



Heidi Ahoste

Tekstiilien kierrätyksen ympäristö- vaikutukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

1.9.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Heidi Ahoste
Otsikko: Tekstiilien kierrätyksen ympäristövaikutukset
Sivumäärä: 39 sivua + 3 liitettä
Aika: 1.9.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine: Ympäristötekniikka
Ohjaajat: Toimitusjohtaja Antti Niskanen
Lehtori Ismo Halonen

Tämän LCA Consulting Oy:lle tehdyn insinööriyön tavoitteena oli selvittää poistotekstiilien eri kierrätysmenetelmiä ja niiden ympäristövaikutuksia. Poistotekstiilien erilliskeräys tulee kunnille pakolliseksi vuoden 2023 alussa. Erilliskerätyt tekstiilit päätyvät Turun seudulle Lounais-Suomen Jätehuolto Oy:lle mekaanisesti kierrätettäviksi. Työssä tutkittiin myös toistaiseksi vähemmän hyödynnettyjä kemiallisia ja termisiä kierrätysmenetelmiä.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja siinä vertailtiin yhteensä 15:tä tieteellistä artikkelia, lopputyötä sekä yritysten julkaisemaa arvoa poistotekstiilien kierrätyksen ympäristövaikutuksista. Tutkimuksissa tarkasteltiin pääasiassa kierrätysmenetelmien kasvihuonekaasupäästöjä ja vedenkulutusta joko energiahyödyntämiseen tai neutraalisen kuidun valmistukseen. Muut ympäristövaikutukset, kuten rehevöitymisen ja happamoitumisen tarkastelu, jäivät uupumaan useimmista tutkimuksista.

Tutkituista julkaisuista saatiin tulokseksi, että kaikki kierrätysmenetelmät, pois lukien selluloosakarbonsaatti-prosessi, tuottivat vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin neutraalisen kuidun valmistus. Vedenkulutus kierrätysprosesseissa oli myös hyvin vähäistä. Tekstiilien poltosta saadut ympäristöhyödyt eivät olleet yksiselitteisiä. Pääasiassa kuitenkin synteettisten kuitujen polttamisesta katsottiin olevan enemmän haittaa kuin mitä hyötyjä energiantuottamisen korvaamisella voitiin saavuttaa.

Työssä tarkasteltujen lähteiden perusteella voitiin päätellä, että tekstiilien uudelleenkäyttö on parempi vaihtoehto kuin niiden kierrättäminen. Toisaalta etenkin synteettisten tekstiilien kierrätyksen ympäristöhyödyt olivat suuremmat kuin tekstiilien polttamisella saavutetut. Kierrätysmenetelmistä mekaaninen kierrätys osoittautui edullisimmaksi ja vähiten ympäristöä kuormittavaksi vaihtoehdoksi, mutta toisaalta muut menetelmät toimivat hyvänä lisävaihtoehtona tai jatkojalostusmahdollisuutena mekaanisesti kierrätetyille kuduille.

Avainsanat: kierrätys, poistotekstiilit, elinkaariarviointi, ympäristövaikutukset

Abstract

Author: Heidi Ahoste
Title: Environmental Impacts of Textile Recycling
Number of Pages: 39 pages + 3 appendices
Date: 1 September 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Professional Major: Environmental Engineering
Supervisors: Antti Niskanen, Chief Executive Officer
Ismo Halonen, Senior Lecturer

This thesis was conducted for LCA Consulting Oy. The goal was to examine the different recycling methods of discarded textiles and their environmental effects. The separate collection of end-of-life textiles will become mandatory for municipalities at the beginning of year 2023. Separately collected textiles are taken to Lounais-Suomen Jätehuolto Oy in the Turku region and are then mechanically recycled. In this thesis less used chemical and thermal recycling methods were also studied.

In this thesis, a total of 15 scientific articles, theses and values published by companies were compared. The studies mainly compared the greenhouse gas emissions and water consumption of recycling methods to either energy recovery or the production of virgin fibers. Other environmental effects, such as eutrophication and acidification, were left out of examination in most studies.

