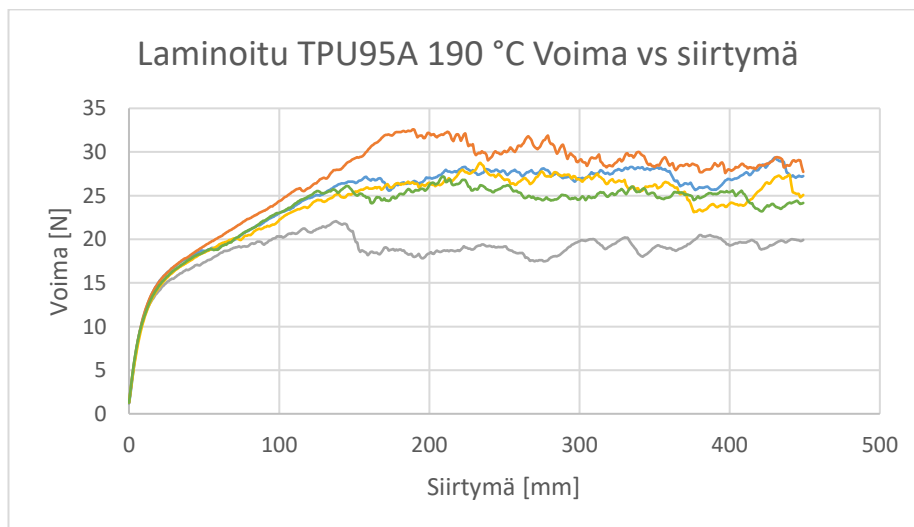
Tässä esitellään laminoitukokeiden tärkeimmät tulokset. Tarkat tulokset on esitetty liitteessä 2.

Valmistetuilla testisarjoilla suoritettiin vastaavat EN ISO 11339 –standardin mukaiset T-kuoriotumistestit kuin aiemmin (kts luku 6.1). Testien voima-siirtymä-

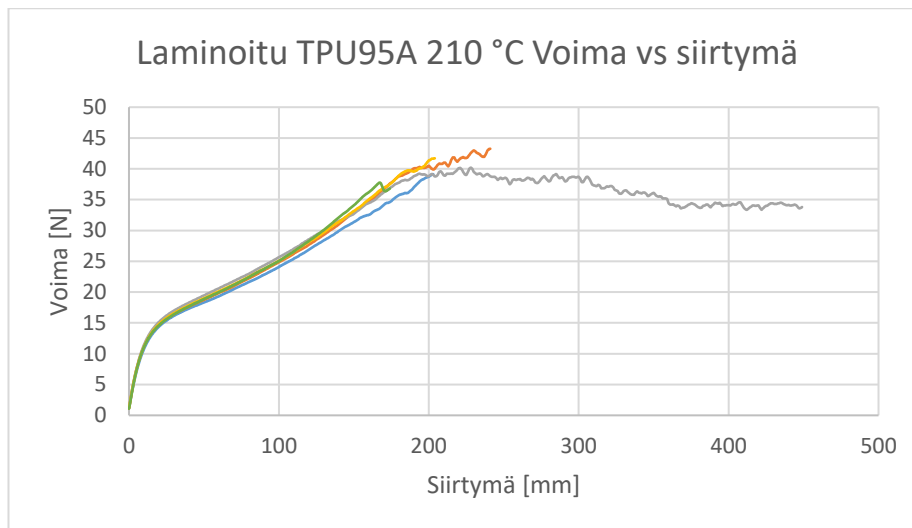
kuvaajat on esitetty kuvioissa 13-15. Kuviossa 16 on verrattu eri lämpötiloilla saavutettuja tuloksia keskenään. Huomataan, että lämpötilan lisääminen paransi tasaisesti adheesiota. Alle 210°C laminoitujen näytteiden adheesio oli varsin heikko.



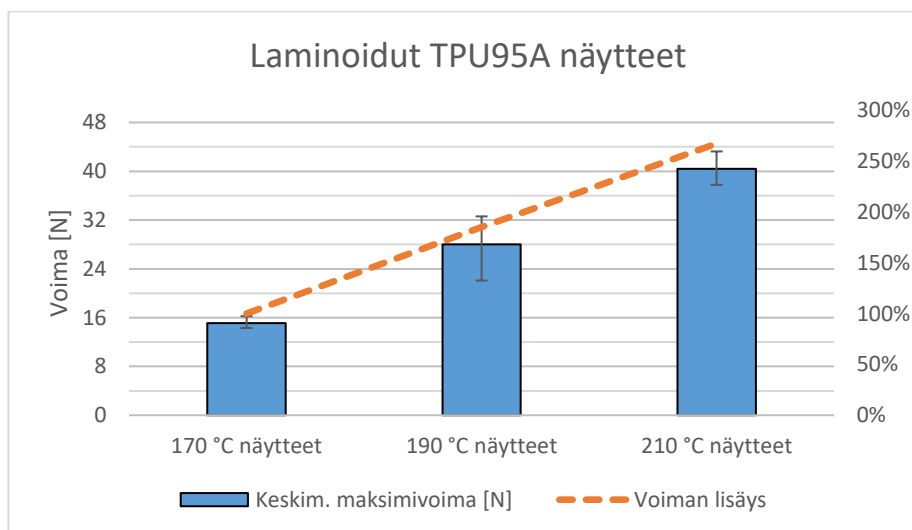
KUVIO 13. Laminoitu TPU 170°C kuoriutumistestin kuvaaja.



KUVIO 14. Laminoitu TPU 190°C kuoriutumistestin kuvaaja.



KUVIO 15. Laminoitu TPU 210°C kuoriutumistestin kuvaaja.



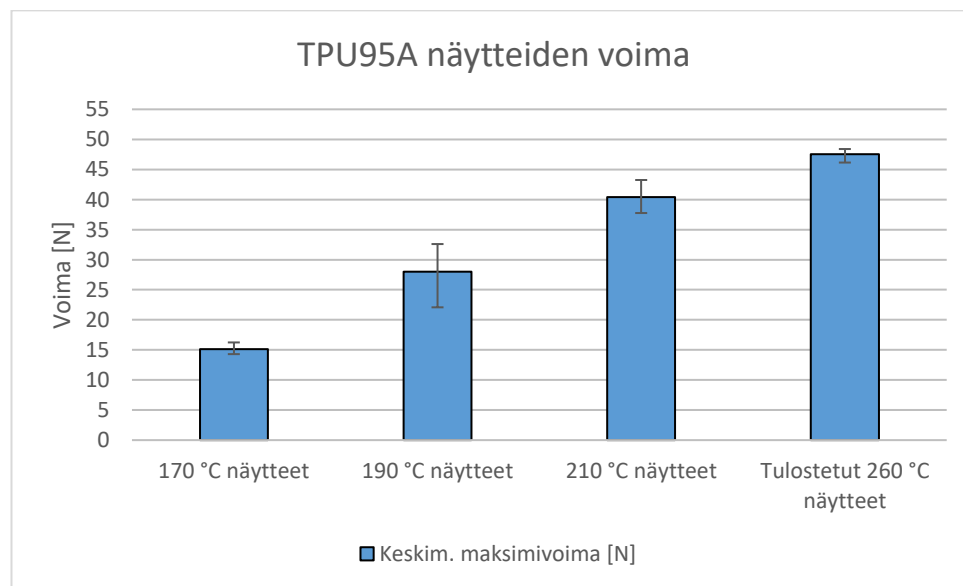
KUVIO 16. Laminoidut TPU-näytteet

Kuviossa 17 on verrattu Laminoituja näytteitä 260°C:ssa 3D-tulostettuihin näytteisiin. Tulostettujen näytteiden vaatima voima on selvästi suurin. Kuitenkin voidaan havaita, että lämpötilan lisääminen paransi koko ajan prässättyjen näytteiden kestoja. Työssä käytetyn tekstiilipressin maksimilämpötila oli 210°C, joten ei ollut mahdollista kokeilla, miten tätä korkeammat lämpötilat vertautuisivat tulostettuihin näytteisiin.

