

Hanni Hilden

# PUUVILLA- JA POLYESTERITEKSTIILIKUITUJEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN VERTAILU

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Hanni Hilden: Puuvilla- ja polyesteritekstiilikuitujen ympäristövaikutusten vertailu  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma  
Huhtikuu 2022

---

Tekstiilien ja tekstiilikuitujen ympäristövaikutukset ovat merkittäviä. Ympäristövaikutuksia ovat muun muassa kasvihuonekaasupäästöt, vedenkulutus, haitallisten kemikaalien päästöt sekä fossiilisten raaka-aineiden käyttö. Puuvilla ja polyesteri ovat maailman käytetyimmät tekstiilikuidut. Tässä työssä vertaillaan puuvillan ja polyesterin ympäristövaikutuksia kaikissa elinkaaren vaiheissa. Työn tavoitteena on selvittää, onko jompikumpi kuitu selvästi ympäristöystävällisempi kuin toinen.

Puuvilla on luonnonkuitu, jota saadaan puuvillakasvin siemenkodassa kehittyvistä karvoista. Puuvillaa viljellään lämpimillä alueilla. Puuvillan viljelyssä käytetään tyypillisesti paljon torjunta-aineita ja lannoitteita sekä vettä kasteluun. Sadonkorjuun jälkeen raakapuuvilla puhdistetaan ja kehrätään langaksi. Polyesteri on synteettinen kuitu. Tyypillisin tekstiilikuiduissa käytetty polyesteri on PET. Polyestereiden raaka-aineet ovat tyypillisesti fossiilista alkuperää. Polyestereiden muodonanto tapahtuu sulakehruulla, jonka jälkeen filamentit käytetään sellaisenaan tai kuidut teksturoidaan katkokuiduiksi. Puuvillan ja polyesterin käyttökohteet ovat samankaltaisia.

Ympäristövaikutuksia syntyy tekstiilien elinkaaren kaikissa vaiheissa. Kuidun valmistuksen vaiheet ja täten myös ympäristövaikutukset eroavat puuvillalla ja polyesterillä merkittävästi. Puuvillan kasvatukseen tarvitaan paljon maapinta-alaa, lannoitteita, torjunta-aineita sekä vettä. Puuvillan kasvatuksen seurauksena maaperä voi suolaantua viljelykelvottomaksi. Polyesterin tuotannossa puolestaan käytetään fossiilisia raaka-aineita ja siinä syntyy VOC-päästöjä. Langan ja kankaan valmistuksesta syntyy myös päästöjä. Langan kehruu sekä kankaan kutominen tai neulominen kuluttaa energiaa kummankin materiaalin tapauksessa. Erityisesti langan tai kankaan värjääminen on ympäristölle haitallinen prosessi, jossa syntyy haitallisten kemikaalien päästöjä.

Kumpaakin kuitua voidaan kierrättää. Kierrätettyä polyesteriä käytetään tekstiileissä huomattavasti enemmän kuin kierrätettyä puuvillaa. Kierrätetty polyesteri valmistetaan tyypillisesti PET-juomapulloista, mutta myös polyesteritekstiilien kierrätys on mahdollista. Puuvillan tapauksessa käytetyin kierrätysmenetelmä on mekaaninen kuidun avaaminen ja uudelleenkehruu. Jos kierrätys ei ole mahdollista, voidaan molemmat materiaalit polttaa energiaksi.

Sekä polyesterillä että puuvillalla on ympäristövaikutusten suhteen etunsa ja haittansa. Puuvillan etuja ovat sen biohajoavuus sekä uusiutuvat raaka-aineet. Polyesterin etuna puolestaan on sen pieni maapinta-alan ja veden käyttö. Puuvillan haittapuolia ovat torjunta-aineiden ja lannoitteiden käyttö sekä suuri vedenkulutus. Polyesterin haittapuolia ovat puolestaan uusiutumattomat raaka-aineet.

Ympäristövaikutusten arviointi on haastavaa, sillä niihin vaikuttavat useat tekijät. Ympäristövaikutusten arviointi riippuu myös siitä, miten erilaisia tekijöitä painotetaan. Alueelliset erot hankaloittavat entisestään aiheen globaalia tarkastelua. Tämän työn lopputuloksena on, että ei voida yksiselitteisesti määrittää kumpi kuitu on ympäristöystävällisempi, sillä se riippuu siitä, mitä tekijöitä halutaan painottaa.

Avainsanat: ympäristövaikutus, tekstiilikuitu, puuvilla, polyesteri

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TEKSTIILIKUIDUT .....	3
2.1 Tekstiilikuitujen luokittelu.....	3
2.2 Polyesteri .....	4
2.3 Estereistä tekstiilikuiduksi: polyesterin tuotanto.....	5
2.4 Puuvilla .....	8
2.5 Puuvillakasvista tekstiilikuiduksi: puuvillan tuotanto .....	9
3. YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET .....	12
3.1 Kuidun tuotannon ympäristövaikutukset.....	13
3.2 Tekstiilin käytön aikaiset ympäristövaikutukset.....	16
3.3 Tekstiilin elinkaaren loppu .....	17
3.4 Tutkimustuloksia .....	19
3.5 Ympäristövaikutusten arvioinnin haasteet .....	20
4. YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET.....	24

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

BCI	Better Cotton Initiative
BHET	bis(2-hydroksietyyli)tereftalaatti
FDCA	2,5-furaanidikarboksyylihappo
NMMO	N-metyylimorfoliini-N-oksidi
PBT	polybutyleenitereftalaatti
PEF	polyetyleenifuranoaatti
PET	polyetyleenitereftalaatti
PTT	polytrimetyleenitereftalaatti
VOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet ( <i>engl. volatile organic compounds</i> )

# 1. JOHDANTO

Kansalaisjärjestö Finnwatch (2021) julkaisi helmikuussa 2022 tekstiiliteollisuuden globaalia tilaa käsittelevän raportin ”Mitä pikamuodin jälkeen? Oikeudenmukainen ekologinen siirtymä vaate- ja tekstiiliteollisuudessa”. Raportissa käsitellään vaate- ja tekstiiliteollisuuden ympäristövaikutuksia ja esitetään keinoja ympäristövaikutusten pienentämiseksi. Raportissa tuodaan esille myös yritysten vastuu ympäristötoimissa sekä ihmisoikeuksien toteutumisessa. (Finnwatch 2021, s. 4–6)

Raportissa käsitellyt teemat ovat ajankohtaisia, sillä vaatteiden ja tekstiilien tuotannon ympäristövaikutukset ovat merkittävät. Alan kasvihuonekaasupäästöjen arvioidaan eri lähteiden mukaan olevan noin 4–10 % koko maailman kasvihuonekaasupäästöistä (Quantis 2018, s. 18; McKinsey & Company 2020, s. 5; Niinimäki et al. 2020). Tekstiiliteollisuus käyttää merkittävän määrän luonnonvaroja, koska kuitukasvien viljelyyn tarvitaan maapinta-alaa sekä vettä ja toiminnasta syntyy päästöjä esimerkiksi vesistöihin. Tekstiilien tuotannolla on myös sosiaalinen vaikutus, sillä valtaosa tekstiilien tuotannosta tapahtuu halvan työvoiman maissa, joissa työolosuhteet voivat olla vaarallisia. (ETC/WMGE 2019, s. 2)

Tekstiilien kulutus on lisääntynyt viime vuosikymmeninä muun muassa niin sanotun pikamuotikulttuurin sekä keskiluokan kasvun vuoksi. Vaatteiden tuotantomäärät ovat lähes kaksinkertaistuneet viimeisen viidentoista vuoden aikana. Samaan aikaan vaatteiden käyttökerrat ovat olleet laskussa maailmanlaajuisesti. Etenkin korkean elintason maissa vaatteiden käyttökerrat ovat romahtaneet ja käyttökelpoisia vaatteita päätyy jätteeksi. (Ellen MacArthur 2017, s. 18–19)

Luonnonkuiduilla on maine ympäristöystävällisinä materiaaleina. Luonnonmateriaalit ja biohajoavuus luovat vaikutelman ympäristöystävällisestä tuotteesta. Synteettisten kuitujen maine on huonompi, sillä perinteisesti ne valmistetaan fossiilisista raaka-aineista. Kuidun tuotannon ympäristövaikutukset eivät juurikaan näyttäydy tavalliselle kuluttajalle, vaan materiaaleja käytetään omiin mieltymyksiin ja mielikuviin pohjaten.

Polyesteri on maailman käytetyin kuitu, sillä yli puolet kaikesta tuotetusta tekstiilikuidusta on polyesteriä. Puuvilla puolestaan on maailman käytetyin luonnonkuitu. (Textile Exchange 2021, s. 9) Näiden materiaalien käyttökohteet ovat samankaltaisia, mutta

kuitujen alkuperä ja valmistustapa eroavat toisistaan merkittävästi. Voidaan siis olettaa, että myös näiden kuitujen ympäristövaikutukset ovat erilaiset.

Tässä työssä tutkitaan, mitkä ovat kahden eniten käytetyn tekstiilikuidun, polyesterin ja puuvillan, ympäristövaikutukset koko elinkaaren aikana. Ympäristövaikutuksia tarkastellaan etenkin kuidun tuotantovaiheessa. Myös tekstiilin käytön aikaisia päästöjä sekä elinkaaren lopun vaihtoehtoja käsitellään. Tarkasteltavia ympäristövaikutuksia ovat kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi muun muassa vedenkulutus, kemikaalien käyttö, mikromuovipäästöt sekä hiilijalanjälki. Tämän työn tavoitteena on näitä kahta kuitua vertailemalla tarkastella sitä, miten synteettisen kuidun ja luonnonkuidun ympäristövaikutukset eroavat toisistaan ja onko jompikumpi kuitu selvästi ympäristöystävällisempi kuin toinen.

Luvussa 2 käsitellään tekstiilikuitujen luokittelua sekä puuvillan ja polyesterin ominaisuuksia ja kuidun valmistusta. Luvussa 3 esitellään ympäristövaikutuksia kaikissa tekstiilin elinkaaren vaiheissa. Luvussa esitellään myös kirjallisuudessa esitettyjä tutkimustuloksia sekä ympäristövaikutusten arvioinnin haasteita. Yhteenvedossa kootaan työn sisältö ja esitetään tärkeimmät johtopäätökset.

## 2. TEKSTIILIKUIDUT

Tämän luvun alussa käsitellään tekstiilikuitujen luokittelua. Tässä luvussa perehdytään myös polyesterin ja puuvillan ominaisuuksiin sekä käsitellään niiden valmistusta raaka-aineesta kuiduksi ja kuidusta kankaaksi.