The researched publications showed that all recycling methods, excluding cellulose carbamate process, produced less greenhouse gas emissions than virgin fiber production. Water consumption in recycling processes was also low. The environmental benefits obtained from combustion of textiles were not unambiguous. However, the energy recovery of synthetic fibers was considered to cause more harm than benefits that could be achieved by substituting energy production.

On the basis of the sources examined in the work, it can be concluded that reusing textiles is a better option than recycling them. On the other hand, the environmental benefits of recycling were greater than those achieved by combusting textiles, especially when synthetic fibers were considered. Of the recycling methods, mechanical recycling was found to be the least expensive and burdening option for the environment; however, other methods serve as a good additional option or as a further processing option for mechanically recycled fibers.

Keywords: recycling, end-of-life textiles, LCA, environmental impact

Sisällys

Lyhenteet

Käsitteet

1	Johdanto	1
2	Tekstiilien kierrätyksen lainsäädäntö ja standardit	2
2.1	Tekstiilien kierrätystä koskeva lainsäädäntö	2
2.2	Tekstiilien kierrätystä koskevat standardit	4
3	Kierrätyksen nykytila ja tavoitteet	4
3.1	Poistotekstiilien käsittelyn nykytila Suomessa	5
3.2	Poistotekstiilien laatu	7
3.3	Kierrätyksen tavoitetila	8
3.4	Erilliskeräyksen palvelutasovaatimukset	9
4	Kierrätysmenetelmät	9
4.1	Uusio- ja uudelleenkäyttö	10
4.2	Mekaaninen kierrätys	11
4.2.1	Prosessi	11
4.2.2	Lopputuotteet	14
4.3	Kemiallinen kierrätys	16
4.3.1	Kierrätys polymeereinä	17
4.3.2	Kierrätys monomeereinä	20
4.4	Terminen kierrätys	21
4.5	Energiahöydyntäminen	23
5	Elinkaariarviointimenetelmä	25
6	Tekstiilien kierrätyksen ympäristövaikutusten arviointi	26
6.1	Tutkimustuloksia mekaanisesta kierrätyksestä	27
6.2	Tutkimustuloksia kemiallisesta kierrätyksestä	29
6.3	Muita tutkimustuloksia tekstiilien kierrätyksestä	32
7	Johtopäätökset	36

7.1 Tulosten arviointi	36
7.2 Pohdinta	37
8 Yhteenveto	38
Lähteet	40
Liitteet	
Liite 1: Työn tilaajan asettamat kysymykset	
Liite 2: Neitseellisten kuitujen valmistuksen päästöt ja energiankulutus	
Liite 3: Mekaanisen kierrätyksen vaikutusarviointilaskennan lähtötiedot	

Lyhenteet

- CCA: *Cellulose carbamate*. Selluloosakarbamaatti.
- CO_{2e}: Hiilidioksidiekvivalentti. Kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitta, jonka avulla voidaan laskea yhteen eri kasvihuonekaasupäästöjen vaikutus kasvihuoneilmiön voimistumiseen.
- [DBHN][OAc]:
1,5-Diazabicyclo [4.3.0] non-5-enium acetate. Ioninen liuotin.
- DMT: Dimetyylitereftalaatti. Polyesterin valmistuksessa käytettävä aine.
- FU: *Functional unit*. Toiminnallinen yksikkö.
- GWP: *Global Warming Potential*. Ilmastonlämpenemispotentiaali. Ilmaisee eri kasvihuonekaasujen suhteellisen ilmastoa lämmittävän voimakkuuden. Yksikkö CO_{2e}.
- HSY: Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY.
- LSJH: Lounais-Suomen Jätehuolto Oy.
- LUT: LUT-yliopisto. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT.
- NMMO: N-metyylimorfoliini-N-oksidi. Orgaaninen yhdiste, jota käytetään selluloosan liuottamisessa.
- OC(NH₂)₂: Karbamidi eli urea.
- PEG: Polyetyleeniglykoli. Voidaan käyttää mekaanisessa kierrätyksessä kuitupituuden säilyttämiseksi.