Kuvioista 13-15 on kuitenkin havaittavissa eräs olennainen asia. Siinä missä 170°C:ssa ja 190 °C:ssa laminoidut näytteet kuoriutuivat vedon loppuun asti, 210°C:ssa laminoidut näytteet eivät yhtä lukuun ottamatta kuoriutuneet kovin

paljoo vaan katkesivat vedettäessä TPU-kalvon kohdalta. Kalvo oli näissä tapauksissa siis heikompi kuin rakenteen ja kalvon välinen saumakohta. Sama oli havaittavissa jo 260°C:ssa suoratulostetuilla kappaleilla (kuvio 8). Kun sauma on kalvoa kestävämpi, on kalvo systeemin heikko lenkki ja adheesion voidaan näin ollen ajatella olevan niin hyvä kuin mahdollista. Kuitenkin pelkkää kalvoa venytettäessä (kuvio 12) havaittiin kalvon kestävän paljon enemmän venytystä kuin kuoriutumiskokeiden yhteydessä. Käytännössä siis liittämismenetelmä vaikuttaa jossain määrin myös kalvon kestävyuteen. Yhtenä syynä saattaa olla saumakohdan epätasaisuus, joka voi saada venytyksen aiheuttamat jännitykset jakautumaan epätasaisesti kalvolla. Tähän voi vaikuttaa FDM-menetelmällä tulostettuihin kappaleisiin liittyvä pintojen epätasaisuus, joten esimerkiksi kappaleen tulostussuuntaa säätämällä voitaisiin mahdollisesti edelleen parantaa systeemin kestoa tiettyyn vetosuuntaan nähden.

Parasta mahdollista adheesiota kiinnostavampaa saattaa kuitenkin olla jo se, että suoratulostusmenetelmä vertautuu perinteisesti käytettyyn laminointiin kokonaisuudessaan varsin positiivisesti. Suoratulostus on joka tapauksessa menetelmänä yksinkertaisempi eikä vaadi erillistä prässäyslaitteistoa.



KUVIO 17. Laminoitujen ja tulostettujen näytteiden voima.

Suoraan substraattikalvolle tulostaminen ja laminointi ovat käytännössä menetelminä varsin erilaiset. Yksittäisten kappaleiden 3D-suoratulostaminen ei mah-

dollista liittämismenetelmän eriyttämistä tehokkaan sarjatuotantoprosessin (kuten ruiskuvalun) osaksi, koska liittäminen tapahtuu samalla kun kappale valmistuu. Toisaalta yksittäisiä mallikappaleita 3D-tulostimella valmistettaessa työtä helpottaa, mikäli laminointivaihe ja siihen liittyvän laitteiston käsittely voidaan jättää kokonaan pois. Näiden kokeiden perusteella suoraan kalvolle tulostamalla saavutetaan niin hyvä adheesio, ettei ainakaan tämänkaltaisen tekstiiliprässin käyttäminen tuo siihen verrattuna mitään lisäarvoa.



## 7 SÄHKÖMEKAANISET KOKEET

Työn viimeisessä vaiheessa tutkittiin, saadaanko venyvän johtimen sähkömekaanista kestävyyttä parannettua 3D-tulostettujen tukirakenteiden avulla. Samalla voitiin tarkastella, miten työssä testattu suoratulostusmenetelmä käytännössä soveltuu tämänkaltaisen venyvän elektroniikan tutkimuksen tekemiseen.

Näiden testien osalta koeasetelma, tulokset ja pohdinta on esitetty ainoastaan erillisessä salassa pidettävässä liitteessä.

## 8 POHDINTA

Vetokokeet osoittivat, että TPU on ensisijainen materiaalivaihtoehto suurta venyvyyttä vaativiin sovelluksiin. TPU-materiaaleja on saatavilla hyvin monenlaisilla kovuuksilla. Työssä havaittiin, että kovuutta muuttamalla voidaan saada hyvin eri tavoin käyttäytyviä rakenteita siten, että materiaalit ovat edelleen helposti tulostettavissa. Työssä käytettiin kahta eri TPU-filamenttia, joiden kovuudet Shore-asteikolla olivat 95A ja 98A. Tulevaisuudessa voisi olla kiinnostavaa tehdä laajempaan kartoitusta eri kovuisten TPU-filamenttien mekaanisista ominaisuuksista ja tulostettavuudesta. Joidenkin 3D-tulostinmallien tukema monimateriaalitulostus mahdollistaisi myös eri TPU-filamenttien yhdistelyn, mikä tuo runsaasti lisää vaihtoehtoja venyvien rakenteiden valmistamiseen. Voisi esimerkiksi olla kiinnostavaa tutkia, miten kovuuden asteittainen muuttuminen kappaleen sisällä vaikuttaisi sen käyttäytymiseen erilaisissa venyvyyttä vaativissa sovelluksissa. Mikäli esimerkiksi venyvän rakenteen päälle halutaan liittää venymättömästä materiaalista valmistettuja rakenteita, voisi olla tarpeen tutkia, millä tavoin kovuuden asteittainen muuttuminen vaikuttaa adheesioon.

Kuoriutumiskokeissa saavutettiin jälleen parhaat tulokset TPU:lla. Etenkin suoraan TPU-kalvolle tulostettaessa on ymmärrettävää, että TPU:ta tulostusmateriaalina käytettäessä saadaan muodostettua paras adheesio substraattikalvon kanssa. TPU:n tulostuslämpötilan lisääminen 20 asteella paransi tuloksia hienan. Käytännössä tulostuslämpötila vaikuttaa kuitenkin tulostamisessa muuhunkin kuin tässä testattuun adheesioon, joten optimaalisen tulostuslämpötilan hakeminen ja suositteleminen vaatisi runsaasti lisätestausta ja riippuu joka tapauksessa kullekin sovellukselle asetetuista tavoitteista.

Suoratulostusmenetelmällä saavutettua adheesiota verrattiin tekstiiliprässillä laminointiin. Tässä työssä käytetty laminointimenetelmä ei pärjännyt suoratulostukselle. Suoratulostettujen näytteiden kestävä keskimääräinen maksimivoima oli 48 N ja parhaan laminoidun testisarjan puolestaan 40 N. On kuitenkin syytä muistaa, että laminointi voidaan suorittaa lukemattomilla tavoilla. Eri menetelmien laajempi kartoitus ja vertailu vaatisi runsaasti laitteistoa, mutta voisi olla mahdolli-

suuksien mukaan hyödyllistä tulevaisuudessa toteuttaa. Siltikin suoratulostuksella saavutetut tulokset olivat varsin hyviä, ja menetelmän yksinkertaisuus voi houkutella käyttämään sitä joka tapauksessa, kun halutaan kokeilla nopeasti erilaisia venyvän elektroniikan yksittäiskappaleita. Venyvien materiaalien tulostaminen vaatii toisinaan hieman tulostusasetusten säätämistä esimerkiksi materiaalin valumisen vuoksi, mutta onnistui ainakin tässä työssä käytetyillä tulostimilla kaiken kaikkiaan helposti ja tasalaatuisesti.