### 2.1 Tekstiilikuitujen luokittelu

Tekstiilikuidut voidaan karkeasti jakaa luonnonkuituihin ja synteettisiin kuituihin. Luokittelutapoja on monia, ja tekstiilikuidut voidaan edelleen jakaa ryhmiin esimerkiksi alkuperän tai kemiallisen koostumuksen perusteella. Alkuperän mukaan luonnonkuidut voidaan jakaa kasvikuituihin ja eläinkuituihin ja koostumuksen perusteella puolestaan selluloosakuituihin ja proteiinikuituihin. Selluloosakuidut voidaan edelleen jakaa ryhmiin sen perusteella, mistä kasvin osasta kuitu on peräisin. (Mather & Wardman 2015, s. 2–3)

Synteettisiä kuituja voidaan jaotella muun muassa alkuperän, polymeerin tai valmistustavan perusteella. Synteettisiin kuituihin lukeutuvat kaikki kuidut, jotka on valmistettu polymeereistä, jotka on kemiallisesti syntetisoitu. Perinteisesti synteettisten kuitujen raaka-aineet on valmistettu fossiilisesta raakaöljystä ja maakaasusta. (Mather & Wardman 2015, s. 144)

Täysin tai osittain biopohjaisia polymeerejä kehitetään, sillä fossiilisten raaka-aineiden käyttöä halutaan vähentää niiden rajallisen määrän ja suuren hiilijalanjäljen vuoksi. Muutamat yritykset ovat onnistuneet valmistamaan noin 30 % biopohjaisia raaka-aineita sisältäviä polyesterikuituja (Textile Exchange 2021, s. 78). Muun muassa Höhnemann et al. (2021) tutkivat lupaavaa, täysin biopohjaista polyesteriä, polyetyleenifuranoaattia (PEF), josta voidaan valmistaa tekstiilikuituja. Joitakin polymeerejä, kuten polyetyleenitereftalaattia (PET), voidaan myös kierrättää tehokkaasti ja hyödyntämällä kierrätettyä raaka-ainetta voidaan vähentää neitseellisten raaka-aineiden käyttöä.

Luonnonkuitujen ja synteettisten kuitujen lisäksi on olemassa muuntokuituja ja muita erikoiskuituja. Muun muassa viskoosi on muuntokuitu, joka valmistetaan puuaineksessa olevasta selluloosasta erottamalla selluloosa muista aineista ja liuottamalla se suspensioon. Viskoosikuitujen muodonanto tapahtuu märkäkehrulla. (Mather & Wardman 2015, s. 113–115)

Tekstiileissä käytetään usein kahden tai useamman kuidun sekoitusta. Tyypillinen sekoite on puuvilla-polyesterisekoite. Materiaalien joukkoon lisätään usein myös

elastaania joustavuuden parantamiseksi. Sekoitekuitujen ympäristövaikutusten arviointi on haastavaa, sillä yksittäisten kuitujen ominaisuuksien lisäksi tulee huomioida sekoitussuhteet ja erilaiset kierrätysmenetelmät. Selkeyden vuoksi tässä työssä käsitellään vain 100 % puuvillaa tai polyesteriä sisältäviä kuituja ja tekstiilejä. Sekoitekuitujen ympäristövaikutusten arviointi on jätetty tästä työstä pois.

## 2.2 Polyesteri

Polyesterit ovat polymeerejä, joissa funktionaalinen esteriryhmä on molekyylin pääketjussa. Polyestereitä on useita erilaisia, mutta tekstiilikuituna eniten käytetty on polyetyleenitereftalaatti (PET). Myös muun muassa polybutyleenitereftalaatista (PBT) sekä polytrimetyleenitereftalaatista (PTT) voidaan valmistaa kuituja. (Mather & Wardman 2015, s. 169)

Ensimmäiset polyesterikuidut valmistettiin 1930-luvulla. Näiden kuitujen sulamispisteet olivat kuitenkin liian alhaisia tekstiilikäyttöön. Tutkimustyötä jatkettiin ja vuonna 1941 saatiin valmistettua ensimmäinen PET-kuitu etyleeniglykolista ja tereftaalihaposta. Toisen maailmansodan jälkeen vuonna 1945 yhdysvaltalainen DuPont ja brittiläinen Imperial Chemical Industries aloittivat PET-kuitujen teollisen tuotannon. (Mather & Wardman 2015, s. 169–170)

Nykyään polyesteri on eniten tuotettu tekstiilikuitu maailmassa. Textile Exchangen (2021, s. 9) mukaan vuonna 2020 polyesteriä tuotettiin noin 57 miljoonaa tonnia. Tämä vastaa noin 52 % kaikesta tuotetusta tekstiilikuidusta. Tästä noin 15 % oli kierrätettyä polyesteriä ja noin 0,03 % oli biopohjaista polyesteriä. Vaikka kierrätyskuidun osuus on ollut kasvussa viime vuosina, edelleen valtaosa polyesteristä valmistetaan neitseellisistä fossiilisista raaka-aineista. (Textile Exchange 2021, s. 10, 73)

Polyesterikuidut soveltuvat moniin eri käyttökohteisiin. Niistä voidaan valmistaa vaatteita, asusteita sekä kodin tuotteita. Niitä voidaan käyttää myös erilaisissa lääketieteellisissä ja teollisissa kohteissa. Takkien ja taskujen vuorikankaat, fleece sekä urheiluvaatekankaat ovat tyypillisiä esimerkkejä polyesterin käyttökohteista. Teollisissa kohteissa polyesterikuituja käytetään muun muassa köysissä ja renkaiden vahvikkeina. Lääketieteellisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi ompeleet, siteet sekä keinotekoiset nivelsiteet ja jänteet. (Mather & Wardman 2015, s. 184)

Polyesteristä valmistetut kankaat ovat helppohoitoisia, sillä ne kuivuvat nopeasti eivätkä rypisty. PET-kuidut ovat lujia ja kulutuksenkestäviä. Ne kestävät hyvin myös auringonvaloa muihin synteettisiin kuituihin verrattuna. Tästä syystä esimerkiksi verhoja ja verhoilukankaita valmistetaan polyesteristä. Polyesterikuiduilla on myös melko hyvät

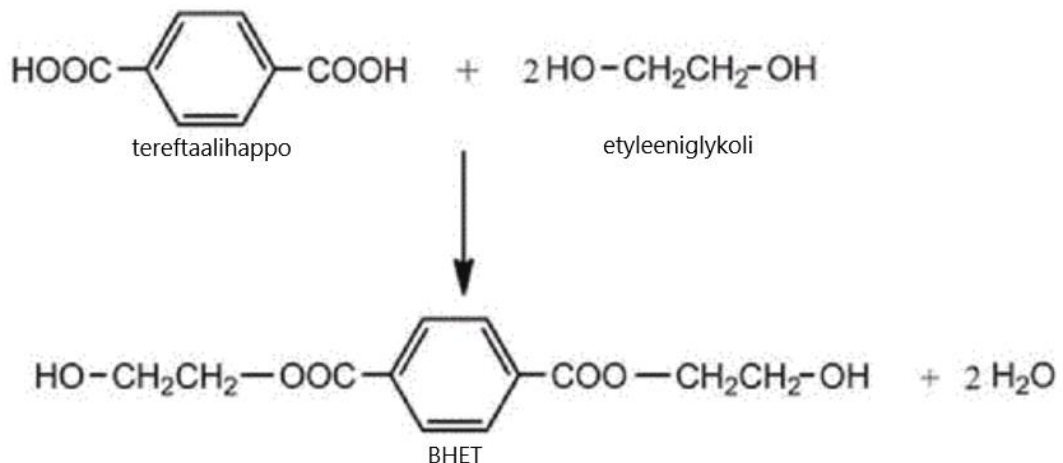


haponkesto-ominaisuudet. PET:n polymeeriketjut alkavat hajota yli 260 °C:n lämpötilassa, joten käyttölämpötilojen tulisi olla tätä matalampia. (Mather & Wardman 2015, s. 181–184)

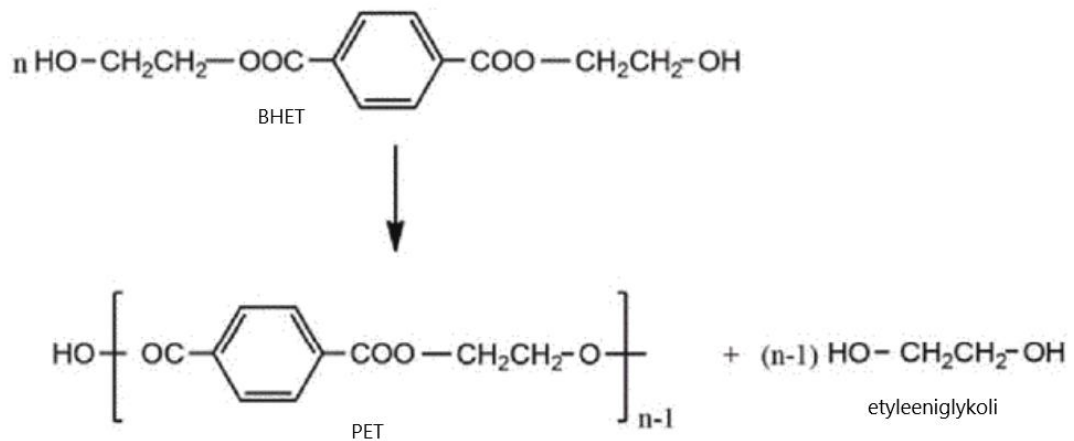
### 2.3 Estereistä tekstiilikuiduksi: polyesterin tuotanto

PET valmistetaan tyypillisesti esteröimällä puhtaasta tereftaalihaposta ja etyleeniglykolista. Tereftaalihappoa saadaan hapettamalla para-ksyleeniä, jota saadaan maaöljystä (Eichhorn et al. 2009, s. 189). Reaktiota katalysoi tereftaalihapon karboksyyliyhdyt, lisäksi joskus käytetään muita vahvempia happokatalyyttejä. Esteröinnin aikana tapahtuu sivureaktio, jossa syntyy dietyleeniglykolia. Tätä ei-toivottua sivureaktiota voidaan kuitenkin hillitä lisäämällä natriumhydroksidia tai esteröimällä 280–290 °C:n lämpötilassa. (Mather & Wardman 2015, s. 176–177)

Esteröintireaktion reaktioyhtälö on esitetty kuvassa 1. Esteröintireaktiossa syntyy bis(2-hydroksietyyli)tereftalaattia (BHET). Tämä monomeeri polymeroidaan askelpolymeraatiolla. Askelpolymeraation reaktioyhtälö on esitetty kuvassa 2. Askelpolymeraatio on reversiibeli reaktio, joten reaktion etenemisen varmistamiseksi reaktiossa syntyvä etyleeniglykoli poistetaan ja kierrätetään takaisin esteröintireaktion lähtöaineeksi. (Mather & Wardman 2015, s. 176–178)