PET: Polyetyleenitereftalaatti. Yleisin polyesterikuiduissa käytetty polymeeri.

SYKE: Suomen ympäristökeskus.

VTT: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.

Käsitteet

Avoin kierto:

Käytetyn tuotteen tai sen osan tai prosessijätteen käyttö muunlaisten tuotteiden raaka-aineena tai energiatuotannossa.

Depolymerointi:

Prosessi, jossa polymeerit saatetaan monomeereiksi.

Downcycle: Tavarain tai materiaalin kierrättäminen niin, että sen arvo tai laatu laskee.

Elinkaariarviointi:

Tuotejärjestelmän elinkaaren aikaisten syötteiden ja tuotosten sekä potentiaalisten ympäristövaikutusten koostaminen ja arviointi.

Lämpöarvo: Kertoo kuinka paljon täydellisessä palamisessa kehittyä lämpöä polttoaineen massaa kohti.

Metanolyysi:

Katalyyttinen prosessi, jossa käytetään korkean lämpötilan ja korkean paineen metanolia PET:n hajottamiseksi dimetyylitereftalaatiksi (DMT).

Poistotekstiili:

Tekstiilituote, joka on omistajalleen tarpeeton. Viittaa usein käytöstä poistettuun, kierrätykseen päätyvään tekstiiliin.

Post-consumer:

Kuluttajilta peräisin oleva tuote tai jäte.

Pre-consumer:

Teollisuudesta ja sen sivuvirroista peräisin oleva tuote tai jäte.

Suljettu kierto:

Tuotteiden sisältämät materiaalit kiertävät käytön jälkeen uusien vastaavien tuotteiden raaka-aineeksi.

Upcycle: Tavarahan tai materiaalin uusiokäyttö niin, että niiden arvo tai laatu nousee.

Uudelleenkäyttö:

Tuotteen tai sen osan käyttäminen uudelleen samaan tarkoitukseen kuin mihin se on alun perin suunniteltu.

Uusiokäyttö:

Tuotteen kierrätys takaisin tuotannon raaka-aineeksi.

1 Johdanto

Tekstiilien kulutus ja materiaalien kysyntä kasvaa globaalisesti noin 4 % vuodessa, tämänhetkisen tuotannon ollessa noin 100 milj. t/a [1]. Samalla lisääntyvät myös ympäristöön kohdistuvat vaikutukset. Kokonaisuudessaan tekstiiliteollisuuden on arvioitu tuottavan prosesseissaan 92 milj. t jätettä vuodessa [2], ja vastaavan noin 8–10 %:sta maailman hiilidioksidipäästöistä ollen näin maailmanlaajuisesti yksi eniten kasvihuonekaasuja tuottava teollisuudenala. [3, s. 23; 4; 5.] Lisäksi tekstiiliteollisuus on arvioiden mukaan neljänneksi suurin luonnonvarojen kuluttaja, käyttäen esimerkiksi noin 93 miljardia m³ vettä vuosittain [6; 7, s. 14]. Tekstiiliteollisuuden kemikaalit sekä synteettisten kuitujen käytöstä irtoavat mikromuovit saastuttavat luontoon päästessään vesistöjä ja muita ekosysteemejä [7, s. 14].

Suomessa syntyi vuonna 2019 poistotekstiilejä arvion mukaan 85 773 t, eli noin 15,6 kg/asukas [8, s. 23], EU:n keskiarvon ollessa noin 11 kg tekstiilijätettä/asukas/a [9]. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto arvioi, että vuonna 2018 Yhdysvalloissa tuotettiin tekstiilijätettä 15,4 milj. t eli jopa 47 kg/asukas [10]. Maailmanlaajuisesti noin 1 % kaikesta käytetystä poistetuista tekstiileistä kierrätetään uusiksi vastaaviksi tuotteiksi, vaikka arvioiden mukaan jopa 70 % voitaisiin hyödyntää suljetussa kierrossa [7, s. 7].