## LÄHTEET

Aranda, S. 2017. 3D Printing Failures. Amazon on-demand.

Britannica Academic. Young's modulus, Stress, Strain, Polyurethane, Polyamide, Nylon. Luettu 22.7.2019. <https://academic.eb.com/>

colorFabb nGen. Luettu 26.6.2019. <https://ngen.colorfabb.com/>

colorFabb nGen Flex. Luettu 26.6.2019. <https://ngen-flex.colorfabb.com/>

Feldman, D. 2017. Polyamide nanocomposites. Journal of Macromolecular Science, Part A, 04/2017. Taylor and Francis Group, LLC 2017.

Fillamentum. FlexFill 98A. Luettu 26.6.2019. <https://fillamentum.com/collections/flexfill>

FIRPA. Suomen pikavalmistusyhdistys ry. Luettu 31.7.2019. [www.firpa.fi](http://www.firpa.fi)

Gartner. Luettu 5.6.2019. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-11-29-gartner-says-worldwide-wearable-device-sales-to-grow>

Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., Spence, D. M. 2014. Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. Analytical Chemistry 2014, 86, 7, 3240-3253.

Hamad, K., Kaseem, M., Yang, H. W., Deri, F., Ko, Y. G. 2015. Properties and medical applications of polylactic acid. eXPRESS Polymer Letters Vol. 9, No. 5 (2015) 435-455.

Harris, K. D., Elias, A. L., Chung, H.-J. 2016. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies. Journal of Material Sciences 2016, 51: 2771-2805. Springer.

ISO/ASTM 52900 -standardi 2015

Kim, K.-S., Kim, K.-H., Jung, S.-B. 2013. Design and Fabrication of screen-printed silver circuits for stretchable electronics. Microelectronics engineering 120 (2014) 216-220.

Kumar, R., Josse, C., Anandjiwala, R. 2014. Dry and wet mechanical properties of polylactic acid in the presence of canola oil. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering 05/2014.

Madehow. How printed circuit board is made. Luettu 22.7.2019. <http://www.madehow.com/Volume-2/Printed-Circuit-Board.html>

Pcbcart. PCB material selection guide. Luettu 22.7.2019. <https://www.pcbcart.com/pcb-capability/pcb-materials.html>

Prusa pla. Luettu 26.6.2019. <https://shop.prusa3d.com/en/prusament/711-prusament-pla-prusa-galaxy-black-1kg.html>

Prusa printers. Luettu 26.6.2019. <https://shop.prusa3d.com/en/17-3d-printers>

Redwood, B., Schöffer, F., Garret, B. 2017. The 3D Printing Handbook. 3D Hubs B.V.

Salo, T. 2017. Alternative Manufacturing and Testing Methods of Stretchable Electronics. Pro gradu –tutkielma. Tampereen teknillinen yliopisto.

Sastri, V. R. 2013. Plastics in Medical Devices: Properties, Requirements and Applications. Elsevier Inc.

Someya, T. 2013. Stretchable Electronics. Wiley-VCH.

Suikkola, J. 2015. Printed Stretchable Interconnects for Wearable Health and Wellbeing Applications. Pro gradu –tutkielma. Tampereen teknillinen yliopisto.

Suikkola, J., Björninen, T., Mosallaei, M., Kankkunen, T., Iso-Ketola, P., Ukkonen, L., Vanhala, J., Mäntysalo, M. 2016. Screen-Printing Fabrication and Characterization of Stretchable Electronics. Scientific Reports 6:25784.

Suonurmi, T. 2016. Component Mounting on Stretchable Substrate in Wearable Electronics Applications. Pro gradu –tutkielma. Tampereen teknillinen yliopisto.

Ultimaker TPU 95A. Luettu 25.6.2019. <http://www.ultimaker.com/materials/tpu-95a>

Ultimaker PLA. Luettu 25.6.2019. <http://www.ultimaker.com/materials/Nylon>

Ultimaker Nylon. Luettu 25.6.2019. <http://www.ultimaker.com/materials/Nylon>

Ultimaker UM3. Luettu 25.6.2019. <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3>

Vanfleteren, J., Gonzalez, M., Bossuyt, F., Hsu, Y.-Y., Vervust, T., De Wolf, I., Jablonski, M. 2012. Printed circuit board technology inspired stretchable circuits. MRS Bulletin vol. 37. Materials Research Society.

WIPO Patentscope. Iso-Ketola, P., Vanhala, J., Mäntysalo, M. 2018. A Stretchable Structure Comprising a Conductive Path and a Method for Manufacturing the Structure. Luettu 28.6.2019. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2018060554>

Xometry. Support. What is infill? Luettu 26.6.2019. <https://support.xometry.com/hc/en-us/articles/115000590087-What-is-Infill->

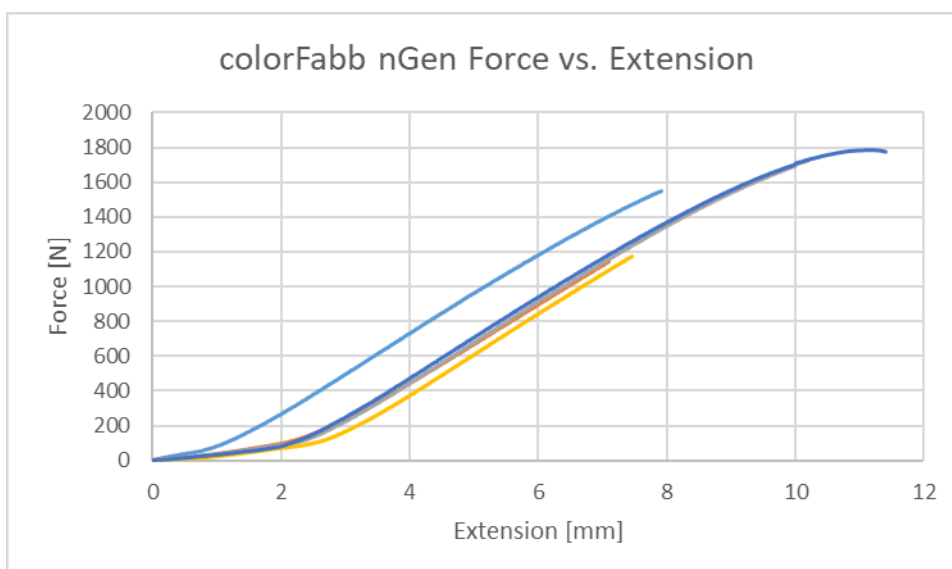
Zhou, W. 2018. 3D printing. AccessScience. McGraw-Hill Education.