**Kuva 1.** Tereftaalihapon ja etyleeniglykolin esteröintireaktio (muokattu lähteestä Mather & Wardman 2015, s. 177).

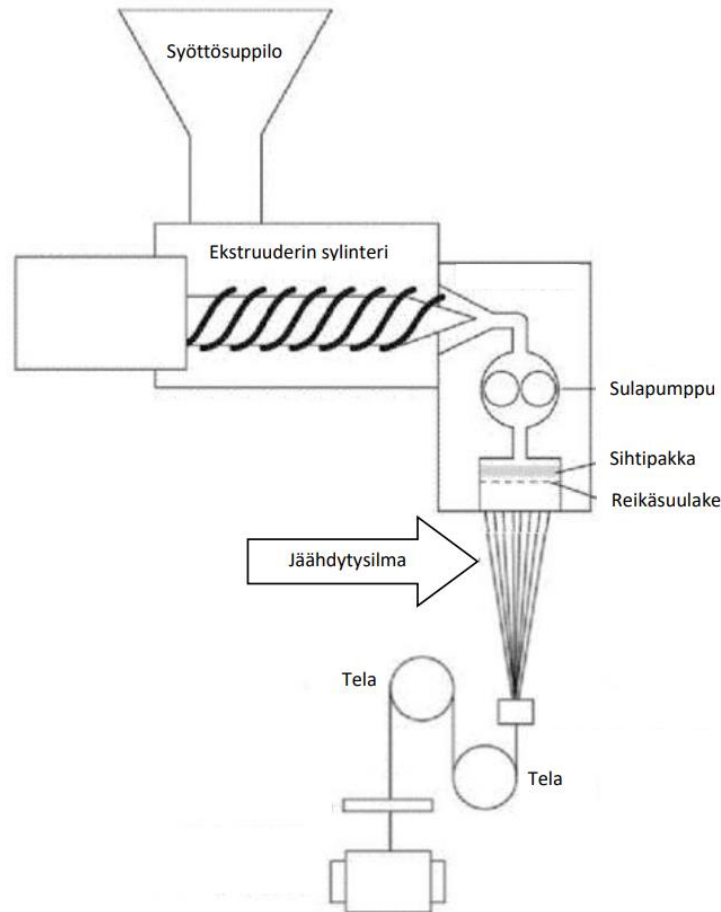


**Kuva 2.** BHET:n askelpolymeraatioreaktio (muokattu lähteestä Mather & Wardman 2015, s. 177).

Polymerointi tapahtuu tyypillisesti 280–285 °C:n vakioämpötilassa. PET:tä voidaan valmistaa erätuotantona tai jatkuvalla polymeroinnilla. Jatkuvatoimisessa prosessissa on pyritty eliminoimaan vaiheet, joissa alkaa tapahtua polymeerin termistä hajoamista liian korkean lämpötilan vuoksi. (Eichhorn et al. 2009, s. 192–194)

PBT valmistetaan dimetyylitereftalaatista ja 1,4-butaanidiolista vaihtoesteröintireaktiolla. PBT:n valmistuksessa voitaisiin myös käyttää tereftaalihappoa, mutta lämmityksen seurauksena reaktiotuotteena syntyy tetrahydrofuraania, joka on erittäin haihtuva yhdiste. PTT valmistetaan samalla tavalla kuin PET, mutta etyleeniglykolin sijaan toisena lähtöaineena käytetään propyleeniglykolia. (Mather & Wardman 2015, s. 178–179)

Kaikki polyesterikuidut saavat muotonsa sulakehruulla, vaikkakin ekstruusiolämpötilat eroavat eri polyesterilaatujen välillä. Sulakehruun kaaviokuva on esitetty kuvassa 3. Sulakehruussa kuivattua polymeerigranulaattia syötetään ekstruuderin syöttösuppilon kautta. Ekstruuderin sylinterissä pyörivän ruuvin synnyttämän kitkalämmön ja lämmitysvastusten ansiosta polymeeri sulaa. Polymeerisula työntyy kohti sulapumppua, joka työntää sulan polymeerin sihtipakan läpi reikäsuulakkeelle. Suulakkeen reikien määrä määrittää syntyvien filamenttien lukumäärän. Suulakkeen muodostamat kuitufilamentit jäädytetään ilmassa ja rullataan teloille. (Eichhorn et al. 2009, s. 215–217)



**Kuva 3.** Sulakehruun kaaviokuva (muokattu lähteestä Eichhorn et al. 2009, s. 216).

Sulakehruulla muodostettuja kuituja vedetään ja venytetään, jotta polymeeriketjut orientoituisivat ja kiteisyysaste kasvaisi. PET-kuitujen venytys tapahtuu tyypillisesti 60–90 °C:n lämpötilassa. PET-kuidut vaativat myös lämpökovetuksen lasisiirtymälämpötilan yläpuolella riittävän kiteisyysasteen saavuttamiseksi. (Mather & Wardman 2015, s. 180) Polymeeriketjujen kuidun suuntainen orientaatio ja kiteisyys yhdessä vaikuttavat kuidun sitkeyteen, murtovenymään sekä lämpökutistumaan (Eichhorn et al. 2009, s. 218).

Sulakehruulla muodostetut kuidut ovat filamenttikuituja, jotka koostuvat yhdestä pitkästä kuidusta. Filamenttikuituja voidaan käyttää sellaisenaan muun muassa monissa teknisissä käyttökohteissa, joko monofilamentteina tai useamman kuidun muodostamina filamenttikimppuina. Tekstiilikäyttöä varten kuidut yleensä teksturoidaan. Kuidun teksturointi vaikuttaa kuidun ulkonäön lisäksi sen pehmeyteen ja tuntumaan. Teksturoinnissa pitkät filamenttikimput kiharretaan ja leikataan tai revitään lyhyiksi kuidunpätkiksi eli katkokuiduiksi. (Hufenus et al. 2020, s. 18)

Katkokuiduista valmistetaan lankaa rengaskehrulla, avopääkehrulla tai ilmasuihkekehrulla (Hufenus et al. 2020, s. 18). Lanka voidaan joko kutoa tai neuloa kankaaksi. Polyesterin värjäyksessä käytetään dispersiovärejä. Koska PET-kuidut ovat hydrofobisia, niitä ei voida värjätä perinteisillä kationisilla tai anionisilla väriaineilla. Dispersiovärit ovat huonosti veteen liukenevia väriaineita, jotka sisältävät atso- tai antrakinoniryhmän. Tyypillisesti värjäys tapahtuu värikylyvyssä, jossa dispergointiaineet edesauttavat värimolekyylien kiinnittymistä kuituun. Värjäysprosessi nopeutuu korkeammassa paineessa ja 130–140 °C:n lämpötilassa. (Ketema & Worku 2020)

## 2.4 Puuvilla

Puuvilla on monivuotinen kukkiva kasvi, joka kasvaa luonnossa pienen puun kokoiseksi. Luontaisesti sitä esiintyy trooppisilla ja subtrooppisilla alueilla. Puuvillaa kasvatetaan pääasiassa kuiduntuotantoon, mutta puuvillan siemenistä saadaan myös öljyä, jota käytetään ihmisten ja eläinten ravinnoksi. (Fang 2018, s. 1)

Puuvilla on tärkein kasvikuitu koko maailmassa ja sitä on käytetty jo tuhansien vuosien ajan (Mather & Wardman 2015, s. 26). Textile Exchangen (2021, s. 9) mukaan sen osuus kaikesta tuotetusta tekstiilikuidusta oli 24 % vuonna 2020. Tämä vastaa noin 26 miljoonaa tonnia. Tästä noin 30 % oli sertifioitua puuvillaa, noin 0,96 % kierrätettyä puuvillaa ja noin 0,95 % luomutuotettua puuvillaa. Huomioitavaa on, että Textile Exchangen (2021) tarkastelussa kierrätetty puuvilla sisältää vain mekaanisesti kierrätetyn kuidun, sillä kemiallisesti kierrätetty puuvilla regeneroidaan selluloosaksi ja täten luokitellaan keinotekoiseksi selluloosakuiduksi. Keinotekoisista selluloosakuiduista valtaosa valmistetaan puun selluloosasta, mutta kehitteillä on menetelmiä, joilla voidaan hyödyntää puuvillajätettä uuden kuidun valmistuksessa. (Textile Exchange 2021, s. 10, 20, 67)

Sertifioidulla puuvillalla tarkoitetaan puuvillaa, jonka kasvatusta on saanut muun muassa Better Cotton Initiative (BCI), Cleaner Cotton, Field to Market tai Fairtrade sertifikaatin. Sertifikaatteja, projekteja ja aloitteita on lukuisia erilaisia, ja ne toimivat kansallisesti tai maailmanlaajuisesti. Yhteistä niille on kuitenkin se, että kaikkien tarkoituksena on lisätä puuvillan tuotannon kestävyttä sekä ympäristön että ihmisoikeuksien kannalta. (Textile Exchange 2021, s.13)

Puuvillan viljely edellyttää yhtäjaksoisesti noin 160 päivää vuodessa yli 16 °C:n lämpötilaa sadon tuottamiseksi. Puuvilla tarvitsee myös riittävän määrän kosteutta kehittyäkseen. Näistä syistä puuvilla menestyy parhaiten trooppisilla alueilla. Kuivissa ja kuumissa olosuhteissa puuvilla tarvitsee runsaasti kastelua. Suurimmat puuvillan

tuottajamaat ovat Intia, Kiina, Yhdysvallat, Brasilia ja Pakistan. Puuvillalajikkeita on useita erilaisia ja ne ovat sopeutuneet eri ympäristöihin. Eri lajikkeista saatavien kuitujen pituus, vahvuus sekä hienous vaihtelevat. Yli 90 % maailman puuvillakuidusta tulee *Gossypium Hirsutum* lajikkeesta. (Fang 2018, s. 1–5)

Puuvillakuidut ovat katkokuituja eli yksittäisiä, lyhyitä kuituja. Ne ovat yksisoluisia karvoja, jotka kehittyvät puuvillan siemenkodassa. Tästä syystä puuvillakuidut luokitellaan siemenkuiduiksi. Genotyypistä riippuen yhdessä siemenkodassa voi olla 10 000–20 000 yksittäistä kuitua. Kuidun kehittyminen alkaa kasvin kukkimisesta ja kestää lajista riippuen noin 50–80 päivää. Tänä aikana kuidut kasvavat pituutta, niiden skundäärisoluseinäjä kehittyä ja kuitu paksuntuu. (Fang 2018, s. 5)

Puuvilla koostuu lähes kokonaan selluloosasta. Puuvillakuidulla on kerroksellinen rakenne, jonka uloin kerros on kutikula. Kutikulan pinta on vahamainen ja sen tarkoituksena on estää kosteuden pääsy kuidun sisäosiin. Kuidun seuraava kerros on primäärisoluseinäjä, joka koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta sekä pektiinistä. Primääri- ja sekundäärisoluseinäjien välissä on transitiokerros. Kuidulla on ontto ydin, luumen, jota ympäröi sekundäärisoluseinäjä. Ne koostuvat selluloosamikrofibrilleistä, joiden kierteinen rakenne ja orientaatio vaikuttavat kuidun lujuuteen. (Fang 2018, s. 5–6)