Tekstiilien tuotanto ei ole nykyisellään kestävä, ja on tärkeää, että jätteeksi päätyvät tekstiilimateriaalit saataisiin jatkossa hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti. Tämän insinööriyden tavoitteena on selvittää poistotekstiilien eri kierrätysmenetelmiä ja niiden ympäristövaikutuksia. Tekstiilien valmistuksen ympäristövaikutuksia käytetään tarkastelluissa tutkimuksissa vertailuarvoina, mutta muuten niitä ei tulla käsittelemään työssä tarkemmin. Työn tilaaja voi hyödyntää tätä kirjallisuustutkimusta tietolähteenä omissa projekteissaan. Tarkentavat tutkimuskysymykset on kirjattu liitteeseen 1.

Insinööriyön tilaajana toimii LCA Consulting Oy, joka on vuonna 2013 perustettu Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopisto LUT:in spin-off-yritys. Yritys tarjoaa esimerkiksi organisaatioille ja kaupungeille ympäristöalan asiantuntijapalveluita. Yrityksen tarjoamia palveluita ovat hiilijalanjäljen laskenta, elinkaarivaihtoindexit, erilaiset koulutukset sekä jätehuoltopalvelut. LCA Consulting Oy myi omistuksensa teknologiapalveluyritys Etteplan Oy:lle toukokuussa 2022. [11; 12.]

2 Tekstiilien kierrätyksen lainsäädäntö ja standardit

2.1 Tekstiilien kierrätystä koskeva lainsäädäntö

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä (2018/851) on asetettu, että EU:n jäsenvaltioiden on järjestettävä tekstiilien erilliskeräys viimeistään 1.1.2025 alkaen. Lisäksi jäsenvaltioiden tulee ehkäistä jätteiden syntymistä, esimerkiksi rohkaisemalla tekstiilien uudelleenkäyttöä ja edistämällä tuotteiden korjausvaihtoehtoja. Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto katsovat direktiivissä, että materiaaleja tulisi jatkossa hyödyntää yhä enemmän muuten kuin energiana ja että tekstiilien tuottajavastuuta olisi laajennettava. [13, artikla 9 kohta 1, artikla 11 kohta 1.]

Valtioneuvoston asetuksen (978/2021) mukaan Suomessa kuntien on kuitenkin järjestettävä kuluttajilta peräisin olevan tekstiilijätteen alueellinen vastaanotto jo 1.1.2023 alkaen. Myös muussa kuin asumisessa syntyville jätteille on järjestettävä erilliskeräys jätteen haltijan toimesta 1.7.2023 lähtien [14, § 20 momentti 1 kohta 3, § 21 momentti 1 kohta 5, § 55 momentti 4 ja 5.] Tekstiilijätteen erilliskeräyksestä voidaan poiketa, mikäli keräyksen kokonaistulos ei ole ympäristövaiikutusten kannalta suotuista tai jos keräys ei ole teknisesti toteutettavissa tai sen kustannukset ovat kohtuuttomat [15, § 15 kohta 2–3].

Tekstiilien erilliskeräyksellä pyritään siihen, että arvokkaat materiaalit saadaan hyötykäytettyä uusiomateriaaleina energiahyödyntämisen sijasta. Luonnonvarojen säästäminen ja tehokas käyttö on tärkeää, koska muun muassa väestönkasvun myötä myös resursseja kuluu enemmän. [16, s. 4.]

Erilliskerättyä jätettä ei lain mukaan saa toimittaa poltettavaksi ennen kierrätystä tai uudelleenkäytön valmistelua. Kuitenkin näissä prosesseissa syntyvä jäte voidaan myöhemmin toimittaa energiahyödynnettäväksi tai sijoittaa kaatopaikalle, jos näillä toimilla saavutetaan etusijajärjestyksen näkökulmasta paras tulos. [15, § 15a.]