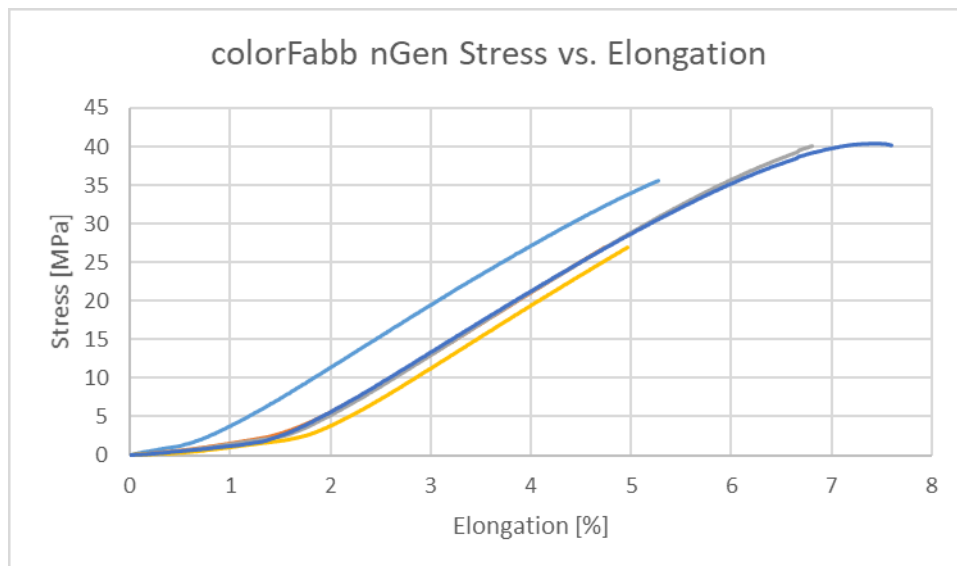
## LIITTEET

### Liite 1. Vetokokeiden tulokset

#### nGen

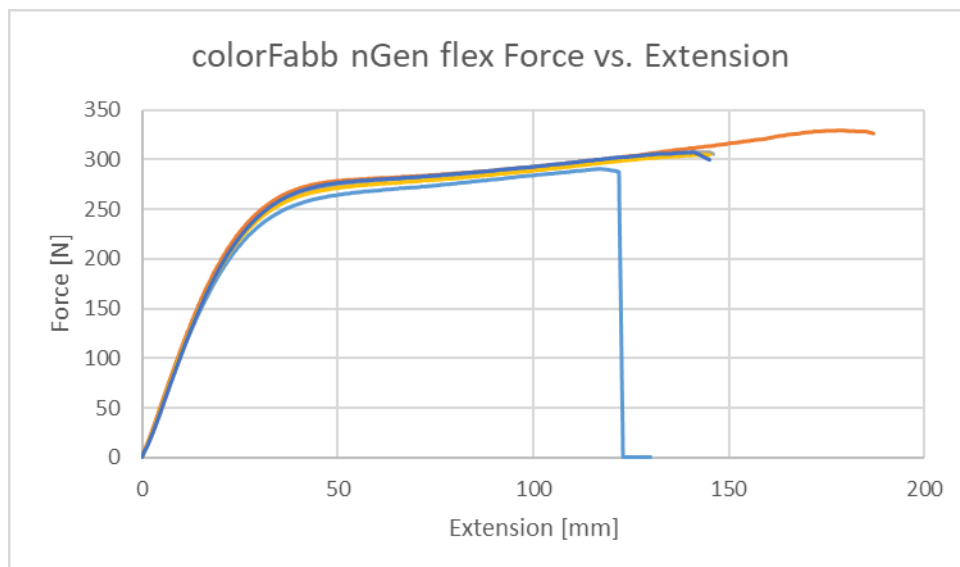
	Max N	Max mm	Max Mpa	Max %
nGen 1	1552	7,9	35,6	5,3
nGen 2	1144	7,1	26,4	4,7
nGen 3	1730	10,2	40,1	6,8
nGen 4	1173	7,5	26,9	5,0
nGen 5	1782	11,1	40,4	7,4
AV	1476	8,7	33,9	5,8
MAX	1782	11,1	40,4	7,4
MIN	1144	7,1	26,4	4,7

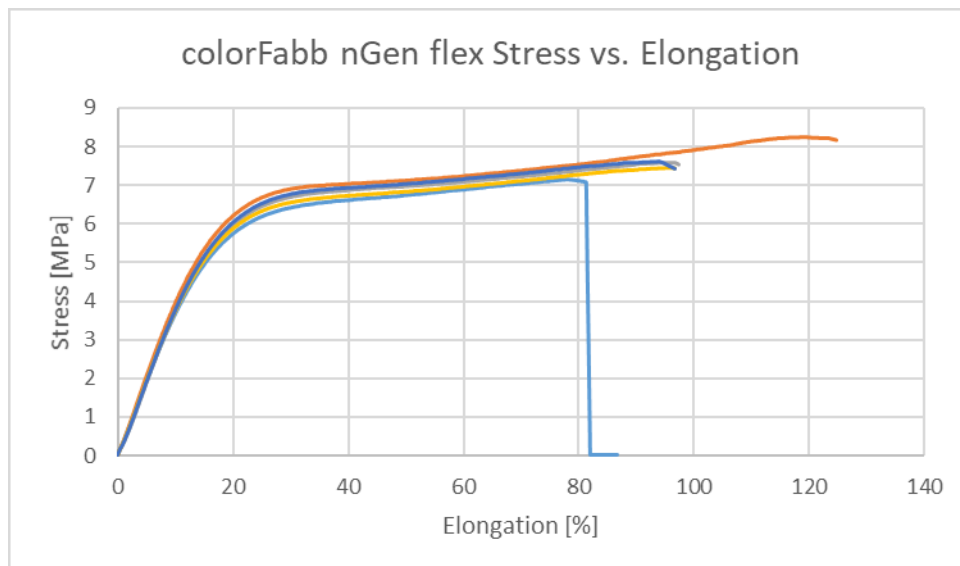




### nGen Flex

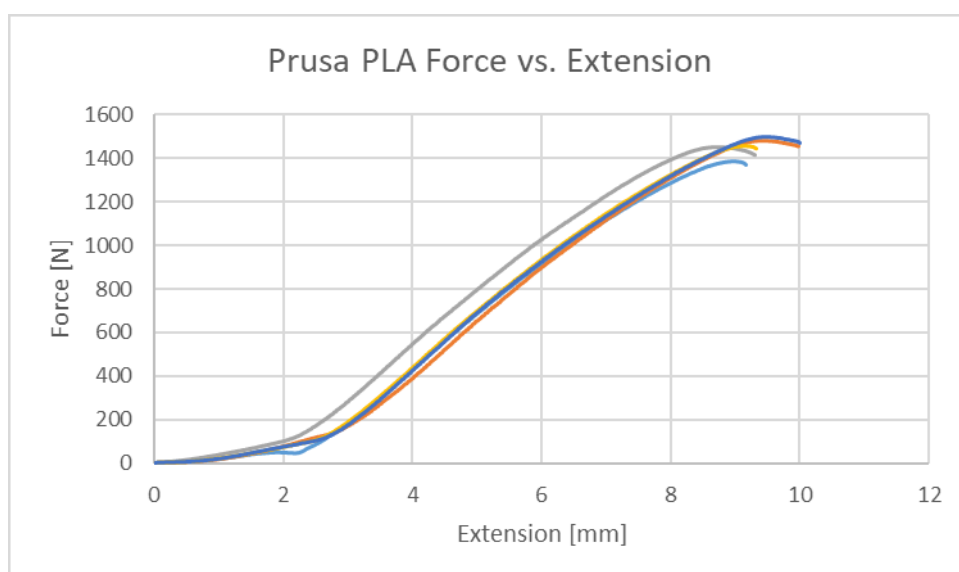
	Max N	Max mm	Max Mpa	Max %
nGen flex 1	290,8	123,0	7,2	82,0
nGen flex 2	330	177,6	8,2	118,4
nGen flex 3	307,2	140,6	7,6	93,7
nGen flex 4	305,2	142,5	7,5	95,0
nGen flex 5	307,6	140,6	7,5	93,7
AV	308	144,9	7,6	96,6
MAX	330	177,6	8,2	118,4
MIN	291	123,0	7,2	82,0



