Tampereen yliopisto

Oskari Niemi

3D-TULOSTETUN TERMOPLASTISEN POLYURETAANIN KÄYTTÖ KANTAVISSA RAKENTEISSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Tarkastaja: Joe David
Syyskuu 2025

TIIVISTELMÄ

Oskari Niemi: 3D-tulostetun termoplastisen polyuretaanin käyttö kantavissa rakenteissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Syyskuu 2025

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan 3D-tulostetun termoplastisen polyuretaanin (TPU) soveltuvuutta kantaviin rakenteisiin kuluttajatason FFF/FDM-ympäristössä. Katsaus kuvaa TPU:n rakenteen (kovat ja pehmeät segmentit), sen vahvuudet (murtovenymä ja iskunkestävyys), ja rajoitteet (käyttölämpötila <70 °C).

Tärkeimmiksi huomioiksi nousi FDM-tulostukselle tyypillinen anisotropinen käyttäytyminen, ja sen huomioiminen materiaalikohtaisesti suunnittelussa. Osittaiseksi ratkaisuksi anisotropiaongelmaan ehdotetaan lämpökäsittelyä. Prosessi vähentää mekaanisia ominaisuuksia heikentävää huokoista rakennetta, joka johtuu käsiteltävästä valmistusmenetelmästä.

TPU:n tulostus ei ole mahdollista kaikilla tulostimilla, mutta yhteensopivuus harrastajien hintaluokassa on parantunut 2020-luvulla. TPU:n tulostusta käsitellään katsauksessa pintapuolisesti, mutta tulostin- ja materiaalikohtainen käyttäytyminen tekevät siitä käyttäjän iteratiivisen prosessin.

Johtopäätöksenä 3D-tulostettu TPU soveltuu käytettäväksi kantavissa rakenteissa tietyissä olosuhteissa. Käyttöä voidaan harkita, jos käyttölämpötilat ovat matalia, sarjat pieniä ja geometriassa saadaan hyödynnettyä 3D-tulostuksen valmistusteknisiä vahvuuksia. Rakenteen murtuminen ei kuitenkaan saisi aiheuttaa vaaratilannetta.

Avainsanat: 3D-tulostus; termoplastinen polyuretaani; TPU; kantavat rakenteet; anisotropia; lämpökäsittely; monimateriaalitulostus.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Oskari Niemi: The use of 3D-printed thermoplastic polyurethane in load-bearing structures
Bachelor´s Thesis
Tampere University
Mechanical Engineering
September 2025

This literature review examines the suitability of 3D-printed thermoplastic polyurethane (TPU) for load-bearing structures in consumer-grade FFF/FDM environments. The review outlines the structure of TPU (hard and soft segments), its strengths (elongation at break and impact resistance), and its limitations (operating temperature <70 °C).

A key observation is the anisotropic behaviour typical of FDM printing, which must be considered in material-specific design. As a partial solution to the anisotropy issue, thermal post-processing is proposed. This process reduces the porous structure that weakens mechanical properties, a result of the manufacturing method in question.

TPU printing is not feasible with all printers, but compatibility within hobbyist price ranges has improved in the 2020s. The review outlines TPU printing, but printer- and material-specific behaviour makes it an iterative process for the user.

In conclusion, 3D-printed TPU is suitable for use in load-bearing structures under certain conditions. Its use may be considered if operating temperatures are low, production runs are small, and the geometry allows for leveraging the manufacturing strengths of 3D printing. However, structural failure must not pose a safety risk.

Keywords: 3D printing; thermoplastic polyurethane; TPU; load-bearing structures; anisotropy; heat treatment; multi-material printing.

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

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Scopus AI, Chatgpt 4o/5, Microsoft Copilot

Käyttötarkoitus:
Eniten työssä käytettiin Scopus AI:ta lähteiden (~10) hakuun. Dokumenteista hakemiseen käytin selaimessa toimivaa Microsoftin Copilot sovellusta. Chatgpt ja Copilot auttoivat joissain sanojen kääntämisissä. Tiivistelmän englanninkielinen käännös on tehty Chatgpt 5 tekoälyllä ja sen jälkeen tarkastettu. Lähdeluettelo on tehty sekalaisesta versiosta melkein valmiiksi Chatgpt 5 tekoälyllä ja sen jälkeen tarkastettu ja korjattu.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty:

Abstact ja lähdeluettelo

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopistossa Konetekniikan tutkinto-ohjelmassa kevään ja kesän 2025 aikana. Prosessi opetti hyvin akateemista kirjoittamista ja tiedonhakua. Aihe oli myös mielenkiintoinen ja olen päässyt hyödyntämään kertynyttä tietotaitoa 3D-tulostaessa jo kurssin aikana.

Lämpimät kiitokset ohjaajalleni Joe Davidille hyvistä ohjaustilaisuuksista ja tuesta kurssin aikana. Tampereen yliopiston tarjoamat resurssit, kuten kirjaston palvelut, olivat myös välttämättömiä työn toteutumisen kannalta. Haluan myös kiittää Heta Polvista työn viimeistelyyn tarvituista neuvoista.

Tampereella, 8.9.2025

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. TPU 3
2.1 TPU:n sisäinen rakenne 3
2.2 TPU:n 3D-tulostus 3
3. MEKAANISET OMINAISUUDET 5
3.1 Anisotropia ja valmistusvirheet 6
3.2 Jännitys ja venymä 7
3.3 Kovuus ja iskunkestävyys 8
3.4 Kuormituskestävyys 9
3.5 Käyttölämpötila ja lämpökäsittely 10
4. TPU:N KÄYTTÖ 14
4.1 TPU monimateriaalitulostuksessa 14
4.2 Kemiallinen kestävyys 16
4.3 Tähän mennessä käytetty 16
4.4 Tulevaisuuden mahdollisuudet 17
5. YHTEENVETO 19
LÄHTEET 20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	Kolmiulotteinen
AM	Additive Manufacturing, lisäävä valmistus
AMS	Automaattinen materiaalijärjestelmä
BE	Bowden ekstruusio (Syöttöruuvi rungossa)
DE	Direct ekstruusio (Syöttöruuvi tulostuspäässä)
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HF	High Flow
IM	Injection Moulding, ruiskuvalu
MJF	Multi-Jet Fusion
NPP	Non-Planar Printing
Overhang	Kappaleen osa, joka ei ole alhaalta tuettu
PC	Polykarbonaatti
PETG	Polyeteeni tefralaatti glykoli
PLA	Polylaktidi
Shore A/D	Elastomeerien kovuusasteikot
Slicer	Viipalointisovellus (stl / step >> g-koodi)
SLS	Selective Laser Sintering
Tg	Lasisiirtymälämpötila
Tm	Sulamispiste
TPE	Termoplastinen elastomeeri
TPU	Termoplastinen polyuretaani
σ	jännitys (sigma)
ε	venymä (epsilon)
ε_r	jäännösvenymä (epsilon r)

1. JOHDANTO

TPU:t eli termoplastiset polyuretaanit ovat elastisia polymeerejä ja ne kehitettiin 1950-luvulla. Ne yhdistävät kumin mekaaniset ominaisuudet ja muovien helpon muokattavuuden. [1] Niiden keskeisimpiä ominaisuuksia ovat kulumis- ja iskunkestävyys, sekä iso murtovenymä. Ne ovat termoplasteja eli kestomuoveja ja täten uudelleenmuokattavissa lämmittämällä [2].

3D-tulostus on lisäävää valmistusta eli AM-tekniikka (Additive Manufacturing), joka on käytössä kansainväliseltä avaruusasemalta harrastajien makuuhuoneisiin [3]. Se kattaa useita toisistaan poikkeavia teknologioita, joita yhdistää vain materiaalin lisääminen halutun kolmiulotteisen muodon saamiseksi.