Jätelaissa on asetettu etusijajärjestyksestä seuraavasti:

- Ensisijaisesti tulisi aina vähentää syntyvän jätteen määrää.
- Jos jätettä syntyy, se tulee valmistella mahdollista uudelleenkäyttöä varten esimerkiksi puhdistamalla tuotteet.
- Jos uudelleenkäyttö ei ole mahdollista, jäte tulee kierrättää uusiomateriaalina.
- Jos kierrättäminen ei ole mahdollista, tuote hyödynnetään esimerkiksi energiana.
- Syntynyt jäte loppusijoitetaan kaatopaikalle, mikäli mikään yllä mainituista menetelmistä ei ole teknisesti tai taloudellisesti mahdollista. [15, § 8 momentti 1.]

Euroopan komission tiedonanto EU:n kestäviä ja kiertotalouteen perustuvia tekstiilejä koskevasta strategiasta käsittelee keinoja, joilla tekstiiliala EU:ssa saataisiin siirtymään kestäväälle pohjalle. Strategian tavoitteena on, että viimeistään vuonna 2030 EU:n alueella saatavilla olevat tekstiilituotteet olisivat pitkäikäisiä ja käytön lopussa kierrätettäviä, valmistettu pääosin kierrätetyistä materiaaleista eivätkä sisältäisi vaarallisia kemikaaleja. Tavoitteisiin päästään esimerkiksi vaatimalla tekstiilivalmistajia ottamaan ekologiset näkökohdat paremmin huomioon suunnitteluvaiheessa sekä laajentamalla yrityksiin kohdistuvaa tuottajavastuuta. [17, s. 3.]

2.2 Tekstiilien kierrätystä koskevat standardit

Textile Exchange on laatinut kaksi kansainvälistä standardia kierrätettyihin tekstiileihin liittyen. The Recycled Claim Standardi (RCS) ja Global Recycled Standardi (GRS) ohjaavat kierrätystuote-käsitteen yhtenäistämistä ja pyrkivät lisäämään kierrätettyjen raaka-aineiden kysyntää. Kyseisissä standardeissa ei kuitenkaan aseteta laatuvaatimuksia tuotteille, vaan kyseessä on enemmänkin taaketta kierrätysmateriaalin riittävästä osuudesta tuotteessa ja GRS:n kohdalla myös ympäristönäkökohtien huomioimisesta. [18.]

Tekstiilien kierrätykseen tai kierrätyskuidun käyttöön ei ole vielä laadittu Suomessa tai kansainvälisesti vahvistettuja standardeja (SFS-, EN- tai ISO-standardit). Suomessa SFS/SR 174 -standardisointiryhmä seuraa ja osallistuu tekstiilejä sekä tekstiilien kiertotaloutta koskevien standardien laatimiseen. Tällä hetkellä Euroopassa ollaan koostamassa standardeja tekstiilien mikromuoveihin ja kiertotalouteen liittyen. Tekstiilien erilliskeräyksen tullessa pakolliseksi, myös kierrätyskuidun valmistajien ja hyödyntäjien voidaan olettaa lisääntyvän. Standardien avulla alasta saadaan yhtenäisempi ja luotettavampi. [19; 20, s. 8.]

3 Kierrätyksen nykytila ja tavoitteet

Poistotekstiilillä tarkoitetaan kaikkea sitä tekstiiliä, joka on omistajalleen tarpeetonta. Käsite kattaa siis sekä tekstiilijätteet eli käytöstä poistetut tekstiilit että uudelleenkäytettävät tekstiilit. Uudelleenkäytöllä viitataan tekstiilituotteen tai sen osan käyttöön alkuperäisessä tarkoituksessaan. Poistotekstiilit ovat kotitalouksien lisäksi peräisin esimerkiksi pesuloista, hyväntekeväisyysjärjestöistä ja teollisuuden sivuvirroista. [21, s. 3; 22, s. 5.]