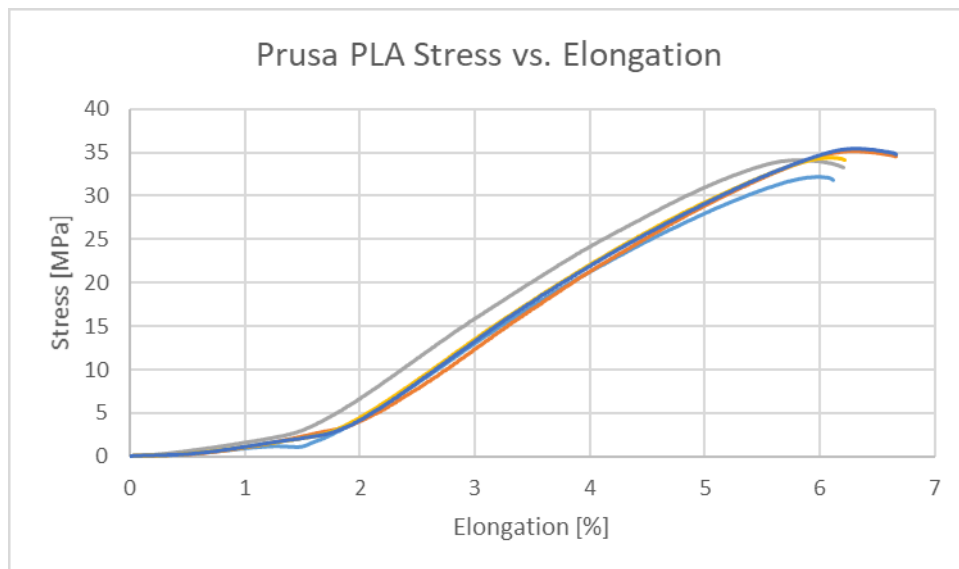


### Prusa PLA

	Max N	Max mm	Max Mpa	Max %
Prusa PLA 1	1389	8,9	32,2	6,0
Prusa PLA 2	1481	9,4	35,1	6,2
Prusa PLA 3	1451	8,6	34,2	5,8
Prusa PLA 4	1458	9,1	34,4	6,1
Prusa PLA 5	1499	9,4	35,4	6,3
AV	1456	9,1	34,3	6,1
MAX	1499	9,4	35,4	6,3
MIN	1389	8,6	32,2	5,8