3D-tulostamisen mahdollisuudet lisääntyvät teknologioiden kehittyessä, ja varsinkin kuluttajien budjetteihin ja olosuhteisiin soveltuvissa laitteissa on tapahtunut huomattavaa kehitystä 2020-luvulla. Bambu Lab julkaisi vuonna 2022 X1-printterin ja se voitti Time Magazinen Vuoden keksintö -palkinnon [4] ja asetti uuden standardin kuluttajien 3D-tulostimiin. Tämän jälkeen moni valmistaja on julkaissut sille kilpailijan ja kuluttajien budjettiin, ja olosuhteisiin soveltuvat laitteet ovat ottaneet ison kehitysaskeleen. Erityisesti kuluttajaystävällisyys on parantunut. Nyt suljetut tulostimet, jotka kykenevät luotettavasti tulostamaan edistyneitä materiaaleja, kuten nylon, Polykarbonaatti (PC), sekä TPU ovat Euroopassa halvimmillaan enää alle 450 €. [5, 6, katsottu 8/2025] Uusimpana keskustelun aiheena alalla on merkittävän summan kerännyt (12,5M $, 26.8.2025) Snapmakerin U1 Kickstarter, jonka tavoitteena on kehittää monimateriaalitulostukseen 999 $ (749 $ kickstarter) tulostuspäätä vaihtava printteri. [7]

Nyt, kun monen ammattilaisen ja erityisesti harrastajan valmistustekniset mahdollisuudet ovat ottaneet ison harppauksen, on seuraava askel materiaaliteknisen tietotaidon kerryttäminen. Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoite on viedä lukija askeleen lähemmäs TPU:n ja sen 3D-tulostamisen rajojen ymmärtämistä. Tarkemmin tavoitteena on selvittää, miten 3D-tulostettua TPU:ta voitaisiin hyödyntää kantavissa rakenteissa. Kyseisissä paikoissa muovi ei yleisesti ole toimivin ratkaisu, mutta 3D-tulostuksen antamat valmistustekniset edut tekevät siitä vähintään tutkimisen arvoista. Aihetta käsitellään muovin tulostukseen suotuisan Fused Filament Fabrication (FFF),

toiselta nimeltään Fused Deposition Modeling (FDM), 3D-tulostustekniikan näkökulmasta. Pääpainona kuitenkin kuluttajille suunnitellut laitteet.

Aineistossa esiintyy paljon vertaisarvioimattomia lähteitä. Tiedon luotettavuutta on harkittu, ja lähteen laatu on tuotu esille. Aineiston valintaan vaikutti näkökulman ja alan harrastajakeskeisyys. Tämä johti esimerkiksi moneen valmistajan tarjoaman teknisen tiedon käyttöön. Kriittisissä kohdissa on käytetty vertaisarvioituja lähteitä. Vertaisarvioidut lähteet on pääasiassa haettu tiivistelmän lopussa esiintyvillä avainsanoilla Andorista tai Scopus AI:lla.

2. TPU

TPU on termoplastinen eli kestomuovi, joten sitä voi uudelleen sulattaa ja muovata. Se kuuluu termoplastisiin elastomeereihin (TPE) [8]. TPU voi olla polyesteri-, polyeetteri- tai polykaprolaktonipohjaista (PCL). FDM-tulostuksessa polyesteripohjainen on yleisin. [9-11]

2.1 TPU:n sisäinen rakenne

TPU on mikrorakenteeltaan heterogeeninen, ja se koostuu kovista kiteisistä ja pehmeistä amorfisista segmenteistä. Pehmeät segmentit ovat huoneenlämmössä lasisiirtymälämpötilansa (Tg) yläpuolella, ja kovat segmentit puolestaan niiden Tg alapuolella. Kovat segmentit ovat ainakin osittain erillään matriisissa muodostaen väleilleen vetysidoksia, jotka vaikuttavat olennaisesti materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Kovat segmentit ovat kooltaan 3-10nm polyesteripohjaisissa ja 5-10nm polyeetteripohjaisissa versioissa. [12] TPU:n kovuus on verrannollinen sen kovien ja pehmeiden segmenttien suhteeseen ja korkeampi kovuus korreloi paremman kulumis- ja iskunkestävyyden kanssa [13]. H.J. Qin ja M.C. Boycen tutkimuksessa TPU (shore 94A) suhteet olivat 57 % pehmeää ja 43 % kovaa segmenttiä [12].

2.2 TPU:n 3D-tulostus

TPU:n suurin vahvuus, eli sen joustavuus on myös sen isoin haaste 3D-tulostuksessa ja se sulkee osan laitteista pois, varsinkin pehmeämpien versioiden kanssa. Vaikka TPU:n tulostus on helpottunut materiaalitekniikan ja laitteiden kehityksen myötä, on se edelleen yksi vaikeimmista materiaaleista tulostaa.

TPU tarvitsee suorasyötön (DE, direct extrusion), eli filamenttia työntävän mekanismin suoraan liikkuvaan tulostuspäähän, ja mahdollisimman lyhyen reitin rullalta suuttimelle kitkan minimoimiseksi. DE-systeemeissä ekstruuderi vetää filamenttia bowden-putkea pitkin rullalta jättäen filamenttia työnnettävän matkan lyhyeksi. Ekstruuderin lämpenemistä tulee välttää, sillä se puristaa filamenttia ja lämpeneminen saattaa pehmentää TPU-filamenttia liikaa tasaisen syötön mahdollistamiseksi. Esimerkiksi tulostimen pitäminen suljetussa kaapissa voi aiheuttaa kyseistä ylikuumenemisongelmaa.

DE-menetelmän vaihtoehtona on Bowden-ekstruusio (BE), jossa filamenttia työntävä ekstruuderi on jossain rullan ja tulostuspään välissä paikallaan ja ekstruuderin ja tulostuspään välissä on Bowden-putki. Ekstruuderin siirtäminen pois liikkuvasta tulostuspäästä tekee siitä kevyemmän, mutta estää taipuisien (flex) filamenttien käytön.

DE:n lisäksi materiaalivalmistajat suosittelevat TPU:n tulostamiseen lämmitettyä tulostusalustaa, ja vähintään 0,4 mm suutinta. Tulostusnopeuksiksi suositellaan monessa tapauksessa kohtuullisen matalia 40-147 mm/s, riippuen tulostuslämpötilasta ja TPU:sta. [14-16] Suositeltu tulostusnopeus näyttäisi korreloivan kovuuden kanssa ja Bambu Labin kovimmalle (68D) TPU:lle luvataan jopa 238 mm/s [17]. Vertailukohteena yleisen Bambu Labin PLA suositus tulostusnopeus on < 300 mm/s [18]. Tulostusnopeuksien lisäksi rajoittavan tekijänä voi olla virtausnopeus (mm^$3/s$). Varsinkin isommilla suuttimilla ja kerroskorkeuksilla virtausnopeus muuttuu rajoittavaksi tekijäksi, ja tulee huomioida sliceria käyttäessä.

TPU on hygroskooppinen, eli vettä sitova materiaali. Tämän takia materiaalin kuivaaminen ennen käyttöä on erityisen tärkeää parhaan lopputuloksen saamiseksi. [14-17] Suuttimessa vesi höyrystyy ja sen aiheuttamat paineen muutokset tekevät pursotuksesta epätasaista ja laitteen g-koodista (tulostimen ohjeet) poikkeavaa. Paineen muutokset myös estävät muovin pursotuksen lopettamisen viivan päässä ja ylimääräinen suuttimesta poistuva muovi päätyy väärään paikkaan ja aiheuttaa tulostuksen epäonnistumisen tai kosmeettisia vikoja, kuten TPU:lle tyypillinen stringing. Todella märkänä tulostettu TPU on usein silmämääräisesti hieman huokoista ja täynnä virheitä, mikäli tulostus onnistuu ollenkaan.

FDM ei ole ainut tulostustekniikka, joka on suotuisa TPU-tulostukseen. Myös selective laser sintering (SLS) ja multi-jet fusion (MJF) soveltuvat. SLS sulattaa TPU-jauheen laserilla kerros kerrokselta mahdollistaen monimutkaiset muodot ilman tukimateriaalia (supports). Toisin sanottuna kovettamaton jauhe toimii tukena. MJF puolestaan käyttää mustesuihkutusta ja infrapunalämmitystä jauheen sulattamiseen. [11]

Tästä eteenpäin tutkielmassa TPU viittaa 3D-tulostettuihin kappaleisiin, ellei erikseen toisin mainita. 3D-tulostetun rakenteen erotteleminen muista muovin muotoiluun käytetyistä menetelmistä kuten ruiskuvalu (IM) ja lämpöprässäys, on tärkeää, kun puhutaan sen mekaanisista ominaisuuksista.

3. MEKAANISET OMINAISUUDET

TPU on seos ja materiaaliperhe. Tämä tekee sen mekaanisten ominaisuuksien tarkastelusta yleisesti hyvin ympäripyöreää. Kirjallisuuskatsauksen laajuuden ja käytettävyyden puitteissa valitaan tarkempaan tarkasteluun Bambu Labin TPU valikoima, Sunlun TPU (95A) ja Fiberlogyn Fiberflex 40D. Olen itse tutustunut TPU:n tulostamiseen Bambu Labin filamenteilla. Valintoihin vaikutti myös filamenttien yleisyys ja valmistajiin harrastajien keskuudessa muodostunut luottamus. Kaikki kyseisten filamenttien tekniset ominaisuudet ovat valmistajien tarjoamasta, standardien mukaan tehdystä raportista, joten niihin tulee eturistiriidan takia suhtautua suuntaa antavina.