Puuvillan tyypillisiä käyttökohteita ovat vaatteet ja kodintekstiilit. Puuvilla on imukykyistä ja pehmeää, jonka ansiosta puuvillavaatteet ovat miellyttäviä iholle eivätkä hiosta. Puuvillatekstiilit likaantuvat melko herkästi ja ne voivat kellastua ja haurastua auringossa. Puuvillatekstiilit myös syttyvät helposti. Puuvillakuidut kestävät mietoja emäksiä, mutta eivät juurikaan happoja. (Kozlowski 2012, s. 15)

Tekstiilikäyttöön soveltuvat puuvillakuidut ovat tyypillisesti pituudeltaan noin 25–37 mm. Pidempää kuitua on helpompi käsitellä ja lopputuloksena on laadukkaampi lanka. Puuvillakuitujen luonnollinen väri vaihtelee lähes puhtaanvalkoisesta harmaaseen. (Sinclair 2015, s. 31, 35) Myös luonnostaan värillisiä puuvillalajikkeita on olemassa. Luonnossa värisävyt vaihtelevat vihreästä ruskeaan. (Kozlowski 2012, s. 13)

## **2.5 Puuvillakasvista tekstiilikuiduksi: puuvillan tuotanto**

Alueilla, joilla puuvillaa viljellään yksivuotisena kasvina, kasvatus aloitetaan keväisin siementen kylvöllä. Kylvön aikaan maan lämpötilan tulee olla yli 10 °C, jotta välttyään kylmän aiheuttamilta vaurioilta. (Stewart et al. 2010, s. 49) Maan tulee olla riittävän kuohkeaa ja happipitoisuuden pysyvä korkeana, jotta puuvilla voi kasvattaa vahvan

juuriston. Kasvi tarvitsee kosteutta ja ravinteita tasaisesti koko kasvukauden ajan hyvän sadon tuottamiseksi. (Ahmad & Hasanuzzaman 2020, s. 12)

Puuvillan tuottavuus laskee merkittävästi, jos pellolla kasvaa rikkaruohoja. Kylvösten väliin jätetyt väylät tarjoavat kasvutilaa rikkaruohoille. Puuvilla kasvaa hitaasti, joten nopeammin kasvavat ja kilpailevat kasvit käyttävät maasta ravinteita ja vettä. Puuvilla on myös herkkä tuholaishyönteisille ja pärjää niitä vastaan huonommin kuin nopeakasvuiset ja sitkeämmät rikkaruohot. Näistä syistä puuvillaviljelmillä käytetään paljon erilaisia rikkaruohojen torjuntamenetelmiä, kuten ennaltaehkäisyä, torjunta-aineita sekä mekaanista poistoa. (Ahmad & Hasanuzzaman 2020, s. 146–154)

Puuvillan tuhohyönteisiin kuuluu sekä imeviä että purevia tuholaisia. Mahdollisimman hyvän sadon tuottamiseksi puuvillankasvattajia suositellaan torjumaan kaikenlaisia tuholaisia. (Ahmad & Hasanuzzaman 2020, s. 177) Tuhohyönteistorjunnassa voidaan käyttää tuhohyönteismyrkkyjä tai ekologistia tuhohyönteisten hallintakeinoja. Ekologisten hallintakeinojen tavoitteena on mahdollisimman terve, vahva ja hyvinvoiva kasvi. Kun viljelyalueen ekosysteemi on vahva ja elinvoimainen, tuholaisten määrä pysyy luontaisesti kurissa. (Ahmad & Hasanuzzaman 2020, s. 213–216) Vaikka puuvilla on itsepölyttävä kasvi, se hyötyy hyönteispölytyksestä ja sato voi kasvaa merkittävästi hyönteispölytyksen seurauksena. Laajan kirjon tuholaistorjunta-aineet torjuvat myös pölyttäjiä, joten selektiivisten torjunta-aineiden käyttö on suositeltavampaa. (Ahmad & Hasanuzzaman 2020, s. 163)

Kun puuvilla on kukkinut ja siemenkota on saanut kypsyä ja kuivua, on sadonkorjuun aika. Sadonkorjuu tulisi tehdä kuivalla ja lämpimällä säällä, jotta kuidut eivät pääse kostumaan. Paras aika sadonkorjuulle on keskipäivällä, kun aamukaste on haihtunut. (Ahmad & Hasanuzzaman 2020, s. 575) Sato voidaan korjata koneellisesti tai käsin poimien. Koneellinen sadonkorjuu on tehokasta, nopeaa ja vaatii vähemmän manuaalista työtä. Wangin ja Memonin (2020, s. 62) mukaan 30–40 % puuvillan hinnasta koostuu sadonkorjuusta. Heidän laskelmansa mukaan yhden koneen keräämä määrä vastaa 583 ihmisen käsin keräämää määrää. Koneellinen poiminta on siis edullisempaa ja tehokkaampaa kuin käsin poiminta. Käsin poiminnan etuna on roskien vähäinen määrä ja päästöttömyys, mutta sen haittapuolena on raskas ruumiillinen työ ja hitaus. (Wang & Memon 2020, s. 71–72)

Seuraava vaihe puuvillan käsittelyssä on puhdistus, jossa kuidut erotetaan siemenistä, siemenkodan kuorista ja muista roskista. Puhdistus tehdään puuvillanpuhdistuskoneilla. Puhdistettu puuvilla paalataan ja lähetetään langan valmistukseen. Puhdistusvaihe kuluttaa paljon energiaa, sillä puuvillan kuivaus, puhdistus, paalaus ja käsittely tehdään

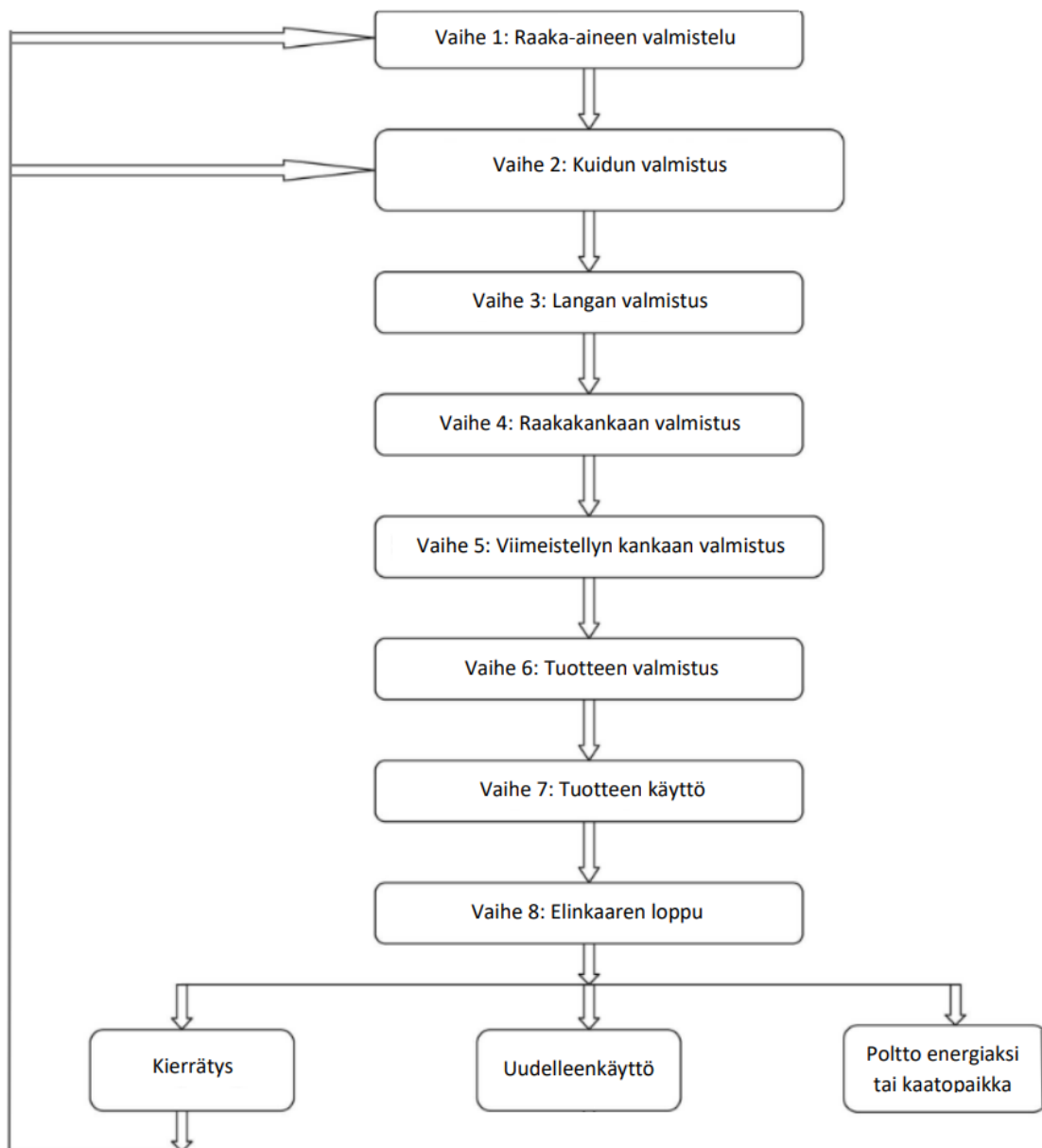
koneilla. (Ismail et al. 2011) Puhdistuksessa syntyy jätettä, joka sisältää lähinnä ligniiniä ja tuhkaa. Sitä ei voida hyödyntää eläinten rehuna, sillä se on ravintoarvoiltaan huonoa. Puhdistusjätettä voitaisiin kuitenkin hyödyntää energiana biopolttolaitoksissa. (Zabaniotou & Andreou 2010)

Puuvillapaalit avataan kehräämön avaus- ja puhdistusosastolla. Eri eristä tulevat kuidut voidaan sekoittaa paremman langanlaadun takaamiseksi. Puuvillasta poistetaan roskia esimerkiksi optisen laitteen avulla, joka havaitsee epäpuhtaudet ja poistaa ne ilmasuihkulla. (Wang & Memon 2020, s. 144–148) Tärkeä vaihe ennen kuidun kehräämistä on karstausta. Karstauksessa poistuu viimeisetkin roskat ja liian lyhyet kuidut. Karstauksen tavoitteena on kuitujen suoristaminen ja orientoiminen samansuuntaisiksi. (Wang & Memon 2020, s. 150) Puuvillakuidut voidaan kehrätä langaksi rengaskehrulla, avopääkehrulla tai ilmasuihkekehrulla (Wang & Memon 2020, s. 156–159).