Poistotekstiilien keräyksellä viitataan usein kierrätyskelpoisen tekstiilijätteen keräykseen. Myös tässä työssä käytetään jätehuoltoyritysten toiveiden mukaisesti termiä poistotekstiili, käytöstä poistetuista, kierrätykseen päätyvistä tekstiileistä. Keräykseen kelpaavia tuotteita ovat kuivat ja puhtaat, mutta käyttökelvottomat vaatteet ja kodintekstiilit, kuten rikkiiniset paidat ja lakanat. Esimerkiksi kengät

ja alusvaatteet sekä homeiset ja tuholaisia sisältävät tuotteet tulee edelleen hävittää poltettavan jätteen mukana. [23; 24]

3.1 Poistotekstiilien käsittelyn nykytila Suomessa

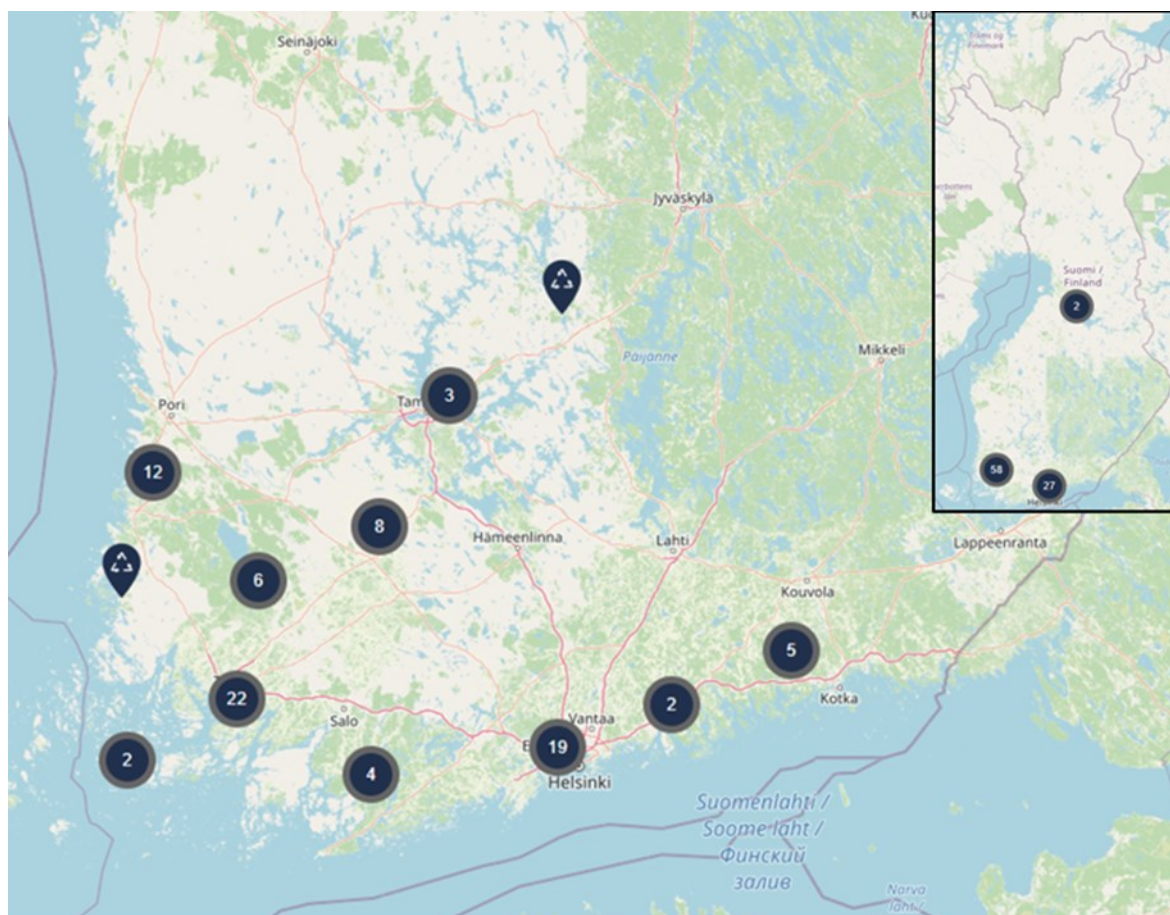
Suomessa syntyi Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) tekemän selvityksen mukaan yhteensä 85 773 t poistotekstiilejä ja uudelleenkäytettäviä tekstiilejä vuonna 2019. Tästä 61 % hyödynnettiin energiana ja 18 % materiaaleina. Noin 16 % päätyi vientiin ulkomaille ja 4 % uusiokäyttöön. Kokonaisuudessaan noin 73,5 % poistotekstiileistä oli peräisin kotitalouksista. Taulukossa 1 on esitettyä poistotekstiilivirrat vuonna 2019. Todellisuudessa arvot voivat kuitenkin vaihdella runsaasti. Esimerkiksi vientiin päätyvien tekstiilien määrän on arvioitu olevan noin 1 000 t vähemmän kuin taulukossa 1 on esitetty. [8, s. 22–24.]