Tulostusparametrit vaikuttavat TPU:n mekaanisiin ominaisuuksiin suuresti. Ajatellaan parametrien jakautuvan kahteen kategoriaan. Ensimmäiseen kategoriaan sellaiset, jotka vaikuttavat lähtökohtaisesti samalla tavalla kaikissa filamenteissa ja riippumatta suuresti tulostimesta. Näitä ovat esimerkiksi täyttöprosentti, täyttökuvio, tulostusorientaatio, kerroskorkeus, viivanleveys ja seinien määrä. Näiden vaikutus on lujuusopin periaatteiden näkökulmasta suhteellisen triviaalia ja tilanteeseen sopivat parametrit ovat löydettävissä valmistusmenetelmän mahdollistamalla iteratiivisella prosessilla nopeasti. Toinen kategoria sisältää materiaalikohtaisia tulostusparametreja kuten tulostusnopeudet, tuulettimien nopeudet, virtaussuhde (flow ratio), kerrosaika, sekä suutimen, tulostusalustan ja kammion lämpötilat. Näihin parametreihin löytyy materiaalivalmistajalta viitearvoja, mutta todellisuudessa sopivat arvot ovat tulostinkohtaisia ja tilanteeseen optimaalisten arvojen löytäminen vaatii runsasta tietotaitoa ja tietenkin kokeilua. Jopa tulostimen ympäristö voi vaikuttaa erityisesti jäähdytyksen asetuksiin. Näiden lisäksi slicereista löytyy paljon pääasiassa kosmeettisiin ominaisuuksiin vaikuttavia asetuksia, mutta ne voivat yksittäistapauksissa tulostusvirheiden kautta vaikuttaa mekaanisiin ominaisuuksiin.

Jos vertaillaan makrorakenteeltaan identtisiä kappaleita, huomataan nopeasti 3D-tulostettujen kappaleiden ehkä suurin heikkous verrattuna ruiskuvalettuihin ja kuumapuristettuihin kappaleisiin eli huonommat ja anisotropiset mekaaniset ominaisuudet. Jos tarkastellaan lähempää, huomataan mistä ero johtuu.

3.1 Anisotropia ja valmistusvirheet

Anisotropisissa (toisin kuin isotropisissa) kappaleissa ominaisuudet riippuvat tarkastelusuunnasta. 3D-tulostuksessa anisotropista käyttäytymistä aiheuttaa erityisesti kerrosten huono kiinnittyminen toisiinsa, ja osaltaan täyttökuvio. [19, 20]

TPU:lla on todella vaihteleva kerrosten välinen tarttuvuus. Tätä voidaan havainnollistaa tarkastelemalla x-y- ja z- murtolujuuksien eroja:

Materiaali	Murtolujuus X-Y (MPa)	Murtolujuus Z (MPa)
Bambu lab TPU for AMS	22.4 ± 0.6	11.2 ± 0.5
Bambu lab TPU 95A HF	27.3 ± 0.8	22.3 ± 0.6
Bambu lab TPU 90A	12.5 ± 0.8	10.1 ± 0.6
Fiberlogy Fiberflex 40D (91A)	28	-
Sunlu TPU (95A)	34.4	-
TPU 1185A 3D-tulostettu [21]	15	7
TPU 1185A Lämpöpuristettu [21]	50	-
TPU 1185A Elastollan@ IM [22]	45	-
TPU 1185A Elastollan@ IM [23]	35	-

Taulukko 1. TPU:n murtolujuuksia [14-17, 21-24]

TPU for AMS (68D) kohdalla z-suuntainen murtolujuus on noin puolet pienempi kuin x-y-suunnassa, mutta TPU 95A kohdalla ero on alle 20%. Anisotropia siis vaihtelee vahvasti laatujen välillä. Taulukkoon 1 on myös valittu kolmesta lähteestä TPU 1185A murtolujuus havainnollistamaan 3D-tulostuksen aiheuttamaa mekaanista heikkoutta. Huomioitavaa on myös testitulosten erot saman valmistajan materiaalin kesken.

Tasoittain eteneminen johtaa myös pursotuksen virheiden (yliekstruusio, aliekstruusio) mahdolliseen keskittymiseen samoille tasoille. Lyhytkestoiset ongelmat pursotuksessa, kuten syöttömekanismin luistaminen, voivat aiheuttaa aliekstruusiota. Aliekstruusiossa tulostin pursottaa materiaalia liian vähän, tai pahimmillaan ei

ollenkaan heikentäen z-suuntaista murtolujuuksia merkittävästi. Lisäksi nämä virheet voivat olla mahdottomia nähdä jälkeenpäin silmämääräisesti, koska kappaleen (tason) reunat voivat tulostua virheettömästi, piilottaen samalla sisäiset virheet.

Kun kappaleita tehdään kerroksittain, ne myös jäähtyvät kerroksittain. Vaikka käytettäisiin suljettua ja aktiivisesti lämmitettyä tulostustilaa, muodostuu kappaleisiin lämpötilaeroja. Monessa materiaalissa tapahtuu jäähtyessä lämpösupistumista ja voimakas muodonmuutos kesken tulostuksen voi aiheuttaa sisäisiä jännityksiä, joka puolestaan voi lisätä anisotropista käyttäytymistä. Sisäisten jännitysten ehkäisemiseksi tulostusalustan lämpötila tulee olla tarpeeksi korkealla ja tulostusnopeuden (mm/s) tarpeeksi matala. [21]

3.2 Jännitys ja venymä

TPU:n jännitys-venymäkäyrästä on havaittavissa selkeä epälineaarinen käytös. H.J Qin ja M.C Boycen jännitys-venymätutkimuksessa havaittiin TPU:n (shore 94A) käyttäytyvän jäykemmin noin $\varepsilon = 0.15$ asti, jonka jälkeen se pehmeni, kunnes venymä saavutti $\varepsilon = 0.70$ ja materiaali alkoi jäykistyä. Venytys tehtiin hitaasti ja suurin venymä $\varepsilon = 1.0$ saavutettiin noin 16 MPa. [12]

Sen käyttäytymisessä esiintyy myös huomattavaa hystereesiä eli jännitys-venymäkäyrä palautuu eri reittiä. Kun jännitystä aletaan purkamaan, venymä muuttuu aluksi suhteessa vähemmän, kuin venytyksessä. Tätä selittää kovissa segmenteissä tapahtuva muodonmuutos. [12]

Jännitys-venymäkokeissa havaittiin myös runsasta aikariippuvuutta. Jos kuormitus ja purkaminen tehdään portaittain, TPU osoittaa aikariippuvuuden joko jännitysvasteessa (jännitys rentoutuu, kun venymä pidetään vakiona) tai venymävasteessa (venymä kasvaa, kun jännitys pidetään vakiona). 50 % jännityksen rentoutumisesta tapahtui ensimmäisen 2-5 sekunnin aikana. [12]

Aikariippuvuutta havainnollisti myös koe, jossa venytyksen nopeutta muutettiin ($\varepsilon = 0.01 \cdot s^{-1}$, $\varepsilon = 0.05 \cdot s^{-1}$, $\varepsilon = 0.1 \cdot s^{-1}$) ja venytys tehtiin $\varepsilon = 1.0$ asti. Hieman epäintuitiivisesti jäännösvenymä jäi nopeimmalla venytyksellä ($\varepsilon_r = 0.043$) noin 30 % pienemmäksi verrattuna hitaimpaan ($\varepsilon_r = 0.062$), vaikka nopeimmassa kokeessa jännitys oli koko venytyksen korkein. Tämä osoittaa plastisen muodonmuutoksen tarvitsevan aikaa. [12]

3D-tulostettu TPU voi venyä satoja prosentteja ennen murtumaa x-y-suunnassa. Arvot heittelevät paljon, eikä niillä näytä olevan selkeää yhteyttä kovuuteen tai murtolujuuteen. Fiberflex 40D tiedoissa ilmoitetaan murtovenymäksi 700 % (28MPa) ja

50 % venymälle 9MPa [24]. Sunlun TPU:n (95A) ilmoitetaan venyvän jopa 1063 % (34.4MPa) [16]. Bambu Lab ilmoittaa kaikille kolmelle TPU vaihtoehdolleen > 650 % murtovenymän. Z-suuntaisen murtovenymän ilmoitti vain Bambu Lab: TPU for AMS (31 %), TPU 90A (> 350 %) ja TPU 95A (> 480 %). [14, 15, 17]

Materiaaleista löytyy hyvin teknisiä tietoja, ja moni valmistaja näyttää käyttävän samaa pohjaa koko valikoimalleen. Sama pohja toimii monen muun materiaalin kanssa, koska ominaisuudet ovat hyvin samanlaisia ja johdonmukaisuus helpottaa vertailua. TPU:n tapauksessa tiedot ovat puutteelliset hyvän kuvan saamiseksi. Mainituista filamenteista ainoastaan Fiberflexin tiedoissa annettiin pienemmille venymille jännityksen arvot: 5 % 2MPa, 10 % 4MPa, 50 % 9MPa. Sen tiedoista kuitenkin puuttui z-suuntainen murtolujuus. [24] Puutteelliset tiedot vaikeuttavat materiaalin käyttöä vaativammissa tapauksissa, kuten kantavissa ja syklistä kuormaa kestävissä rakenteissa.