Puuvillakangas voidaan valmistaa kutomalla tai neulomalla. Puuvillan värjäykseen voidaan käyttää useita erilaisia väriaineita, kuten reaktiivivärejä, kyypivärejä sekä luonnonvärejä. Ennen modernien värjäystekniikoiden kehittymistä puuvilla värjättiin luonnonväreillä. Esimerkiksi indigokasvista saatava sininen väriaine on ollut käytössä jo tuhansien vuosien ajan. (Wang & Memon 2020, s. 359–366) Ennen värjäystä puuvillaa voidaan esikäsitellä valkaisemalla tai merseroimalla. Värjäysprosessissa väriaine liuotetaan veteen ja liuokseen lisätään emästä värin tarttuvuuden parantamiseksi. Lopuksi väri kiinnitetään. (Wang & Memon 2020, s. 366–368)

### 3. YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Tekstiilikuidut ja tekstiilit aiheuttavat ympäristövaikutuksia jokaisessa elinkaaren vaiheessa. Tekstiilin elinkaaren vaiheet voidaan jaotella kuidun, langan, kankaan ja tuotteen valmistukseen sekä tuotteen käyttöön ja elinkaaren loppuun. Kuvassa 4 on esitetty kaaviokuva tekstiilituotteen elinkaaresta.



**Kuva 4.** Tekstiilituotteen elinkaari (muokattu lähteestä Muthu 2020, s. 12).



Tässä luvussa esitellään puuvilla- ja polyesterikuitujen ja niistä valmistettujen tekstiilien ympäristövaikutuksia eri elinkaaren vaiheissa. Luvussa keskitytään esittelemään niitä ympäristövaikutuksia, jotka eroavat puuvillalla ja polyesterillä. Luvussa käsitellään myös kirjallisuudessa esitettyjä tutkimustuloksia ja vertailuja puuvillan ja polyesterin ympäristövaikutuksista. Luvun lopussa pohditaan tekstiilikuitujen ympäristövaikutusten arvioimisen ja vertailun haasteita.

### 3.1 Kuidun tuotannon ympäristövaikutukset

Puuvillan kasvatuksesta aiheutuu sekä positiivisia että negatiivisia ympäristövaikutuksia. Positiiviseksi vaikutukseksi voidaan katsoa puuvillan fotosynteesivaikutus. Puuvillakasvi tuottaa fotosynteesissä happea ja sitoo ilmakehän hiilidioksidia. Puuvillan kasvatuksen negatiivisia ympäristövaikutuksia ovat maankäyttö, vedenkulutus sekä torjunta-aineiden ja lannoitteiden käyttö. (Muthu et al. 2012)

Eri lähteiden mukaan puuvillaa kasvatetaan 2,5–10 %:lla viljelyskelpoisesta maasta, mutta puuvillan tuotanto käyttää 16–45 % kaikista tuhohyönteisten torjunta-aineista (Ahmad & Hasanuzzaman 2020, s. 213; Muthu 2020, s. 18). Käytetyimpien torjunta-aineiden joukossa on valmisteita, jotka ovat Maailman terveysjärjestön mukaan ihmiselle erittäin haitallisia ja jopa vaarallisia. Eräs tuhohyönteismyrkkinä käytetty kemikaali, aldikarbi, on jo pienellä annostuksella ihmiselle tappavan myrkyllistä. Useat muut käytetyimmistä hyönteismyrkyistä luokitellaan karsinogeeneiksi. (Muthu 2020, s. 18)

Puuvillan kasvatuksessa käytetään paljon lannoitteita. Erään laskelman mukaan tarvitaan noin 300 g lannoitteita, jotta saadaan kasvatettua 1 kg raakapuuvillaa (Ellebæk Larsen et al. 2007). Suurin osa puuvillan kasvatuksessa käytetyistä lannoitteista on typpilannoitteita. Liiallinen typpilannoitus voi aiheuttaa typen oksidien päästöjä ilmakehään. Dityppioksidi on pitkäikäinen, noin 300 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu, joka aiheuttaa myös otsonikatoa. (Muthu 2020, s. 18) Liiallisen lannoituksen seurauksena lannoitteet voivat myös valua pelloilta vesistöihin aiheuttaen pohjaveden kontaminaatiota ja rehevöitymistä.

Puuvillan kasvatuksessa joudutaan yleensä käyttämään keinotekoista kastelua. Vedenkäytön ongelmat ilmenevät etenkin kuivilla alueilla, joilla puuvillan kastelu ja kastelueden hallinta on järjestetty huonosti. Kuivilla alueilla runsaan kastelun ja runsaan haihtumisen seurauksena maaperä voi suolaantua. Veden haihtuessa vesiliukoisia suoloja kerääntyy maan pintakerrokseen ja kasvien juuristovyöhykkeelle. Suolaantumisen seurauksena kasvien ravinteiden- ja vedenottokyky heikkenee ja maaperä muuttuu viljelykelvottomaksi. (Blackburn 2009, s. 37–38)

Vedenhallinta voidaan toteuttaa vastuullisesti, vaikka luonnollinen sadekastelu ei olisikaan mahdollista. Erilaisilla viljelymenetelmillä, kuten matalassa mullassa viljelyllä, maan suojaamisella ja luomuviljelyllä sekä tehokkailla kastelumenetelmillä voidaan kasvattaa puuvillaa kestävästi. Oleellista on huomioida paikalliset ilmasto-olosuhteet ja hyödyntää ratkaisuja, jotka toimivat juuri kyseisellä alueella. (Blackburn 2009, s. 38–40)

Puuvillan luomuviljelyssä vältetään synteettisten torjunta-aineiden ja lannoitteiden aiheuttamilta negatiivisilta ympäristövaikutuksilta. Luomuviljelyn periaatteiden mukaan viljelyssä ei saa käyttää synteettisiä torjunta-aineita eikä lannoitteita. Luomuviljelyssä otetaan huomioon paikalliset ekosysteemit sekä käytetään viljelytekniikoita, jotka tukevat ympäristön hyvinvointia. (IFOAM 2008) Luomutuotetun puuvillan edut perinteiseen puuvillaan nähden ovat luonnon monimuotoisuuden säilyminen, ympäristön turvallisuuden ja puhtauden ylläpitäminen sekä maaperän laadun paraneminen (Muthu 2020, s.19).

Puuvillan jalostuksella ja geenitekniikan sovelluksilla voidaan saada aikaan lajikkeita, jotka kestävät paremmin kuivuutta ja tuhohyönteisiä sekä tuottavat parempilaatuisia kuituja. On sekä taloudellisesti kannattavaa että ympäristöystävällistä jalostaa lajikkeita, joiden viljelyyn ei tarvita niin suuria määriä torjunta-aineita. Myös erilaisten kosteuden ja ravinteiden tarvetta mittaavien sensorien käyttö voi vähentää liiallista lannoittamista ja kastelua. (Kozlowski 2012, s. 21)

Puuvillan koneellinen sadonkorjuu kuluttaa energiaa ja aiheuttaa päästöjä. Kuidun käsittely ja langan valmistus ovat myös monivaiheisia prosesseja, joissa syntyy päästöjä. Päästöjä aiheutuu kuljetuksista, koneiden energiankäytöstä, kemikaalien käytöstä sekä prosesseissa syntyvästä jätteestä. Puuvillan kehräysprosessissa syntyy runsaasti pölyä, jonka hengittäminen voi aiheuttaa työntekijöille hengityselinten sairauksia. Puuvillan tapauksessa kehräämön avaus- ja puhdistusosasto kuluttaa noin 11 % energiasta, karstausta noin 12 %, rengaskehruu noin 37 % ja avopääkehruu noin 20 %. Tyypillisessä kehräämössä noin 78 % energiasta kuluu eri koneiden käyttöön. (Muthu 2020, s. 23–24)

Polyesterin tuotannossa käytetään fossiilisesta maaöljystä jalostettuja raaka-aineita. Fossiilisten eli uusiutumattomien raaka-aineiden käyttö ei ole kestävä, sillä niiden määrä on rajallinen. Polyesterin tuotannossa syntyy haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) päästöjä. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat ihmisten terveydelle haitallisia kaasumaisia aineita. VOC-päästöjä syntyy etenkin raaka-ainekemikaalien tuotannossa sekä värjäys- ja viimeistelyprosesseissa. (Qian et al. 2022)

Polyesterikuidun valmistuksessa energiaa kuluu sulakehruuseen, kuitujen vetämiseen sekä teksturointiin. Näiden prosessien osuus ei kuitenkaan ole merkittävä polyesterin tuotannon ympäristövaikutusten kannalta. Polyesterikankaan värjäyksellä ja viimeistelyllä on merkittävämmät ympäristövaikutukset, etenkin vesistö päästöjen kannalta. Myös tereftaalihapon tuotannon hiilijalanjälki on korkea. (Qian et al. 2021)

Polyesteriä voidaan valmistaa osittain biopohjaisista raaka-aineista. Tällä hetkellä on onnistuttu valmistamaan noin 30 % biopohjaisia raaka-aineita sisältävää PET:tä. (Textile Exchange 2021, s. 78) Polyetyleenifuranoaatti (PEF) on biopohjainen polymeeri, josta voidaan valmistaa ominaisuuksiltaan PET:tä vastaavia kuituja. PEF:n valmistukseen käytettävä kemikaali 2,5-furaanidikarboxyylihappo (FDCA) muistuttaa ominaisuuksiltaan PET:n valmistuksessa käytettävää tereftaalihappoa. Vaikka PEF on valmistettu biopohjaisista raaka-aineista, se ei ole biohajoavaa. Sitä voidaan kuitenkin kierrättää. (Höhnemann et al. 2021) Biopohjaisten raaka-aineiden tutkiminen on tärkeää, sillä niiden käytöllä voitaisiin vähentää tai jopa korvata fossiiliset raaka-aineet polymeerien tuotannossa.

Molemmilla materiaaleilla kankaan valmistus ja prosessointi kuluttaa energiaa. Energiaa kuluu kuljetuksiin ja koneiden käyttöön ja päästöjä syntyy kemikaalien käytöstä. Kudonnassa kuidun suojaamiseen ja liukastamiseen käytetään liisteröintiaineita. Liisteröintiaineet ovat tyypillisesti synteettisiä polymeerejä ja polysakkarideja. Kudonnan jälkeen liisteröintiaineet poistetaan kankaasta. Neulotun kankaan ympäristövaikutukset on todettu pienemmiksi, sillä neulonnassa on vähemmän prosessivaiheita kuin kudonnassa. (Muthu 2020, s. 24)

Myös kankaan käsittelystä ja värjäyksestä syntyy ympäristövaikutuksia. Rosan et al. (2019) tekemän vertailun mukaan puuvillan värjäys kulutti enemmän vettä ja energiaa kuin polyesterin värjäys. Vaikka polyesterin värjäys oli tutkimuksen mukaan myrkyllisempää, molempien materiaalien tapauksessa havaittiin värjäysvesien olevan haitallisia vesieliöille. Tästä syystä värjäysvesiä ei saisi päätyä ympäristöön. (Rosa et al. 2019) Sekä polyesterin värjäykseen käytetyt dispersiovärit että puuvillan värjäykseen käytetyt reaktiiviset värit ovat haitallisia ihmisille ja voivat aiheuttaa ihoärsytystä. (Ketema & Worku 2020).