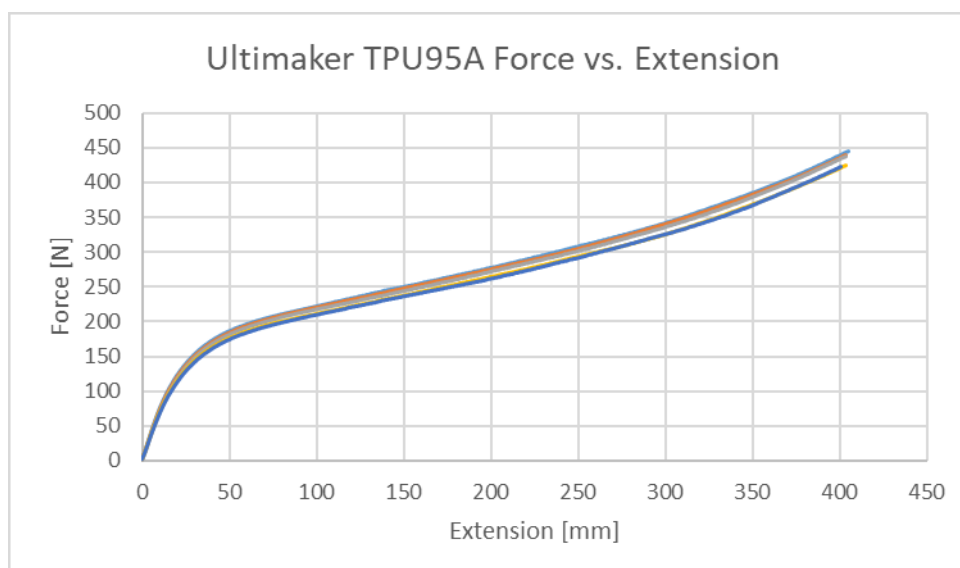


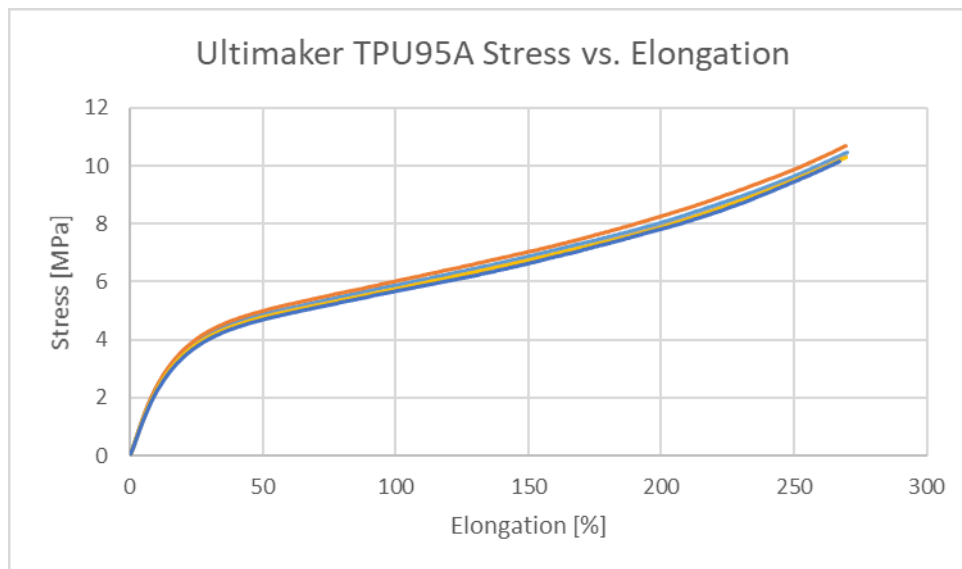




### Ultimaker TPU95A

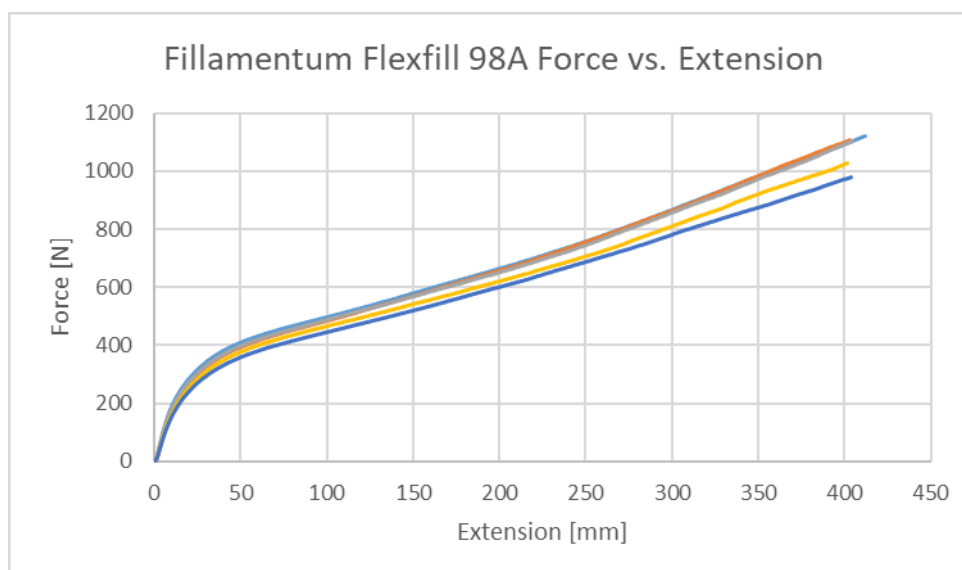
	Max N	Max mm	Max Mpa	Max %
Ultimaker TPU95A 1	444,5	405,0	10,5	270,0
Ultimaker TPU95A 2	440	403,5	10,7	269,0
Ultimaker TPU95A 3	437	404,0	10,4	269,3
Ultimaker TPU95A 4	425,5	404,0	10,3	269,3
Ultimaker TPU95A 5	422,5	401,0	10,2	267,3
AV	434	403,5	10,4	269,0
MAX	445	405,0	10,7	270,0
MIN	423	401,0	10,2	267,3

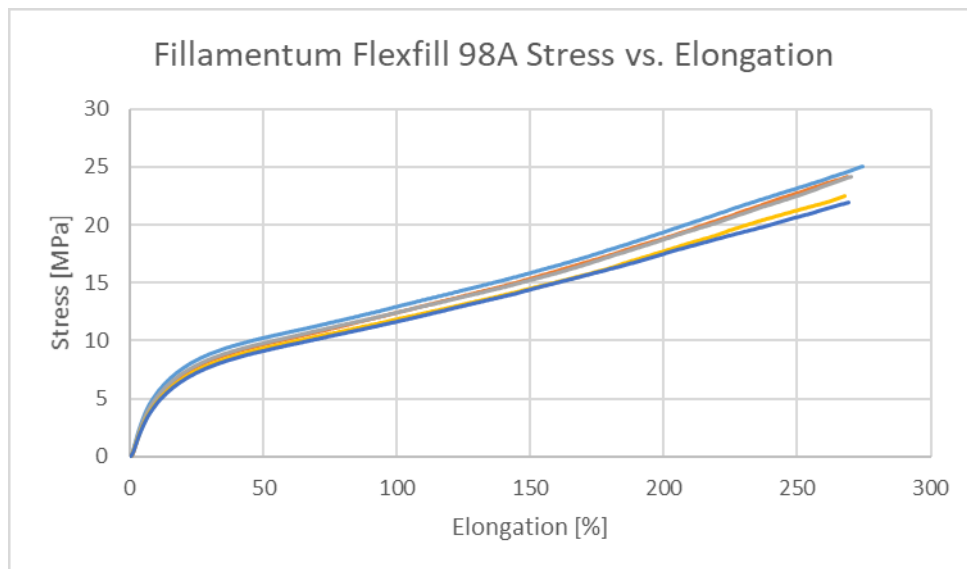




### Fillamentum FlexFill 98A

	Max N	Max mm	Max Mpa	Max %
Fillamentum Flexfill 98A 1	1120	411,5	25,0	274,3
Fillamentum Flexfill 98A 2	1109	403,0	24,1	268,7
Fillamentum Flexfill 98A 3	1105	405,0	24,2	270,0
Fillamentum Flexfill 98A 4	1026	402,0	22,5	268,0
Fillamentum Flexfill 98A 5	979	404,0	21,9	269,3
AV	1068	405,1	23,5	270,1
MAX	1120	411,5	25,0	274,3
MIN	979	402,0	21,9	268,0