3.3 Kovuus ja iskunkestävyys

Elastomeerien kovuus ilmoitetaan yleensä Shore A tai Shore D arvoilla. A ja D ovat eri asteikkoja, ja niiden mittausasetelmat poikkeavat [25]. Niillä on päällekkäisyyttä ja monet 3D-tulostukseen soveltuvat TPU:t osuvat sille välille, mikä johtaa vaikeuksiin materiaalien vertailussa. A asteikko alkaa kovuudelta alempaa ja molemmissa asteikoissa se kasvaa ilmoitettavan numeron (0-100) mukaan.

TPU:n kovuus vaihtelee tyypillisesti 40-98 Shore A välillä [26,27] ja 3D-tulostuksessa tyypillisimpiä ovat 85-95A. Pehmeämmät filamentit ovat vaikeita ekstruudata luotettavasti. Pehmein markkinoilta löytyvä filamentti on 60A [28] ja kovin 75D (>100A) [29], mutta vastaavia ei löytynyt vertaisarvioiduista tutkimuksista. Fiberlogyn Fiberflexille on ilmoitettu kovuudeksi shore 40D ja shore 91A [24]. Elastollanin TPU 1185A kovuudeksi ilmoitettiin shore 36D ja shore 87A [22].

TPU:n kovuus voi myös muuttua hieman tulostuksen jälkeen, vaikka se olisi vain varasto-olosuhteissa. H.J. Qin ja M.C. Boycen tutkimuksessa kovuus oli kasvanut 92A vuodessa 94A. [12]

Iskunkestävyys on TPU:n yksi erottuvimpia ominaisuuksia. Verrataan Bambu Labin materiaalivalikoimasta:

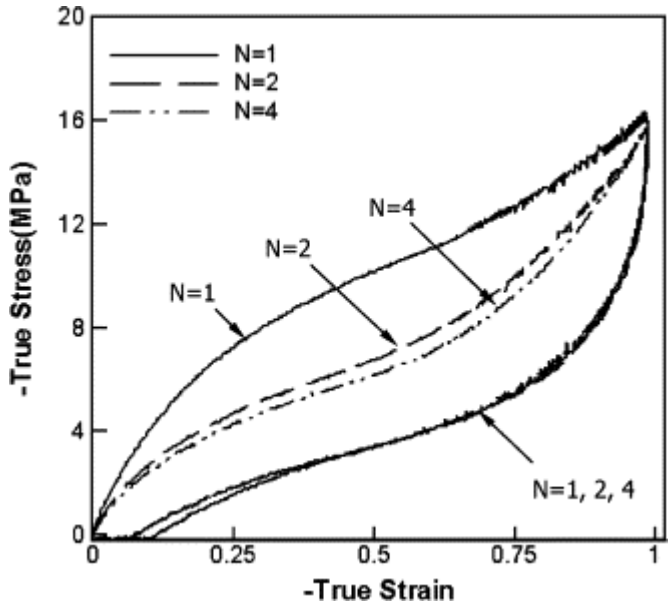
Materiaali	Iskulujuus x-y (kJ/m2)	Iskulujuus z (kJ/m2)
TPU for AMS (68D)	124.3	9.6 ± 0.3
TPU 95A HF	123.2	86.3
PLA	26.6 ± 2.8 Lovitettu: 7.9 ± 1.2	13.8 ± 0.9
ABS	39.3 +- 3.6 Lovitettu: 21.5 ± 2.2	7.4 ± 1.2
PETG HF	31.5 +- 2.2 Lovitettu: 6.2 ± 1.8	10.6 ± 1.2
PC	34.8 ± 2.1 Lovitettu: 7.5 ± 1.3	9.0 ± 0.4

Taulukko 2. Bambu Labin filamenttien iskulujuuksia. [14, 15, 18, 30-32]

Taulukosta 2 voidaan havaita TPU:n huomattava iskulujuus x-y-suunnassa. Z-suunnassa TPU-filamenteissa on puolestaan merkittävä poikkeavuus. TPU for AMS-filamentin huonompi z-suuntainen iskulujuus johtuu samasta ilmiöstä, kuin taulukon 1 heikko murtolujuus, eli huonosta kerrosten välisestä liitoksesta. Tämä ennakoi merkittävää anisotropista käyttäytymistä, jonka huomioiminen suunnittelussa on tärkeää.

3.4 Kuormituskestävyys

Kuormituskestävyys viittaa materiaalin kykyyn vastustaa väsymistä ja ryömimistä. Väsyminen tarkoittaa materiaalin rakenteellisten ominaisuuksien heikkenemistä pitkäaikaisen vaihtelevan kuormituksen seurauksena. Vaikka hetkellinen jännitys ei ylittäisi materiaalin myötörajaa, se voi aiheuttaa pieniä pysyviä muodonmuutoksia TPU-matriisiin ja toistettaessa muutokset voivat kasvaa. Lopulta materiaalin kestävyys heikkenee ja se voi murtua. Pysyvät muutokset aiheuttavat myös jäännösvenymää. Ilmiötä, jossa materiaaliin tulee pysyvää muodonmuutosta staattisen kuormituksen vaikutuksesta, kutsutaan puolestaan ryömimiseksi. TPU on myös muovien tapaan altis ryömimiselle, mutta aiheesta on selkeä tutkimusaukko.



Kuva 1. TPU:n jännitys-venymäkäyrä. [12]

Syklisessä kuormituksessa huomataan TPU:n segmenttirakenteen muuttuvan ensimmäisten syklien aikana. Kuvasta 1 nähdään jännitys-venymäkäyrän kuormitusvaiheen muutos. Tämä havainnollistaa segmenttirakenteen muutoksia. Käyrä vakiintuu jo neljän syklin jälkeen, ja sen reitti määräytyy materiaalin aiemmin kokeman maksimijännityksen mukaan. Ilmiötä selittää kovien segmenttien plastinen muodonmuutos. Käyrät havainnollistavat myös hyvin TPU:n hystereesiä, eli kuinka kuormituksessa ja palautumisessa jännitys-venymäkäyrä ei kulje samaa reittiä. Tässä tapauksessa jännitys vähenee venymää nopeammin palautumisessa. Pehmenemisestä riippumatta palautuminen tapahtuu jäännösvenymää huomioimatta samaa reittiä mitatuilla sykleillä. [12]

3.5 Käyttölämpötila ja lämpökäsittely

TPU:n käyttölämpötilan alaraja määräytyy sen pehmeiden segmenttien Tg mukaan. Pehmeiden segmenttien tulee olla Tg yläpuolella (noin -40 °C, polyesteripohjainen), jotta materiaali ei muutu jäykäksi ja hauraaksi. Kovien segmenttien Tg on materiaalin sulamispisteessä. Gu et al. suorittamassa tutkimuksessa käytetyn TPU 1185A:n sulamispiste oli 190°C. [12, 21] Käyttölämpötilan yläraja tulee kuitenkin vastaan 50-70°C välillä, koska materiaali alkaa menettää jäykkyyttä. Lämpötilat vaihtelevat runsaasti ja niihin tulee perehtyä tapauskohtaisesti. Fiberflex 40D tapauksessa sulamispisteeksi ilmoitetaan 160°C ja lämpömuodonmuutoslämpötilaksi (@ 0.45MPa) 70°C. [20] Bambu Lab ilmoittaa TPU-filamenteilleen sulamislämpötiloiksi 180°C (90A) ja 183°C (95A HF, TPU for AMS). Filamenteista ei valitettavasti ilmoiteta