Taulukko 1 Arvioidut poistotekstiilivirrat vuonna 2019 [8, s. 24].

	Sekajätteen sisältämät tekstiilit (t)	Erilliskerätyt tekstiilit (t)	Käyttökelpoiset tekstiilit (t)	Yhteensä (t)
Energiahyödyntäminen	45 789	2 496	3 738	52 024
Materiaalina hyödyntäminen	-	14 909	90,09	14 999
Uudelleenkäyttö	-	34,92	3649	3 684
Vienti	-	17,46	15 045	15 062
Yhteensä	45 789	17 458	22 523	85 770

Kuluttajien poistotekstiilejä on kerätty vähitellen vuodesta 2016 asti erilaisten hankkeiden ja kokeilujen yhteydessä. Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) aloitti maksullisen poistotekstiilin keräyksen vuonna 2019 ja ilmaisen keräyskokeilun kauppakeskuksissa vuoden 2022 alussa. Kokeilun tavoitteena on selvittää, miten keräysmenetelmät toimivat, jotta valtakunnalliseen poistotekstiilien erilliskeräykseen siirtyminen olisi mahdollisimman sujuvaa. Tällä hetkellä

keräyspisteet sijaitsevat pääasiassa Lounais- ja Etelä-Suomessa. Lisäksi Kaajanista ja Oulusta löytyy keräyspisteet (kuva 1). [22, s. 7; 25; 26; 27.]



Kuva 1 Poistotekstiilien keräyspisteet heinäkuussa 2022 [27].

Esimerkiksi Rester Oy ja Dafecor Oy kierrättävät yrityksiltä kerättyjä poistotekstiilejä. Rester Oy:n laitoksen yhteydessä on myös Lounais-Suomen Jätehuolto Oy:n (LSJH) pilottilaitos, jossa käsitellään kotitalouksien poistotekstiilejä. Tulevaisuudessa Turun Topinpuistoon ollaan avaamassa täyden mittakaavan jalostuslaitosta, jossa voitaisiin kierrättää Suomen kotitalouksien poistotekstiilit. Topinpuiston käsittelykapasiteetti tulisi olemaan noin 15 000 t/a, Paimion pilottilaitoksen kapasiteetin ollessa noin 5 000 t/a. Jalostuslaitoksissa tekstiilit kierrätetään mekaanisesti. Prosessi on kuvattu tarkemmin luvussa 4.2. [25; 28; 29; 30.]

3.2 Poistotekstiilien laatu

Poistotekstiilien keräysastioihin päätyy paljon niihin kuulumattomia tekstiilituotteita. Esimerkiksi vuonna 2017 tehdyssä keräyskokeilussa 18 % poistotekstiilimäärästä oli myyntiin kelpaavia vaatteita ja muita tekstiilejä, 11 % keräykseen kuulumatonta jätettä ja 14 % pilaantuneita tekstiilejä [31]. Vuoden 2021 keräyskokeilussa edellä mainitut osuudet olivat pienentyneet hieman, pilallisten osuuden ollessa noin 5 % ja keräykseen kuulumattomien 12 % [23].

Taulukkoon 2 on kerätty eri tutkimusten ja mallinnusten perusteella tehtyjä arvioita kotitalouksien poistotekstiilien materiaali jakaumasta. Laskentatyyleissä on huomattavissa eroja, mutta tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että puuvilla- ja polyesterimateriaaleja on eniten. Kolmas suuri kategoria on erilaiset sekoitteet, joista puuvilla-polyesterisekoite on yleisin.