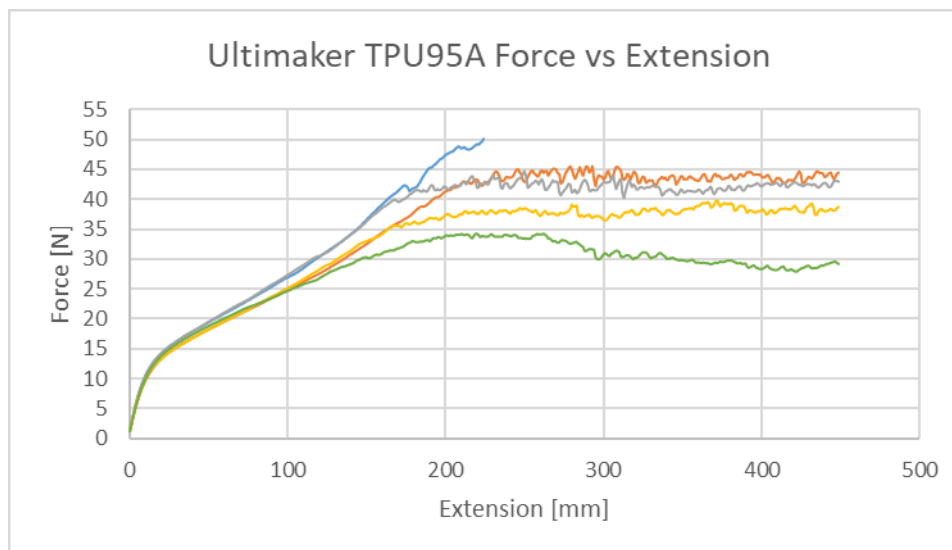


## Liite 2. Kuoriutumiskokeiden tulokset

## Suoratulostukset

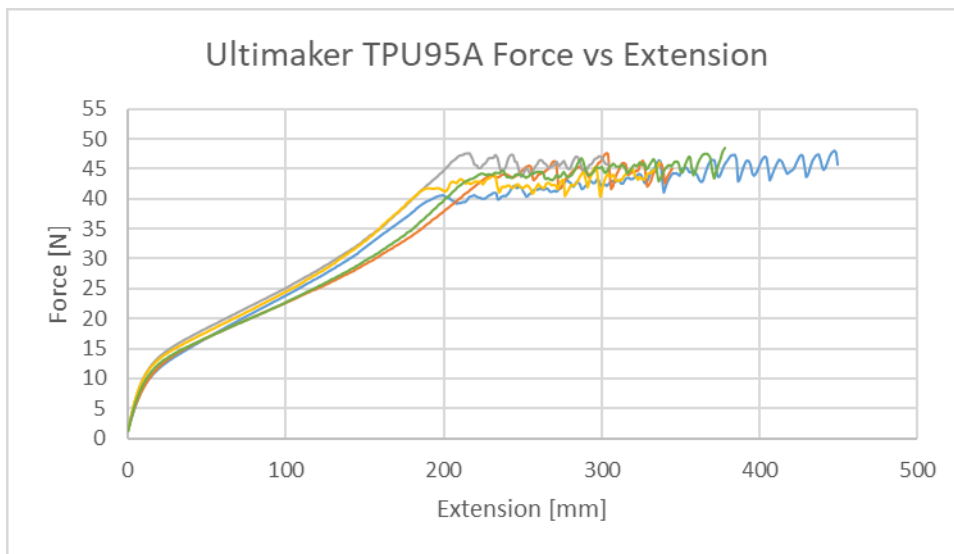
## TPU 240C

		Max N	Max mm	Max bond strength					
sample 1	snapped	50,3	224	1,99					
sample 2	peeled	45,55	279	1,81					
sample 3	peeled	44,7	250	1,77					
sample 4	peeled	39,88	372	1,58					
sample 5	peeled	34,28	262	1,37					
AV		42,942							
FORCES:						BOND STRENGTH:			
		broke at t	snapped	peeled			broke at t	snapped	peeled
AV			50,3	41,10	AV		1,99	1,63	
MAX				45,55	MAX			1,81	
MIN				34,28	MIN			1,37	
AV-MIN				6,82	AV-MIN			0,27	
MAX-AV				4,45	MAX-AV			0,18	



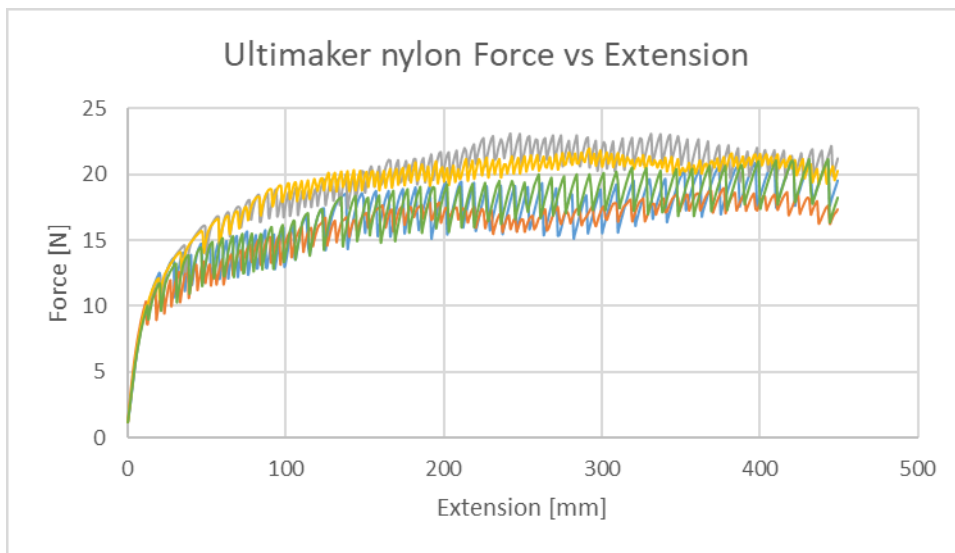
## TPU 260C

		Max N	Max mm	Max bond strength				
sample 1	peeled	48,1	447	1,91				
sample 2	snapped	47,6	303,2	1,88				
sample 3	snapped	47,55	216	1,88				
sample 4	snapped	46,15	336,8	1,84				
sample 5	snapped	48,4	378	1,91				
AV		47,56						
FORCES:					BOND STRENGHT:			
		broke at t	snapped	peeled		broke at t	snapped	peeled
AV			47,43	48,1	AV		1,88	1,91
MAX			48,4		MAX		1,91	
MIN			46,15		MIN		1,84	
AV-MIN			1,28		AV-MIN		0,04	
MAX-AV			0,97		MAX-AV		0,03	



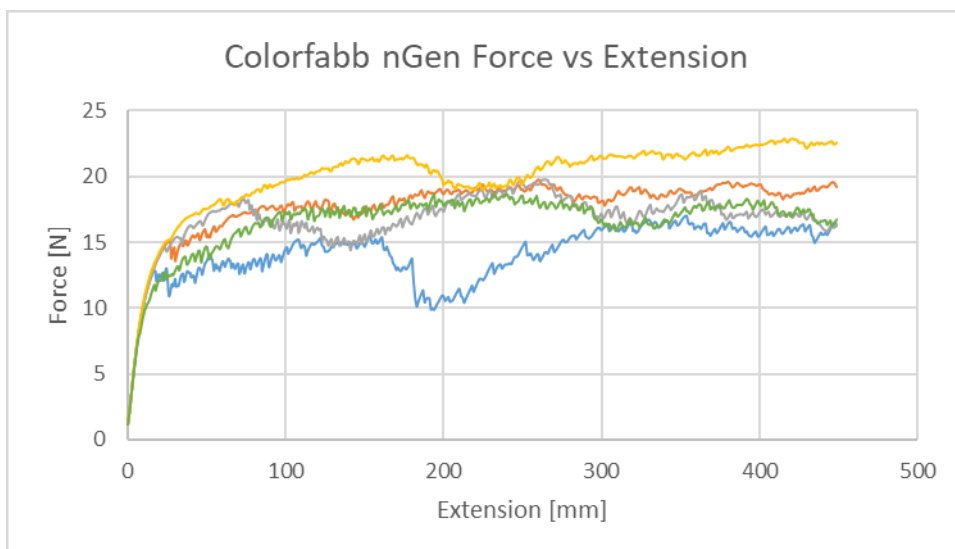
### Nylon

		Max N	Max mm	Max bond strength				
sample 1	peeled	21,08	409	0,84				
sample 2	peeled	18,94	377	0,75				
sample 3	peeled	23,13	242	0,92				
sample 4	peeled	21,98	292	0,87				
sample 5	peeled	21,17	431	0,85				
AV		21,26						
FORCES:					BOND STRENGHT:			
		broke at t	snapped	peeled		broke at t	snapped	peeled
AV				21,26	AV			0,85
MAX				23,13	MAX			0,92
MIN				18,94	MIN			0,75
AV-MIN				2,32	AV-MIN			0,10
MAX-AV				1,87	MAX-AV			0,07