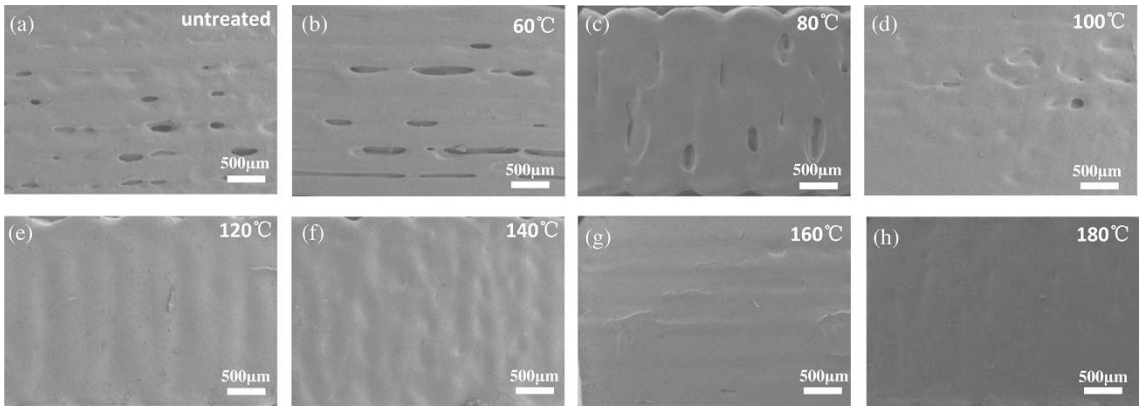
lämpömuodonmuutoslämpöjä, jotka olisivat todella olennaisia kantavien rakenteiden suunnittelun kannalta. [14, 15, 17]

Monen 3D-tulostuksessa käytettävän materiaalin mekaaniset ominaisuudet paranevat lämpökäsittelyllä. Lämpökäsittelyssä valmista kappaletta pidetään korkeassa lämpötilassa, ja sen annetaan jäähtyä hitaasti. Prosessissa kappaleen virheet, kuten huokoinen rakenne, vähenevät ja erityisesti kerrosten välinen liitos paranee. Gu et al. suorittamassa tutkimuksessa TPU 1185A:sta tulostettuja kappaleita lämpökäsiteltiin 10 tunnin ajan eri lämpötiloissa ja vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin tutkittiin. Kontrollina toimivat kappaleet, joita ei lämpökäsitelty. Vertailukohteena käytettiin samasta materiaalista lämpöpuristettuja kappaleita. Niiden muutokset lämpökäsittelystä jäivät pienemmiksi yhtenäisemmän mikrorakenteen takia. [21]

	Murtolujuus x-y	Murtolujuus z	Murtovenymä x-y	Murtovenymä z
Ei käsittelyä	15 MPa	7 MPa	1300 %	720 %
Lämpökäsitelty	25 MPa	14 MPa	1800 %	1260 %
Suhteellinen muutos	67 %	100 %	38 %	75 %

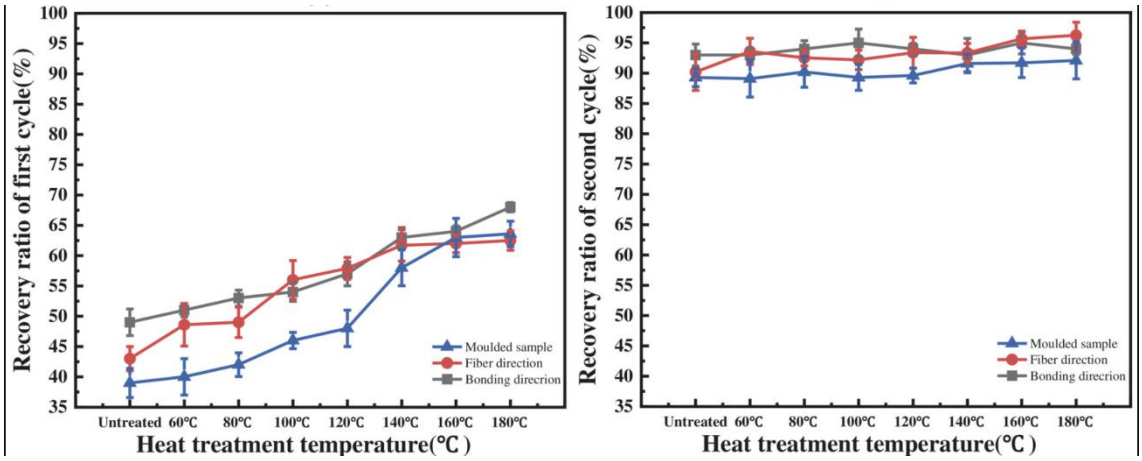
Taulukko 3. Lämpökäsittelyn (180°C, 10h) vaikutuksia TPU 1185A murtolujuuteen. [21]

Taulukosta 3 nähdään, kuinka tutkimuksen tehokkain lämpökäsittely vaikutti 3D-tulostettujen TPU 1185A-testikappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin. Lämpökäsittely paransi erityisesti kerrosten välistä (z) liitosta, joka nostaa jälleen esille 3D-tulostuksen anisotropiaongelmaa ja lämpökäsittelyä sen mahdollisen ratkaisuna. Lämpökäsittelyn saavuttamat ominaisuudet ovat vielä kaukana taulukossa 1 esiteltyjen lämpöpuristuksella (50 MPa) ja ruiskuvalulla (45 MPa ja 35 MPa) valmistettujen TPU 1185A-kappaleiden murtolujuuksista.



Kuva 2. TPU 1185A:n mikrorakenne eri lämpökäsittelyillä. [21]

Kuva havainnollistaa Gu et al. tutkimuksessa käytettyjen TPU 1185A-testikappaleiden mikrorakennetta, ja sen muutosta lämpökäsittelyllä. Kuvaus on suoritettu pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM). Kuvan vasemmassa yläkulmassa oleva lämpökäsittelemätön kontrollikappale kuvaa hyvin yleisesti FDM-tulostettujen kappaleiden keskeistä heikkoutta, eli huokoista rakennetta.



Kuva 3. Lämpökäsitellyn TPU:n jäännösvenymät ensimmäisen ja toisen syklin jälkeen. [21]

Kuvasta 3 nähdään lämpökäsittelyn yksi mielenkiintoisimmista vaikutuksista, eli muutos ensimmäisen syklin, mutta ei merkittävästi toisen syklin, aiheuttamassa jäännösvenymässä. Koe on tehty 500 % venytyksellä TPU 1185A:sta valmistetuille kappaleille, joiden ominaisuuksia esiteltiin aiemmin. Koe myös havainnollistaa aiemmin mainittua pääasiassa ensimmäisiin sykleihin keskittyvää jäännösvenymää.

Lämpökäsittely ei vaikuttanut olennaisesti kimmomoduuliin. Myös pienemmillä lämpötiloilla (≥ 100 °C) saatiin tuloksia kaikissa mainituissa kategorioissa, paitsi kimmomoduulissa. Muutoksissa oli positiivinen korrelaatio lämpötilaan. Kappaleista otetusta kuvasta 2 pystyi havaitsemaan selkeästi lämpökäsittelyn vaikutuksen reikäiseen kappaleeseen eri lämpötiloilla. [21]

Lämpökäsittelyn suurin ongelma on ironisesti lämpö. TPU menettää jäykkyyttään merkittävästi lämpötiloissa (≥ 100 °C), joissa sen lämpökäsittelyllä on huomattava vaikutus. Tämän takia monimutkaisemmat muodot, joissa on ulokkeita (overhang), tai alle 100 % täyttö, voivat osoittautua vaikeiksi lämpökäsitellä sellaisenaan. Gu et al. suorittamissa kokeissa lämpökäsittely tehtiin tasolla lepääville vetokoekappaleille, ja siksi “there were no significant changes in the shape” (ei ollut merkittäviä muutoksia muodossa). Ainoa näkyvä muodonmuutos tapahtui 200 °C (sulamispiste 190 °C) lämpökäsittelyllä. [21] Monimateriaalitulostus voi olla ratkaisuna ongelmaan, sillä se mahdollistaisi joissain tapauksissa kappaleen tukemisen kriittisistä kohdista lämpöä kestävämmällä materiaalilla. Materiaalien käyttö samassa tulostuksessa kuitenkin tuo esille uusia ongelmia.

4. TPU:N KÄYTTÖ

3D-tulostettujen kappaleiden käytössä on tärkeä muistaa myös se, mitä ei näe, eli niiden huokoinen rakenne. FFF/FDM-teknologialla tulostetuissa kappaleissa on aina pieniä reikiä. Huonompien mekaanisten ominaisuuksien lisäksi nämä reiät vaikeuttavat vesitiiviiden astioiden tekemistä ja tarjoavat kasvualustan bakteereille ja homeelle. Valmiiksi vesitiiviin astian valmistaminen TPU:sta ei ole mahdotonta, mutta valmistusprosessin aiheuttama pienien virheiden todennäköisyys tekee siitä epäkäytännöllistä. Ongelmia voi korjata pintakäsittelyllä, joka täyttää pinnan reiät, kuten maali- tai epoksihartsipinnoite. On kuitenkin tärkeää varmistaa pinnoitteen kemiallinen yhteensopivuus muovin kanssa. Toinen tapa on kemiallisesti sulattaa pinta sileäksi, mutta prosessi voi heikentää mittatarkkuutta tai poistaa piirteitä.