Vaatteiden ja muiden tekstiilituotteiden valmistuksessa kuluu energiaa. Suurin osa energiasta kuluu tuotteiden ompeluun. Myös jätettä syntyy kankaan leikkaamisesta ja pilalle menneistä tuotteista. Tuotteiden valmistuksen ympäristövaikutukset eivät kuitenkaan ole merkittävät verrattuna muihin prosessivaiheisiin. (Muthu 2020, s. 26) Ennen kuin tekstiilit päätyvät kauppojen hyllylle ja kuluttajien käyttöön, niitä kuljetetaan

pitkiä matkoja valmistusmaista lopullisiin myynti- ja käyttömaihin. Tekstiilien kuljetuksesta syntyvät päästöt ovat kuitenkin pienet verrattuna muihin valmistuksen ja käyttövaiheen päästöihin (van der Velden et al. 2013).

### **3.2 Tekstiilin käytön aikaiset ympäristövaikutukset**

Myös tekstiilien käyttövaiheessa syntyvät ympäristövaikutukset ovat merkittäviä. Tekstiilien pesussa kuluu energiaa, vettä ja pesuainetta. Pesun ympäristövaikutusten merkittävyyttä voidaan perustella sillä, että sitä toistetaan useita kertoja. Yhden tuotteen valmistuksen ympäristövaikutukset syntyvät vain kerran, kun taas pesun ympäristövaikutukset toistuvat lukuisia kertoja tekstiilin elinkaaren loppuun saakka. (Laitala et al. 2018)

Datan kerääminen tekstiilien käytön ja pesun ympäristövaikutuksista on haastavaa, sillä ihmisten pesutottumukset vaihtelevat paljon yksilöittäin ja alueittain. Laitalan et al. (2018) tutkimuksen mukaan sekä puuvillaisia että polyesteristä valmistettuja tekstiilejä pestään tyypillisimmin pesukoneessa. Valittu pesuohjelma eli pesuveden määrä ja lämpötila sekä pesun kesto vaikuttavat pesun ekologisuuteen. Vaatteet olisi hyvä pestä vasta kun ne ovat likaisia, täyttää pesukone täyteen sekä käyttää oikea määrä pesuainetta. Tekstiilin oikeanlainen huolto takaa tuotteelle mahdollisimman pitkän käyttöiän.

Polyesteritekstiileistä irtoaa pesuveteen pieniä partikkeleja eli mikromuovia. Kuituja irtoaa myös luonnonkuituisista tekstiileistä, mutta ne eivät biohajoavuutensa ansiosta kuormita ympäristöä. Vaikka jätevedenpuhdistamoilla saadaan käsittelytavasta riippuen talteen noin 95–99 % mikromuovista, sitä kulkeutuu silti vesistöihin (Talvitie et al. 2017). On myös huomioitavaa, että kaikkialla maailmassa ei ole jätevesihuoltoa, vaan jätevedet päätyvät käsittelemättöminä vesistöihin.

Pienen kokonsa ansiosta mikromuovit kulkeutuvat eläinten ja eliöiden elimistöihin. Mikromuovit voivat aiheuttaa mereneläville perimävaurioita, muutoksia käytöksessä, lisääntymiskyvyn heikkenemistä ja jopa kuolemia. (Magalhães et al. 2020) Mikromuoveja on löydetty myös ihmisen elimistöstä (Schwabl et al. 2019; Ragusa et al. 2021).

Kelly et al. (2019) toteavat tutkimuksessaan suuren vesimäärän ja korkean lämpötilan lisäävän mikromuovien irtoamista pesussa. Tekstiilin ensimmäisellä pesukerralla pesuvedessä havaittiin enemmän mikromuovia kuin neljännen pesukerran jälkeen. Pesun kestolla ei todettu olevan vaikutusta mikromuovien määrään. (Kelly et al. 2019) Pesussa syntyviä mikromuovipäästöjä voi vähentää pesemällä vähässä vedessä ja niiden päätymistä jäteveeteen voi vähentää käyttämällä mikromuovien keräämiseen tarkoitettuja välineitä. Tällaisia ovat esimerkiksi pesukoneen poistoletkuun asennettavat

suodattimet sekä pesupussit (Napper et al. 2020). Myös esimerkiksi tekstiilien pesu ja mikromuovien talteenotto tehtaalla valmistuksen jälkeen voisi vähentää mikromuovipäästöjä.

### 3.3 Tekstiilin elinkaaren loppu

Jätelaissa määritellyn jätehuollon etusijajärjestyksen mukaan jätteen syntymistä on vältettävä. Tuotteen elinkaaren tulisi siis olla mahdollisimman pitkä ja tuotetta pitäisi pystyä huoltamaan ja korjaamaan. Jos jätettä syntyy, se tulisi ensisijaisesti valmistella uudelleenkäyttöä varten. (Jätelaki 2011/646, 2 luvun 8 §) Tekstiilejä voidaan käyttää uudelleen alkuperäiseen tai eri käyttötarkoitukseen. Tyypillistä on tekstiilien myyminen tai lahjoittaminen uusille omistajille. Uudelleenkäyttöä on myös tekstiilien hyödyntäminen esimerkiksi siivouksessa, askartelussa tai täytemateriaalina.

Jos uudelleenkäyttö ei ole mahdollista, tulee materiaali kierrättää (Jätelaki 2011/646, 2 luvun 8 §). Sekä puuvillaa että polyesteriä voidaan kierrättää. Polyesterin kierrätys on laajalti käytössä ja kierrätyskuitujen osuus kaikesta tuotetusta polyesteristä oli 15 % vuonna 2020 (Textile Exchange 2020, s. 73). Suurin osa kierrätetystä polyesteristä on peräisin PET-pulloista, mutta myös polyesteritekstiileitä voidaan kierrättää (Zamani et al. 2014). Polyestereitä voidaan kierrättää mekaanisesti, termisesti tai kemiallisesti. Mekaanisessa kierrätyksessä tekstiilit silputaan pienemmäksi ja revitään kuiduiksi. Kuidut kehrätään uudelleen langaksi tai käytetään kuitukankaan valmistukseen. (Muthu 2015, s. 108) Termisessä kierrätyksessä polymeeri sulatetaan ja sille annetaan uusi muoto (Shen et al. 2010).

Kemiallisessa kierrätyksessä polymeeri hajotetaan joko oligomeereiksi tai monomeereiksi. Glykolyysi on käytetyin kierrätysmenetelmä PET:lle. Glykolyysissä PET hajotetaan korkeassa lämpötilassa katalyytin avulla BHET:ksi, josta saadaan tuotettua PET:tä askelpolymeraation avulla. Hydrolyysissä PET hajotetaan korkeassa lämpötilassa ja paineessa tereftaalihapoksi ja etyleeniglykoliksi. Myös metanolyysissä tarvitaan korkeaa lämpötilaa ja painetta, jotta PET voidaan depolymeroida dimetyylitereftalaatiksi ja etyleeniglykoliksi. Muita kemiallisia kierrätysmenetelmiä PET:lle ovat ammonolyysi ja aminolyysi. (Payne & Jones 2021)

Termisen ja kemiallisen kierrätyksen erona on se, että kemiallisen kierrätyksen avulla saavutetaan yhtä hyvä laatu kuin käyttämällä neitseellisiä raaka-aineita. Termisessä kierrätyksessä polymeerin laatu heikkenee. Kemiallisten kierrätysmenetelmien haasteita ovat kalliit ja syövyttävät reagenssit sekä pitkät reaktioajat. Joitakin kierrätysmenetelmiä

voidaan käyttää epäpuhtaalle polymeerisyötteelle, kun taas toiset menetelmät soveltuvat vain puhtaalle PET:lle. (Payne & Jones 2021)

Polymeereistä on myös mahdollista ottaa talteen erilaisia raaka-aineita pyrolyysin avulla. Pyrolyysissä materiaalia kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa lämpötiloihin, joissa suurimolekyyliset aineet hajoavat pienemmiksi. Pyrolyysistä voidaan saada kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia tuotteita. Honusin et al. (2018) tutkimuksessa pyrolysoitiin eri polymeerejä ja otettiin talteen niistä syntyvät kaasut. PET:n pyrolyysissä syntyneen kaasun lämpöarvo oli pieni eli sen soveltuvuus polttoainekäyttöön on huono. (Honus et al. 2018)

Puuvillaa voidaan myös kierrättää sekä mekaanisesti että kemiallisesti. Mekaanisessa kierrätyksessä puuvillatekstiilit lajitellaan värin mukaan, silputaan pieniksi paloiksi ja avataan kuiduiksi. Näistä kuiduista kehrätään lankaa, josta voidaan valmistaa uutta kangasta. Mekaanisen kierrätyksen silppuamisvaihetta voidaan verrata ympäristövaikutuksiltaan neitseellisen puuvillan puhdistusvaiheeseen. (Esteve-Turillas & de la Guardia 2017)

Puuvillan kemiallinen kierrätys on mahdollista liuottamalla puuvillan selluloosa suspensioon ja regeneroimalla selluloosa kuiduiksi märkäkehrun tai kuivamärkäkehrun avulla. Selluloosan liuottamiseen käytettyjä liuottimia ovat muun muassa natriumhydroksidin ja hiilisulfidin vesiliuos (viskoosiprosessi), N-metyylimorfoliini-N-oksidi (NMMO) sekä ioniset nesteet. Viskoosiprosessin haittapuolena on hiilisulfidin myrkyllisyys. Lyocellin valmistuksessa käytetty NMMO sekä ioniset nesteet ovat ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja. (De Silva & Byrne 2017) Tällä hetkellä ionisten nesteiden käyttöönottoa hidastaa niiden korkea hinta sekä vähäinen tutkimustieto aiheesta (Meksi & Moussa 2017).