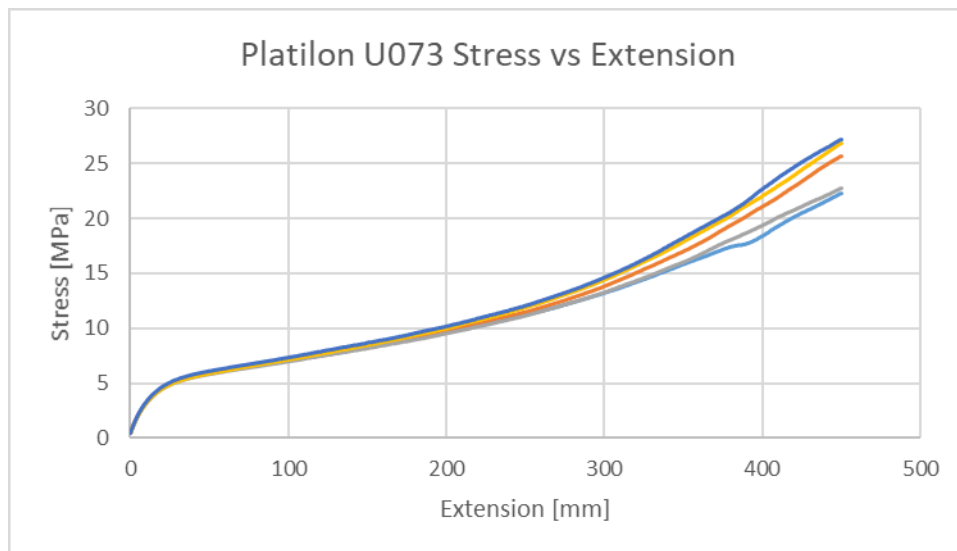


**nGen**

		Max N	Max mm	Max bond strength					
sample 1	peeled	17,04	353,5	0,67					
sample 2	peeled	19,74	260	0,78					
sample 3	peeled	19,8	263,5	0,78					
sample 4	peeled	22,92	416	0,91					
sample 5	peeled	18,64	232	0,73					
AV		19,628							
FORCES:						BOND STRENGTH:			
		broke at t	snapped	peeled			broke at t	snapped	peeled
AV				19,63	AV				0,78
MAX				22,92	MAX				0,91
MIN				17,04	MIN				0,67
AV-MIN				2,59	AV-MIN				0,10
MAX-AV				3,29	MAX-AV				0,13



**Platilon U073**



## Laminointikokeet

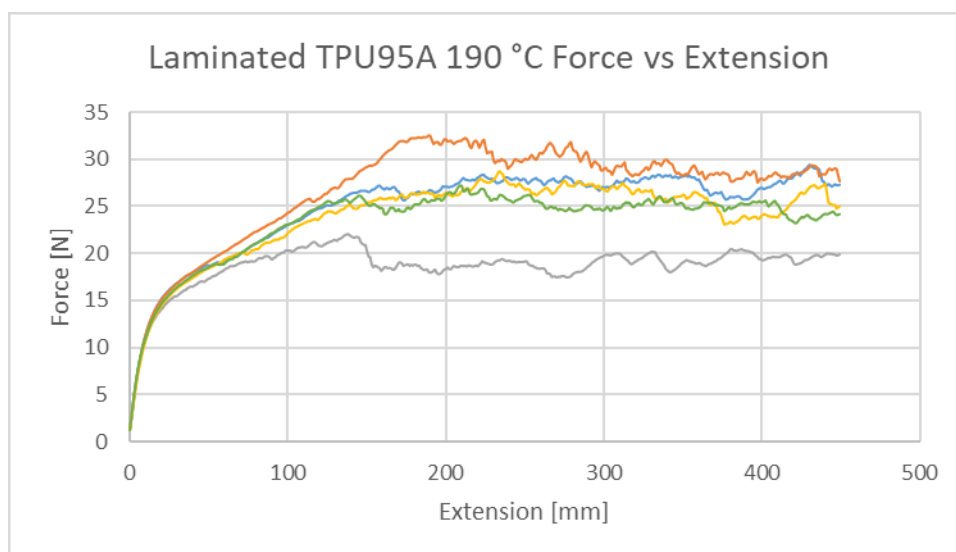
### TPU 170C

		Max N	Max mm	Max bond strength				
sample 1	peeled	16,24	377	0,65				
sample 2	peeled	14,88	354,5	0,60				
sample 3	peeled	14,3	306	0,58				
sample 4	peeled	14,65	394	0,59				
sample 5	peeled	15,54	204	0,63				
AV		15,1						
FORCES:					BOND STRENGHT:			
		broke at t	snapped	peeled		broke at t	snapped	peeled
AV				15,1	AV			0,61
MAX				16,2	MAX			0,65
MIN				14,3	MIN			0,58
AV-MIN				0,8	AV-MIN			0,03
MAX-AV				1,1	MAX-AV			0,04



### TPU 190C

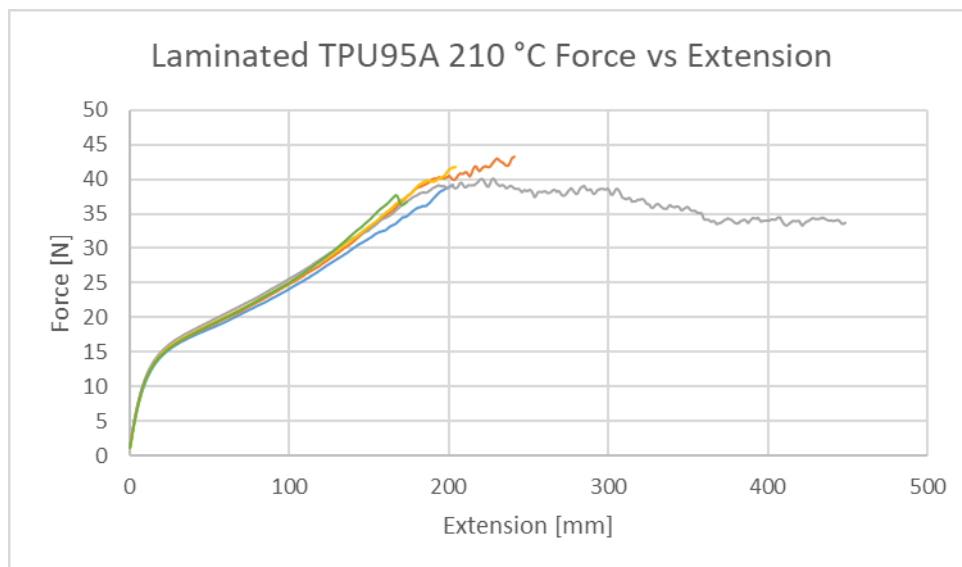
		Max N	Max mm	Max bond strength					
sample 1	peeled	29,36	430	1,17					
sample 2	peeled	32,6	189	1,30					
sample 3	peeled	22,08	138	0,89					
sample 4	peeled	28,76	234	1,16					
sample 5	peeled	27,2	209	1,08					
AV		28,0							
FORCES:						BOND STRENGTH:			
		broke at t/s	snapped	peeled			broke at t/s	snapped	peeled
AV				28,0	AV				1,12
MAX				32,6	MAX				1,30
MIN				22,1	MIN				0,89
AV-MIN				5,9	AV-MIN				0,23
MAX-AV				4,6	MAX-AV				0,18





## TPU 210C

		Max N	Max mm	Max bond strength					
sample 1	snapped	39,12	202,5	1,55					
sample 2	snapped	43,25	240,8	1,72					
sample 3	peeled	40,2	228	1,60					
sample 4	snapped	41,7	203,5	1,65					
sample 5	snapped	37,76	167	1,51					
AV		40,4							
FORCES:					BOND STRENGHT:				
		broke at t	snapped	peeled	all		broke at t	snapped	peeled
AV			40,5	40,2	40,4	AV		1,61	1,60
MAX			43,3		43,3	MAX		1,72	
MIN			37,8		37,8	MIN		1,51	
AV-MIN			2,7		2,6	AV-MIN		0,10	
MAX-AV			2,8		2,8	MAX-AV		0,11	



Vertailut