Muovien kilohinta nousee huomattavasti, kun ne muovataan IM ja muun massatuotannon käyttämistä rakeista filamentiksi, ja vain pieni osa on saatavilla filamenttina. Syitä rajatummalle materiaalivalikoimalle on tulostimien rajalliset lämpötilat ja filamenttien suhteessa pienet valmistusmäärät. Valmistusmäärä ja yksi valmistusvaihe enemmän nostavat kilohintaa. TPU-filamenttien tapauksessa valmistusmäärät eri laatujen välillä lisäävät vielä hinnan varianssia. Hinta siis vaihtelee 20-100€/kg välillä, mutta tyypillisesti yleisemmät musta 90A tai 95A maksavat 35 €/kg, eli hieman PLA:ta tai PETG:tä kalliimpaa. TPU:n kaltaisia ominaisuuksia ei luvata muissa saman hintaluokan, yleisesti verkkokaupoissa saatavilla olevista filamenteista. TPU on siis moneen tarkoitukseen pelkän hinnan takia ainut kuluttajien 3D-tulostettavissa oleva vaihtoehto, jos tarvitaan iskunkestävyyttä. Tämä voi kuitenkin muuttua filamenttien markkinan kasvaessa, ja uudehkon valikoiman kehittyessä.

4.1 TPU monimateriaalitulostuksessa

Monimateriaalitulostuksen laajeneminen kuluttajille ja siihen soveltuvien TPU-filamenttien kehittäminen on avannut uusia mahdollisuuksia. Samassa kappaleessa useiden eri TPU-laatujen ja värien käytön lisäksi monimateriaalitulostuksessa voidaan hyödyntää muita materiaaleja. Kaikkien materiaalien kanssa yhteensopivuus ei kuitenkaan ole yhtä hyvä tai edes mahdollinen. Liitosten kestävyyden lisäksi tarvitsee kiinnittää huomiota asetusten, kuten kammion lämpötilan, yhteensopivuuteen.

	PLA	ASA	ABS	PETG	Nylon 6
TPU	Ok	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Heikko

Taulukko 4. TPU:n yhteensopivuus muiden filamenttien kanssa [33-36]

Taulukosta 4 voidaan nähdä yleisimpien materiaalien yhteensopivuus TPU:n kanssa. Taulukkoon tulee kokeiden huonon vertailtavuuden takia suhtautua suuntaa antavana. Arvioidut liitokset oli tehty tulostamalla materiaalit päällekkäin, ja pohjamateriaalin pintaa ei käsitelty. Hyvä liitos ei kuitenkaan tarkoita, että oltaisiin lähellä edes heikomman materiaalin murtolujuutta. Esimerkiksi TPU/ASA -liitos (paras) kestää 6.4MPa [35] ja TPU/Nylon 6 -liitos kestää 0.84 MPa [36]. Tulostusjärjestyksen merkitys oli pieni ilman pintakäsittelyä. Muita materiaaleja juoksevampi TPU pääsi paremmin pohjamateriaalin rakoihin ja liitoksesta tuli hieman kestävämpi. Erilaiset pintakäsittelyt, kuten PLA:n pinnan aktivointi asetonilla, nostavat liitosten kestävyyttä merkittävästi. [34]

Mikäli kaksi ei-yhteensopivaa materiaalia on pakko saada samaan kappaleeseen, voidaan käyttää kolmatta molempiin tarttuvaa materiaalia ”liimana” välissä. Mekaaniset liitokset, esimerkiksi toiseen materiaaliin tunkeutuvat koukut, ovat myös mahdollisia. Aina materiaaleja ei myöskään pysty tulostamaan toistensa päälle. Joissain tapauksissa kosketuspintana ovat materiaalien seinät. Frenkel D et al. tutkimuksessa vertailtiin yhteensopivien TPU:n ja PETG:n viereen tulostamalla tehtyjä liitoksia. Tutkittavat “bioinspired”, eli biologian inspiroimat liitokset paransivat murtolujuutta jopa 202 %. Kosketuspinnassa kerroksia tulostettiin limittäin, mutta varsinaista mekaanista lukitusta ei muodostunut. [33] Tämä korostaa jälleen alakohtaisten suunnittelufilosofioiden tärkeyttä.

Monimateriaalitulostus on vaikeaa toteuttaa yhdellä suuttimella. Filamentin vaihto on luotettavaa ja nopeaa, jos käytetään automaattista materiaalijärjestelmää (AMS) eli filamentti vaihdetaan samaan suuttimeen. Ongelma on materiaalien sekoittuminen suuttimen sisällä ja ulkopinnalla. Värien kanssa vika on kosmeettinen, mutta eri materiaalien kohdalla saattaa ilmetä vakavampia ongelmia. Sain aiheesta oppimiskokemuksen, kun edellisen tulostuksen suuttimeen jäänyt TPU pilasi sille sopimattoman tulostusalustan tarttumalla jokseenkin pysyvästi pinnoitteeseen. Ratkaisuna ongelmaan on usean suuttimen käyttö. Se on toteutettu tähän mennessä usealla samaan aikaan toimivalla tulostuspäällä (idex), kahdella suuttimella samassa tulostuspäässä (Bambu Lab H2D) ja suuttimen vaihdolla (Prusa XL). Toimivin ja kallein (4299€) ratkaisu näistä on ollut Prusa XL:n käyttämä suuttimen vaihto. Hinta (4299€) viidellä tulostuspäällä ja kasattuna kuitenkin sulkee suurimman osan harrastajista pois.

Aiemmin mainittu (mahdollinen) 1000$ Snapmaker U1 ja Voron-alustalle tehdyt “tool changer”-lisäosat voivat viedä teknologian enemmän harrastajien ulottuviin, ja sitä kautta lisätä TPU:n käyttömahdollisuuksia.

4.2 Kemiallinen kestävyys

Muovien yhteydessä käyttöä rajoittaa useasti kemiallinen kestävyys. TPU:n kemiallinen yhteensopivuus vaihtelee suuresti eri aineiden kanssa. TPU kestää hyvin öljyjä, rasvoja ja useimpia hiilivetyjä. Se ei kuitenkaan kestä vahvoja happoja ja emäksiä, eikä halogenoituja liuottimia. [14-17]

Muovista valmistettavissa lopputuotteissa keskeinen ongelma on ultraviolettisäteilyn (UV) kestävyys. Muovien UV-kestävyys vaihtelee merkittävästi, ja TPU:n UV-kestävyys on ilman lisäaineita heikko. UV aiheuttaa altistuneeseen pintaan hapetusreaktion, joka johtaa kellastumiseen ja jopa pieniin halkeamiin. Erityisesti kulutuskestävyys kärsii. Lyhyt altistus heikentää mekaanisia ominaisuuksia hajottamalla polymeeriketjuja, mutta pidempi altistus voi aiheuttaa uusia kemiallisia sidoksia ja epäintuitiivisesti nostaa lujuutta. [37]

4.3 Tähän mennessä käytetty

TPU:ta on käytetty 3D-tulostuksen ulkopuolella laajasti iskuja vaimentavissa tuotteissa, kuten puhelimien suojakuorissa ja työkalujen kahvoissa. Sitä käytetään myös kaapelien suojakuorissa ja erilaisissa tiivisteissä, kuten O-renkaissa. TPU:n käyttö on yleistä, mutta sitä rajaa erityisesti sen matala käyttölämpötila.

Laadun ja nopeuden parantuessa 3D-tulostettuja lopputuotteita on alkanut ilmaantumaan markkinoille. Yksi TPU:n ominaisuuksista ja 3D-tulostuksen massaräätälöinnistä hyötyvä ala on kenkäteollisuus. Esimerkiksi Adidas valmistaa 4D-tuoteperheensä pohjalliset TPU:sta DLS-teknologialla [38] ja Zellerfeld tarjoaa FDM-tekniikalla tulostettuja mittatilauskenkiä, mutta eivät ole julkaisseet materiaalia [39]. Myös harrastajat ovat onnistuneet valmistamaan kenkiä kuluttajille suunnatuilla laitteilla.

Alan harrastajat ovat myös valmistaneet TPU:sta tiivisteitä, puhelimen suojakuoria, rannekellon hihnoja, saranoita, iskunkestäviä pintoja, palloja ja muita leluja. Vaikka suurin osa harrastajien tekemistä kappaleista ja kokeiluista olisi tieteen kannalta merkityksetöntä, on harrastajilla määränsä vuoksi suuri merkitys mahdollisten käyttötarkoitusten kartoittamisessa.