Kierrätyksen haasteena on materiaalien oikeanlainen lajittelu sekä kierrätysmenetelmien soveltuvuus ja tehokkuus. Kierrätyksestä aiheutuu myös useita kustannuksia, joten laskelmia kierrätyksen taloudellisesta kannattavuudesta tarvitaan. Jos kierrätys ei ole mahdollista tai se ei ole taloudellisesti tai ekologisesti kannattavaa, voidaan tekstiilijätteet hyödyntää energiana polttamalla. Poltossa ei kuitenkaan koskaan saada talteen sitä energiaa, joka tekstiilien valmistukseen on kulunut. Alueilla, joilla jätteiden poltto ei ole mahdollista, jätteet sijoitetaan kaatopaikoille. Kaatopaikkasijoituksessa menetetään sekä materiaali- että energiahyödyt. Polyesteri ei ole biohajoavaa, mutta se voi hajota mekaanisesti pieniksi partikkeleiksi ja aiheuttaa mikromuovipäästöjä maaperään. (Muthu 2020, s. 110–112)

### 3.4 Tutkimustuloksia

Muthu et al. (2012) esittävät artikkelissaan pisteytyssystemin, jonka avulla tekstiilikuiduille voidaan määrittää ympäristövaikutusindeksi ja ekologisen kestävyysindeksi. Laskennassa on otettu huomioon fotosynteesivaikutus eli tuotetun hapen määrä, uusiutuvien raaka-aineiden käyttö, maankäyttö, torjunta-aineiden ja lannoitteiden käyttö sekä kuitujen biohajoavuus ja kierrätettävyys. Myös energiankulutus, vedenkulutus sekä hiilidioksidipäästöt on huomioitu. Lopuksi on huomioitu myös vaikutukset ihmisten ja ekosysteemien terveyteen sekä luonnonvarojen laadun heikentyminen elinkaaren vaikutusarvioinnin perusteella. Huomioitavaa on, että tuotetun hapen määrälle ei löytynyt kirjallisuudesta arvoja, joita olisi voinut verrata tutkimuksessa käytettyihin arvoihin. (Muthu et al. 2012)

Ympäristövaikutusindeksi saadaan summaamalla kaikki tekijät vaikutuskertoimien yhteen. Ekologisen kestävyysindeksi saadaan suhteuttamalla kunkin kuidun ympäristövaikutusindeksi suurimpaan ympäristövaikutusindeksiin. Tällöin vertailun epäekologisin kuitu saa ekologisen kestävyysindeksin 0. Muthun et al. (2012) tarkastelun perusteella puuvilla sai ympäristövaikutusindeksin 16 ja polyesteri 30. Ekologisen kestävyysindeksit olivat puuvillalle 57 ja polyesterille 21. Luomutuotettu puuvilla sai ympäristövaikutusindeksin 11 ja ekologisen kestävyysindeksin 71, mitkä olivat koko vertailun parhaat tulokset. Vertailussa oli mukana perinteinen ja luomutuotettu puuvilla, lampaanvilla, pellava, Nylon 6, Nylon 66, polyesteri, polypropeeni, akryyli ja viskoosi. (Muthu et al. 2012)

Van der Veldenin et al. (2013) tekemän elinkaariarviointivertailun tulokset ovat päinvastaiset. Vertailussa on tarkasteltu materiaalin elinkaarta kehdestä hautaan -periaatteen mukaisesti. Vertailuun on sisällytetty hiilidioksidipäästöt, energiankulutus, toksisuus ihmisille ja ympäristölle, materiaalien kulutus sekä maankäyttö. Vertailussa ei ole huomioitu puuvillan hapentuotantoa tai kuitujen biohajoavuutta. Tässä vertailussa on materiaalin lisäksi huomioitu myös prosessoinnin, kuten langan kehruun ja kankaan valmistuksen ympäristövaikutukset. Vertailuanalyyssissä painotetaan langan paksuuden merkitystä ympäristövaikutusten kannalta. Tulosten mukaan suurempi langanpaksuus aiheuttaa pienemmät ympäristövaikutukset, sillä kehruun, kudonnan ja neulonnan energiankulutus pienenee langanpaksuuden funktiona. (van der Velden et al. 2013)

Van der Veldenin et al. (2013) vertailun tuloksena on määritetty ympäristökustannus kullekin materiaalille. Ympäristökustannuksilla tarkoitetaan kustannuksia, joilla voidaan pienentää syntyneet ympäristövaikutukset maapallon kantokyvyn sallimalle tasolle. Puuvillan ympäristökustannuksiksi on arvioitu noin 6,9 ja PET:n noin 5,4.

Ympäristökustannuksen yksikkö on euroa per kilogramma tekstiiliä. Nämä tulokset on saatu ohuesta langasta kudotulle kankaalle. Langanpaksuuden kasvaessa erot tasoittuvat hieman puuvillan ympäristökustannusten ollessa noin 4,4 ja PET:n 3,9. Vertailussa käy myös ilmi, että neulotun kankaan ympäristövaikutukset ovat pienemmät kuin kudotun kankaan, sillä energiankulutus pienenee suhteessa tuotettuun määrään. Vertailussa oli mukana puuvilla, akryyli, nailon, PET sekä elastaani. (van der Velden et al. 2013)

### 3.5 Ympäristövaikutusten arvioinnin haasteet

Tekstiilikuitujen ympäristövaikutusten arviointi ja vertailu ei ole yksinkertaista. Tekstiili- ja vaateteollisuudessa tuotanto on globalisoitunutta ja se on usein hajautunut laajalle alueelle. Tuotantoketjut ovat monimutkaisia ja sisältävät useita toimijoita. (Muthu 2020, s. 12) Koska ympäristövaikutuksia syntyy kaikissa tekstiilin elinkaaren vaiheissa, tulisi ympäristövaikutuksia arvioida koko tuotantoketjussa riittävällä tarkkuudella ja yhteisten standardien mukaisesti vertailtavuuden varmistamiseksi.

Eri ympäristötekijöiden painotukset vaikuttavat lopputulokseen ympäristövaikutuksia vertailtaessa. Edellisessä kappaleessa esiteltyjen Muthun et al. (2012) ja van der Veldenin et al. (2013) tutkimusten erilaiset tulokset selittyvät pitkälti erilaisilla painotuksilla. Muthun et al. (2012) tutkimuksessa huomioitiin puuvillan hapentuotanto ja biohajoavuus ja painotettiin puuvillakuidun positiivisia ympäristövaikutuksia negatiivisten vaikutusten ohella. Van der Veldenin et al. (2013) tutkimuksessa puolestaan huomioitiin vain kummankin kuidun negatiiviset ympäristövaikutukset.

Alueelliset erot tuotantomenetelmissä, energian alkuperässä, resurssien ja raaka-aineiden saatavuudessa, kuljetusmatkoissa, jätehuollossa sekä lainsäädännössä hankaloittavat ympäristövaikutusten globaalia tarkastelua ja vertailua. (Muthu 2020, s. 28) Esimerkiksi puuvillan tuotannon vedenkulutus eroaa huomattavasti vertailtaessa puuvillan viljelyä kuivilla alueilla, joilla tarvitaan runsaasti keinotekoisia kastelua ja trooppisilla vyöhykkeillä, joilla sadekastelua saadaan riittävästi. Kuidun tuotannon ympäristövaikutukset eroavat myös käytettäessä uusiutuvista tai uusiutumattomista lähteistä tuotettua energiaa.

Olemassa olevat tutkimukset ja vertailut on tehty tietyille alueille, eivätkä tulokset välttämättä päde koko maailman mittakaavassa. Van der Velden et al. (2013) tarkastelivat elinkaarianalyysissään Kiinassa tuotettua puuvillaa sekä Euroopassa tuotettua PET:tä. Analyysissä on tehty rajaus, että esimerkiksi sähkönkulutuksen ympäristövaikutuksia arvioitaessa on käytetty dataa Euroopan sähköverkosta, sillä



Kiinan ja Euroopan energiantuotannon ympäristövaikutukset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään. Tutkimuksessa on myös käytetty parhaan käyttökelpoisen tekniikan mukaista dataa Euroopan tehtailta, sillä tietoja Kiinan tehtailta ei ollut saatavilla. Ympäristövaikutusten suhteen on merkittävää ovatko käytössä olevat prosessit parhaan käyttökelpoisen tekniikan mukaisia. (van der Velden et al. 2013)

Tällaisia rajoituksia ja yksinkertaistuksia täytyy tehdä juuri tuotannon hajautuneisuuden ja kompleksisuuden vuoksi. Myös datan saatavuuteen ja todenmukaisuuteen liittyvien haasteiden takia tutkimuksissa joudutaan usein soveltamaan muualta kerättyä dataa eri kohteisiin. Koko maailman kattavaa tekstiilikuitujen absoluuttista vertailua lienee mahdotonta toteuttaa tässä kappaleessa esitettyjen haasteiden takia.

## 4. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin ja vertailtiin puuvilla- ja polyesteritekstiilikuitujen ympäristövaikutuksia elinkaaren eri vaiheissa. Luvussa 2 tarkasteltiin tekstiilikuitujen luokittelua sekä puuvillan ja polyesterin valmistusta. Luvussa 3 perehdyttiin yksityiskohtaisesti elinkaaren eri vaiheissa syntyviin ympäristövaikutuksiin. Taulukkoon 1 on koottu puuvillan ja polyesterin ympäristövaikutuksia, jotka eroavat toisistaan.

Taulukko 1. *Puuvillan ja polyesterin ympäristövaikutuksia*

<b>Puuvilla</b>	<b>Polyesteri</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suuri vedenkulutus</li> <li>• Maaperän suolaantuminen (kuivilla alueilla)</li> <li>• Lannoitteiden ja torjunta-aineiden käyttö</li> <li>• Suuri maapinta-alan käyttö</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uusiutumattomat, fossiiliset raaka-aineet</li> <li>• Biohajoamattomuus</li> <li>• Pesussa irtoava mikromuovi</li> <li>• VOC-päästöt</li> </ul>

Synteettisen kuidun ja luonnonkuidun ympäristövaikutukset ovat osittain päinvastaiset. Siinä missä luonnonkuitu on biohajoava ja uusiutuva materiaali, synteettinen kuitu valmistetaan tyypillisesti uusiutumattomista raaka-aineista. Synteettisten kuitujen valmistus puolestaan käyttää vähemmän maapinta-alaa ja vettä, kun taas luonnonkuidut tarvitsevat paljon peltoalaa ja kastelua kuidun kasvattamiseen. Jotkut ympäristövaikutukset ovat lähes samat kummallekin kuidulle. Esimerkiksi kankaan tuotanto, tuotteiden valmistaminen, kuljetukset ympäri maailmaa, pesun käyttämä vesi ja energia ovat lähes samat kummallekin materiaalille.

Tekstiilikuitujen ympäristövaikutuksiin vaikuttaa lukuisat asiat ja alueelliset erot hankaloittavat eri kuitujen vertailemista keskenään. Kuitujen ympäristöystävällisyyteen vaikuttavia tekijöitä voi myös painottaa eri tavoin. Jos vedenkulutuksen minimointi ja pienempi hiilijalanjälki ovat ensisijaisia tavoitteita, polyesteri on parempi vaihtoehto kuin puuvilla. Jos puolestaan halutaan painottaa luonnon monimuotoisuuden säilymistä, biohajoavuutta sekä uusiutuvia raaka-aineita, luomutuotettu puuvilla on parempi vaihtoehto kuin polyesteri. Sellaista tekstiilikuitua ei ole olemassakaan, joka ei elinkaarensa aikana aiheuttaisi ollenkaan ympäristövaikutuksia.