4.4 Tulevaisuuden mahdollisuudet

Tulevaisuutta on mahdoton ennustaa, mutta voidaan olettaa ihmisen keksimisen halun jatkuvan. 3D-tulostus antaa isolle joukolle kyvyn kokeilla ja kehittää ideoita pienemmällä kynnyksellä, kuin aikaisemmin. Erityisesti vaativampia materiaaleja ja multimateriaalitulostusta hyödyntävä ryhmä kasvaa merkittävää vauhtia.

Luultavasti keskeisimpiä ongelmia 3D-tulostuksessa ovat estetiikan kannalta pyöreiden muotojen tekeminen ilman näkyviä kerroksia ja mekaanisien ominaisuuksien kannalta kerrosten välinen liitos eli adheesio. Näihin ongelmiin on tulossa ratkaisuja slicer-sovelluksiin ja tulostimiin. Non-planar-printing (NPP) on tulostustyyli, joka ei noudata tasomaista ajattelua, vaan tulostus voi tapahtua mielivaltaisesta suunnasta. Tämä antaa runsaasti vaihtoehtoja kappaleen optimointiin ja mahdollistaa pyöreät tasaiset pinnat. [40] Toinen merkittävä ja yleistymässä oleva ominaisuus on Bricklayer-kerrostus (BL). BL on tapa tulostaa (tarkemmin viipaloida) kappale niin, että joka toinen tulostusradoista nostetaan puoli kerrosta ylemmäs. Lopputuloksena tasot häviävät ja poikkileikkaus muistuttaa tiiliseinää. Prosessin on tarkoitus vähentää anisotropiaa. [41] NPP- ja BL-ominaisuudet vaativat vielä kehitystä, jotta monipuolinen yhteensopivuus tulostimien kanssa saavutetaan. Erityisesti NPP:n kokonaisvaltainen hyödyntäminen, eli eri suunnista tulostaminen, vaatii perinteistä 3D-tulostinta enemmän vapausasteita. Tällaisia tulostimia on merkittävästi vähemmän ja tekniset ratkaisut, kuten robottikäden käyttö tulostuspään liikutteluun, tekevät niistä huomattavasti kalliimpia. Kuluttajalle vaihtoehtona on harrastajien kehittämät NPP-päivitykset olemassa oleviin tulostimiin, kuten Prusan tulostimiin tehdyt 4- ja 5-akseliset päivitykset [42, 43]. Ohut kerros pehmeää TPU:ta pinnalla voisi tehdä kappaleesta mukavamman käsitellä ja iskunkestävämmän. Tämän toteutus esteettisesti voi vaatia NPP:tä.

Muihin valmistustekniikoihin nähden 3D-tulostettavissa tuotteissa on yksi merkittävä vapaus; kappaleen sisäisten rakenteiden optimointi ilman huomattavia lisäkustannuksia. Vaikka slicer-sovelluksissa pystyy muuttamaan infill-kuviota ja -prosenttia tarpeen mukaan, todellisuudessa valmis toistettava geometria on luultavasti kaukana kyseisen tilanteen optimaalista. Toinen vaihtoehto on tehdä optimointi manuaalisesti cad-sovelluksessa, mutta se vaatii paljon tietotaitoa ja aikaa, mikä tekee siitä epäkannattavaa monessa tilanteessa. Tulevaisuudessa optimointi voi olla mahdollista tehdä slicer- tai cad-sovelluksessa tekoälyllä. AI Infill-toiminto löytyy jo esimerkiksi Crealityn slicerista [44] ja Fusion 360 Cad-ohjelmassa on saatavilla generatiivinen mallinnus [45], mutta teknologia on vasta S-käyränsä alussa.

Tulevaisuudessa toivottavasti päästään pisteeseen, jossa vastaavia kyvykkyyksiä pystyy käyttämään suunnittelussa nykyisten tekoäly chat-bottien tapaan vaivattomasti. Rakenteen optimoinnin, tai koko mallinnusprosessin automatisoinnin lisäksi tekoäly voisi hyödyntää eri muovien ominaisuuksia kappaleen eri kohdissa. TPU voisi tällaisessa tilanteessa osoittautua nykyhetkeäkin käyttökelpoisemmaksi ja olla ratkaisu moneen esitettyyn ongelmaan.

5. YHTEENVETO

Voiko 3D-tulostettua termoplastista polyuretaania käyttää kantavissa rakenteissa? Lyhyt vastaus on kyllä, mutta todellisuudessa se on vain harvoihin tilanteisiin paras vaihtoehto. Käyttölämpötila ja huono kemiallinen kesto verraten metalleihin, rajaavat paljon suotuisia ympäristöjä. Lisäksi väsyminen ja ryömiminen ovat turvallisuuden kannalta ongelmia. Tämä rajoittaa 3D-tulostetun TPU:n käytön kantavissa rakenteissa sellaisiin ratkaisuihin, missä kappalemäärät ovat pieniä, geometriat monimutkaisia ja rakenteen pettäminen ei aiheuta vaaratilannetta.

TPU:n mekaanisen suorituskyvyn parantaminen on mahdollista lämpökäsittelyllä ja oikealla 3D-tulostukseen soveltuvalla suunnittelufilosofialla. Tärkeää olisi huomioida anisotropia, tulostimen geometriset rajoitteet (overhang, pyöreät muodot, koko) ja mahdollisen lämpökäsittelyn ongelmat (overhang). Mitoituksessa voi joutua huomioimaan jäännösvenymien ja ryömimisen vaikutukset, sekä mahdollisen esivenytyksen (ensimmäinen sykli) ennen varsinaista käyttöä. Oikean kovuuden valitseminen käyttökohteeseen ja tulostimen kykyihin on tärkeää. Valintaa tehdessä tulee muistaa tutustua kyseisen valmistajan tarjoamiin teknisiin tietoihin, sillä materiaalien välillä on huomattavia eroja. Usean materiaalin hyödyntäminen (ASA/TPU) samassa tulostuksessa voi myös olla ratkaisu esimerkiksi lämpökäsittelyn ongelmiin. Alan nopea kehitys (tulostimet, materiaalitekniikka ja suunnittelutyökalut) luultavasti antaa TPU:lle parempia käyttömahdollisuuksia tulevaisuudessa.

Konkreettisia käyttökohteita voisivat olla erinäiset tärinänvaimentimet ja liitokset, joissa materiaalin iskunkestävyys tulisi hyödynnettyä, mutta pienet jäännösvenymät ja ryömiminen eivät haittaisi olennaisesti. Tällöin TPU toimisi muiden materiaalien rinnalla raoissa, joissa jäykkyys ei ole toivottua. Esimerkiksi hyllytavarasta puutuvat tärinää vaimentavat jalat 3D-tulostimen alle, tai tärinää vaimentavat holkit moottoripyörän tankoon voisivat olla mahdollisia kustannustehokkaita käyttökohteita. Iskunvaimennukseen TPU on hyvä ratkaisu, mutta mahdollinen staattinen kuorma pitää mitoittaa oikein, jotta ryömiminen ei aiheuta ongelmaa. Iskunvaimennusta ja 3D-tulostuksen vapaata suunnittelufilosofiaa voisi hyödyntää esimerkiksi rakenteissa, joissa liukukisko tuetaan tärinää vaimentavasti liitoskappaleen toimiessa liukukiskon päädyn vaimentimena.

LÄHTEET

[1] C. S. Schollenbenger ym., “Polyurethane VC, a virtually crosslinked elastomer,” *Rubber World*, vol. 137, s. 549, 1958. Saatavilla: https://watermark.silverchair.com/1_3539953.pdf.

[2] G. Beyer (toim.), *The Global Cable Industry: Materials, Markets, Products*. Newark, NJ: John Wiley & Sons, 2021. Saatavilla: https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=6531450.

[3] NASA, “Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing.” Saatavilla: https://www.nasa.gov/missions/station/solving-the-challenges-of-long-duration-space-flight-with-3d-printing/. Katsottu: 11.4.2025.

[4] *TIME*, “An AI 3D Printer,” 10.11.2022. Saatavilla: https://time.com/collection/best-inventions-2022/6226978/bambu-lab-x1-3d-printer/. Katsottu: 11.4.2025.

[5] ELEGOO, “Elegoo Centauri Carbon | Best High-Speed CoreXY 3D Printer.” Saatavilla: https://eu.elegoo.com/products/centauri-carbon. Katsottu: 26.8.2025.

[6] Creality, “K1 Speedy 3D Printer.” Saatavilla: https://store.creality.com/eu/products/k1-speedy-3d-printer. Katsottu: 11.4.2025.

[7] Snapmaker, “Snapmaker U1 Color 3D Printer: 5× More Speed. 5× Less Waste,” Kickstarter. Saatavilla: https://www.kickstarter.com/projects/snapmaker/snapmaker-u1-color-3d-printer-5x-more-speed-5x-less-waste. Katsottu: 26.8.2025.

[8] P. H. Kauffer, *Injection Molding: Process, Design and Applications*. New York, NY: Nova Science Publishers, 2021, s. 1–292.

[9] T. K. Nguyen ym., “Development of a novel direct powder screw extruder for 3D scaffold printing of PCL-based composites,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, nro 7–8, s. 3161–3182, 2023.

[10] B. Joseph, J. James, Y. Grohens, N. Kalarikkal ja S. Thomas, “Additive manufacturing of poly(ε-caprolactone) for tissue engineering,” *JOM*, vol. 72, nro 11, s. 4127–4138, 2020.

[11] S. M. Desai, R. Y. Sonawane ja A. P. More, “Thermoplastic polyurethane for three-dimensional printing applications: A review,” *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 34, nro 7, s. 2061–2082, 2023.

[12] H. J. Qi ja M. C. Boyce, “Stress–strain behavior of thermoplastic polyurethanes,” *Mechanics of Materials*, vol. 37, nro 8, s. 817–839, 2005. doi:10.1016/j.mechmat.2004.08.001.

[13] Z. Jia, Z. Guo ja C. Yuan, “Effect of material hardness on water lubrication

performance of thermoplastic polyurethane under sediment environment," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, nro 10, s. 7532–7541, 2021.
[14] Bambu Lab, "TPU 95A HF." Saatavilla: https://eu.store.bambulab.com/en-fi/products/tpu-95a-hf. Katsottu: 26.8.2025.
[15] Bambu Lab, "TPU for AMS." Saatavilla: https://eu.store.bambulab.com/en-fi/products/tpu-for-ams. Katsottu: 18.5.2025.
[16] KINGFA (Sunlu), "TPU – Technical Data Sheet," PDF. Saatavilla: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0909/3450/9859/files/TPU-TDS.pdf. Katsottu: 26.8.2025.
[17] Bambu Lab, "TPU 90A – Technical Data Sheet," PDF. Saatavilla: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0645/5876/0155/files/Bambu_TPU_90A_Technical_Data_Sheet_582bf8f6-1f0a-474c-aeda-9e72af3689dc.pdf. Katsottu: 26.8.2025.
[18] Bambu Lab, "PLA Basic – Technical Data Sheet," PDF. Saatavilla: https://store.bblcdn.eu/s8/default/073e722a4aa44f7cbfdc419d597475cc/Bambu_PLA_Basic_Technical_Data_Sheet.pdf. Katsottu: 27.8.2025.
[19] N. P. Levenhagen ja M. D. Dadmun, "Interlayer diffusion of surface-segregating additives to improve the isotropy of fused deposition modeling products," *Polymer*, vol. 152, s. 35–41, 2018.
[20] M. Mukhtarkhanov, E. Shehab ja M. H. Ali, "Experimental study on warpage phenomenon of wax parts manufactured by fused filament fabrication," *Polymers*, vol. 16, nro 2, artikkeli: 208, 2024. doi:10.3390/polym16020208.
[21] S. Gu ym., "Effect of heat treatment on the performance of 3D printed thermoplastic polyurethane flexible substrates," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 140, nro 16, artikkeli: e53741, 2023. doi:10.1002/app.53741.
[22] Material Data Center, "Elastollan® 1185 A — Datasheet." Saatavilla: https://www.materialdatacenter.com/…/Elastollan%C2%AE%2B1185%2BA/. Katsottu: 25.8.2025.
[23] BASF, "Elastollan® E 1185 A — Product Data Sheet (Europe)," PDF. Saatavilla: https://download.basf.com/…/Elastollan_E_1185_A_10FHF000_Product_Data_Sheet. Katsottu: 25.8.2025.
[24] Fiberlogy, "FiberFlex 40D — Flexible filament for 3D print." Saatavilla: https://fiberlogy.com/en/fiberlogy-filaments/filament-fiberflex-40d/. Katsottu: 18.5.2025.
[25] A. Siddiqui ym., "An experimental and theoretical study of the effect of sample thickness on the Shore hardness of elastomers," *Polymer Testing*, 2010.
[26] L. Lu, "Innovative soft thermoplastic polyurethanes," *Society of Plastics Engineers — 9th Thermoplastic Elastomers (TPE) TOPCON 2010*, s. 267–270. Saatavilla Andor/TUNI-linkin kautta.

[27] A. Aisingh ym., “Tailoring high hardness and rigidity in biodegradable thermoplastic polyurethanes,” *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 6, nro 16, s. 9724–9734, 2024. doi:10.1021/acsapm.4c01579.

[28] Recreus, “TPU Filament Filaflex 60A.” Saatavilla: https://recreus.com/en/products/filaflex-60a. Katsottu: 18.5.2025.

[29] NinjaTek, “Armadillo 3D Printer Filament (75D) — tekniset tiedot (tuote poistumassa).” Saatavilla: https://ninjatek.com/shop/armadillo/. Katsottu: 18.5.2025.

[30] Bambu Lab, “ABS — Technical Data Sheet (V3),” PDF. Saatavilla: https://store.bblcdn.com/s7/default/23b4cf2b83d5470bb96d19970b5f3ae8/Bambu_ABS_Technical_Data_Sheet_V3.pdf. Katsottu: 18.5.2025.

[31] Bambu Lab, “Material datasheet (PDF-ID: ce12d65176a94f1086e6aefa238e62e2),” PDF. Saatavilla: https://store.bblcdn.com/ce12d65176a94f1086e6aefa238e62e2.pdf. Katsottu: 18.5.2025.

[32] Bambu Lab, “PC — Technical Data Sheet,” PDF. Saatavilla: https://store.bblcdn.eu/s8/default/ab03007d58814bc28a08145719b552de/Bambu_PC_Technical_Data_Sheet.pdf. Katsottu: 18.5.2025.

[33] D. Frenkel, E. Ginsbury ja M. Sharabi, “The mechanics of bioinspired stiff-to-compliant multi-material 3D-printed interfaces,” *Biomimetics*, vol. 7, nro 4, artikkeli: 170, 2022. doi:10.3390/biomimetics7040170.

[34] E. Brancewicz-Steinmetz, R. D. V. Vergara, V. H. Buzalski ja J. Sawicki, “Study of the adhesion between TPU and PLA in multi-material 3D printing,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 115, nro 2, s. 49–56, 2022.

[35] C. G. Harris, N. J. S. Jursik, W. E. Rochefort ja T. W. Walker, “Additive manufacturing with soft TPU – adhesion strength in multimaterial flexible joints,” *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 5, 2019. Saatavilla: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2019.00037/full.

[36] J. Slapnik, R. Lorber, I. Pulko, M. Huskić ja K. P. Črešnar, “Overprinting of TPU onto PA6 substrates: The influences of the interfacial area, surface roughness and processing parameters on the adhesion between components,” *Polymers*, vol. 16, nro 5, artikkeli: 650, 2024. doi:10.3390/polym16050650.

[37] A. Boubakri, N. Guermazi, K. Elleuch ja H. F. Ayedi, “Study of UV-aging of thermoplastic polyurethane material,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, nro 7, s. 1649–1654, 2010.

[38] adidas, “adidas 4D shoes & sneakers,” tuotesivu. Saatavilla: https://www.adidas.com/us/4d-shoes. Katsottu: 27.8.2025.

[39] Zellerfeld, “3D printed footwear.” Saatavilla: https://www.zellerfeld.com/. Katsottu: 12.4.2025.

[40] L. Xu ja Z. Shi, “Planar and non-planar hybrid printing trajectory generation method,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2842, nro 1, artikkeli: 012097, 2024.

[41] CNC Kitchen, “Brick Layers — make 3D prints stronger!” blogiartikkeli. Saatavilla: https://www.cnckitchen.com/blog/brick-layers-make-3d-prints-stronger. Katsottu: 24.5.2025.

[42] CNC Kitchen, “The RotBot: 4-Axis non-planar 3D printing,” blogiartikkeli. Saatavilla: https://www.cnckitchen.com/blog/the-rotbot-4-axis-non-planar-3d-printing. Katsottu: 24.5.2025.

[43] All3DP, “Open-source 5-axis Prusa upgrade: A closer look.” Saatavilla: https://all3dp.com/4/open-source-5-axis-prusa-upgrade/. Katsottu: 24.5.2025.

[44] Creality Wiki, “Creality Print 5.1.0 — Release notes.” Saatavilla: https://wiki.creality.com/en/software/update-released/release-notes/release-note-5-1-0. Katsottu: 20.6.2025.

[45] Autodesk University, “Fusion 360 — Introduction to generative design.” Saatavilla: https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Fusion-360-Introduction-Generative-Design. Katsottu: 20.6.2025.