Tässä työssä päästiin siihen lopputulokseen, että ei voida yksiselitteisesti määrittää onko puuvilla tai polyesteri ympäristöystävällisempi kuin toinen. Molemmilla kuiduilla on

etunsa ja haittansa. Jos haluaa minimoida kuluttamiensa tekstiilien ympäristövaikutuksia, kannattaa suosia käytettyä tekstiilejä uusien sijaan. Ostamalla käytettyä vältetään valmistuksen aiheuttamilta ympäristövaikutuksilta. Jos käytettynä hankkiminen ei ole mahdollista, on hyvä suosia vastuullisia tuottajia. Vastuullinen tuottaja kertoo läpinäkyvästi tuotantoketjustaan ja suosii vastuullisia alihankkijoita. Myös tekstiilin oikeanlaisella huollolla voidaan vähentää käytön aikaisia ympäristövaikutuksia. Tekstiilit olisi hyvä korjata niiden rikkoutuessa ja ne tulisi pestä ohjeiden mukaan ja vasta kun ne ovat likaisia.

Tärkeää on käyttää tekstiilit loppuun asti, eikä heittää niitä pois enneaikaisesti. Kun tekstiilin elinkaari tulee päätökseen, sille tulisi ensisijaisesti löytää uusi omistaja tai uusi käyttötarkoitus. Jos uudelleenkäyttö ei ole mahdollista, tulisi tekstiili kierrättää materiaalina. Jos tekstiili on kuitenkin niin huonokuntoinen, että kierrätys ei onnistu, voi sen myös polttaa energiaksi.

## LÄHTEET

Ahmad, S. & Hasanuzzaman, M. (2020). *Cotton Production and Uses*. Springer, Singapore. 641 p.

Blackburn, R. (2009). *Sustainable textiles: life cycle and environmental impact*. Woodhead Publishing, Cambridge. 417 p.

De Silva, R. & Byrne, N. (2017). Utilization of cotton waste for regenerated cellulose fibres: Influence of degree of polymerization on mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*. Vol.174, pp. 89–94.

Eichhorn, S., Hearle, J., Jaffe, M. & Kikutani, T. (2009). *Handbook of Textile Fibre Structure, Volume 1 - Fundamentals and Manufactured Polymer Fibres*. Woodhead Publishing, Cambridge. 523 p.

Ellebæk Larsen, S., Hansen, J., Knudsen, H., Wenzel, H., Larsen, H., Møller Kristensen, F. (2007). EDIPTX – Environmental assessment of textiles. Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency. Working Report No. 24. Saatavissa (viitattu 22.4.2022): (PDF) EDIPTX - Environmental assessment of textiles (researchgate.net)

Ellen MacArthur Foundation (2017). *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. 148 p. Saatavissa (viitattu 27.2.2022): <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>

Esteve-Turillas, F. & de la Guardia, M. (2017). Environmental impact of Recover cotton in textile industry. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol.116, pp. 107–115.

European Topic Centre Waste and Materials in a Green Economy (2019). *Textiles and the environment in a circular economy*. 60 p. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): [file:///C:/Users/Hanni/Downloads/ETC-WMGE\\_report\\_final%20for%20website\\_updated%202020.pdf](file:///C:/Users/Hanni/Downloads/ETC-WMGE_report_final%20for%20website_updated%202020.pdf)

Fang, D. (2018). *Cotton Fiber: Physics, Chemistry and Biology*. Springer International Publishing, Cham. 222 p.

Finnwatch (2022). *Mitä pikamuodin jälkeen? Oikeudenmukainen ekologinen siirtymä vaate- ja tekstiiliteollisuudessa*. Päivitetty 10.2.2022. 62 s. Saatavissa (viitattu 27.2.2022): [https://finnwatch.org/images/reports\\_pdf/Mita\\_pikamuodin\\_jalkeen\\_-\\_raportti\\_2.pdf](https://finnwatch.org/images/reports_pdf/Mita_pikamuodin_jalkeen_-_raportti_2.pdf)

Honus, S., Kumagai, S., Fedorko, G., Molnár, V. & Yoshioka, T. (2018). Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part I: Production and physical properties. *Fuel (Guildford)*. Vol.221, pp. 346–360.

Hufenus, R., Yan, Y., Dauner, M. & Kikutani, T. (2020). Melt-spun fibers for textile applications. *Materials*. Vol.13(19), pp.1–32.

Höhnemann, T., Steinmann, M., Schindler, S., Hoss, M., König, S. & Ota, A. et al. (2021). Poly(Ethylene Furanoate) along Its Life-Cycle from a Polycondensation Approach to High-Performance Yarn and Its Recyclate. *Materials*. Vol.14(4), pp. 1–15.

International Federation of Organic Agricultural Movement (2020). Principles of Organic Agriculture. 4 p. Saatavissa (viitattu 14.4.2022):  
[https://www.ifoam.bio/sites/default/files/2020-03/poa\\_english\\_web.pdf](https://www.ifoam.bio/sites/default/files/2020-03/poa_english_web.pdf)

Ismail, S., Chen, G., Baillie, C. & Symes, T. (2011). Energy uses for cotton ginning in Australia. *Biosystems engineering*. Vol.109(2), pp. 140–147.

Jäteläki 2011/646. Saatavissa (viitattu 18.4.2022):  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646#L2P8>

Kelly, M., Lant, N., Kurr, M. & Burgess, J. (2019). Importance of Water-Volume on the Release of Microplastic Fibers from Laundry. *Environmental Science & Technology*. Vol.53(20), pp. 11735–11744.

Kozłowski, R. (2012). *Handbook of Natural Fibres: Volume 1: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation*. Elsevier Science & Technology, Cambridge. 649 p.

Laitala, K., Klepp, I. & Henry, B. (2018). Does Use Matter? Comparison of Environmental Impacts of Clothing Based on Fiber Type. *Sustainability*. Vol.10(7), pp. 2524–2550.

Magalhães, S., Alves, L., Medronho, B., Romano, A. & Maria da Graça Rasteiro (2020). Microplastics in Ecosystems: From Current Trends to Bio-Based Removal Strategies. *Molecules*. Vol.25(17), pp. 3954–3974.

Mather, R. & Wardman, R. (2015). *Chemistry of Textile Fibres (2<sup>nd</sup> Edition)*. Royal Society of Chemistry, Cambridge. 419 p.

McKinsey & Company (2020). *Fashion on Climate*. 52 p. Saatavissa (viitattu 27.2.2022):  
<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/retail/our%20insights/fashion%20on%20climate/fashion-on-climate-full-report.pdf>

Meksi, N. & Moussa, A. (2017). A review of progress in the ecological application of ionic liquids in textile processes. *Journal of cleaner production*. Vol.161, pp. 105–126.

Muthu, S. (2015). *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Elsevier Science & Technology, Cambridge. 365 p.

Muthu, S. (2020). *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain*. Woodhead Publishing. 204 p.

Muthu, S., Li, Y., Hu, J. & Mok, P. (2012). Quantification of environmental impact and ecological sustainability for textile fibres. *Ecological Indicators*. Vol.13(1), pp. 66–74.

Napper, I., Barrett, A. & Thompson, R. (2020). The efficiency of devices intended to reduce microfibre release during clothes washing. *Science of the Total Environment*. Vol.738, pp. 140412–140420.

Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T. & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*. Vol.1(4), pp. 189–200.

- Payne, J. & Jones, M. (2021) The Chemical Recycling of Polyesters for a Circular Plastics Economy: Challenges and Emerging Opportunities. *ChemSusChem*. Vol.14(19), pp. 4041–4070.
- Qian, W., Guo, Y., Wang, X., Qiu, X., Ji, X. & Wang, L. et al. (2022). Quantification and assessment of chemical footprint of VOCs in polyester fabric production. *Journal of Cleaner Production*. Vol.339, pp. 130628–130635.
- Qian, W., Ji, X., Xu, P. & Wang, L. (2021). Carbon footprint and water footprint assessment of virgin and recycled polyester textiles. *Textile Research Journal*. Vol.91(21–22), pp. 2468–2475.
- Quantis (2018). *Measuring fashion, Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries Study*. 65 p. Saatavissa (viitattu 27.2.2022): [https://quantis-intl.com/wp-content/uploads/2018/03/measuringfashion\\_globalimpactstudy\\_full-report\\_quantis\\_cwf\\_2018a.pdf](https://quantis-intl.com/wp-content/uploads/2018/03/measuringfashion_globalimpactstudy_full-report_quantis_cwf_2018a.pdf)
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V. & Carnevali, O. et al. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*. Vol.146, pp. 106274–106282.
- Rosa, J., Garcia, V., Boiani, N., Melo, C., Pereira, M. & Borrelly, S. (2019). Toxicity and environmental impacts approached in the dyeing of polyamide, polyester and cotton knits. *Journal of Environmental Engineering*. Vol.7(2), pp. 102973–102980.
- Schwabl, P., Koppel, S., Konigshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M. & Reiberger, T. et al. (2019). Detection of Various Microplastics in Human Stool: A prospective case series. *Annals of internal medicine*. Vol.171(7), pp. 453–457.
- Sinclair, R. (2015). *Textiles and fashion: materials, design and technology*. Elsevier Science & Technology, Cambridge. 895 p.
- Stewart, J., Oosterhuis, D., Heitholt, J. & Mauney, J. (2010). *Physiology of Cotton*. Springer, Dordrecht. 563 p.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A. & Setälä, O. (2017). Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water research*. Vol.123, pp. 401–407.
- Textile Exchange (2021). *Preferred Fiber & Materials Market Report 2021*. 118 p. Saatavissa (viitattu 28.2.2022): [https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2021/08/Textile-Exchange\\_PREFERRED-Fiber-and-Materials-Market-Report\\_2021.pdf](https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2021/08/Textile-Exchange_PREFERRED-Fiber-and-Materials-Market-Report_2021.pdf)
- van der Velden, N., Patel, M. & Vogtländer, J. (2013). LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. *The International journal of life cycle assessment*. Vol.19(2), pp. 331–356.
- Wang, H. & Memon, H. (2020). *Cotton Science and Processing Technology*. Springer, Singapore. 565 p.
- Zabaniotou, A. & Andreou, K. (2010). Development of alternative energy sources for GHG emissions reduction in the textile industry by energy recovery from cotton ginning waste. *Journal of Cleaner Production*. Vol.18(8), pp. 784–790.

Zamani, B., Svanström, M., Peters, G. & Rydberg, T. (2014). A Carbon Footprint of Textile Recycling: A Case Study in Sweden. *Journal of Industrial Ecology*. Vol.19(4), pp. 676–687.