Taulukko 2 Kuluttajilta peräisin olevien poistotekstiilien materiaali jakauma [20, s. 10; 32; 33, s. 27; 34].

Materiaali (%)	Lahden Ammattikorkeakoulu	Kirsti Cura ja Lea Heikinheimo	Telaketju Tekes-projektin kustannusmalli	Telaketju pilotti
Sekoitteet	44,1	51	24	-
Puuvilla	33,1	33	30 (+95%)	58
Polyesteri	14,1	9	4	19
Akryyli	6,0	2	4	5
Puuvilla-polyesterisekoite	-	-	10	15
Villa	1	1	2	3
Polyamidi		2	1	3
Viskoosi, pel-lava, hamppu	-	-	5	5
Pilaantuneet	-	-	20	-
Muut	-	2	-	-

Poistotekstiilien materiaalijakaumaan vaikuttaa myös jätteen alkuperä. Virrat jaotellaan tuotantojätteeksi (pre-consumer) tai kulutusjätteeksi (post-consumer). Tuotantojätteitä syntyy teollisuuden sivuvirroista. Tällaisen jätteen koostumus on usein homogeenista ja eri materiaalmäärät ovat tiedossa, mikä helpottaa kierrättämistä. Kulutusjäte voi olla peräisin joko yrityksiltä, esimerkiksi pesuiloilta, tai kuluttajilta. Kuluttajilta peräisin olevan poistotekstiilin tarkka jakauma on usein haastava määrittää esimerkiksi kulumisen ja pesulappujen puuttumisen tai niiden epäluotettavuuden takia. Jakauman määrittelemättömyys hankaloiittaa sekä kierrätystä että kierrätetyn kuidun jatkojalostusta. [35, s. 6.]

3.3 Kierrätyksen tavoitetilä

Valtioneuvoston asetukseen (978/2021) on kirjattu yhdyskuntajätteen uudelleenkäytön valmistelun ja kierrätysasteen tavoitteeksi 55 paino-% vuoteen 2025 mennessä ja 65 paino-% vuonna 2035 [14, § 23]. Yhdyskuntajätteellä viitataan kotitalouksien sekajätteeseen ja erilliskerättyyn jätteeseen sekä muista lähteistä peräisin olevaan jätteeseen, jos se muistuttaa laadultaan kotitalouksista peräisin olevaa jätettä [13]. Vuonna 2020 Suomessa yhdyskuntajätteen kierrätysaste oli 42 %. Toisaalta esimerkiksi HSY:n alueella kotitalouksien sekajätteestä noin 80 % olisi ollut kierrätykseen kelpavaa jätettä. [36; 37.] Valtakunnallisen jätesuunnitelman mukaan erilliskeräyksen ja kierrätyskapasiteetin lisääminen edesauttavat kierrätystavoitteisiin pääsemistä [38, s. 54].

Tavoitteena on, että poistotekstiilien keräysverkosto kattaisi koko Suomen vuoteen 2023 mennessä (vrt. kuva 1). Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n (VTT) laatimassa tekstiilikierrätyksen prosessien kustannusmallinnuksessa arvioitiin, että poistotekstiilejä saataisiin kerättyä noin 4 kg/asukas/vuosi, kun keräyspisteitä olisi 1/10 000 asukasta. EU tai Suomi ei ole määrittänyt numeerisia kierrätystavoitteita poistotekstiileille. Kaikki kuluttajapoistotekstiilit pyritään kuitenkin keräämään ja mahdollisuuksien mukaan kierrättämään vuodesta 2023 lähtien. Erilliskeräyksen myötä kierrätyskuiduille kaivataan uusia hyödyntäjiä. [25; 34; 39, s. 5.]

3.4 Erilliskeräyksen palvelutasovaatimukset

Kunnat voivat järjestää poistotekstiilien keräyksen omilla jäteasemillaan, alue- ja kierrätyspisteissä tai yhteistyökumppanien toimipisteissä. Keräyspisteet olisi järkevintä sijoittaa asukkaiden normaalien asiointipaikkojen yhteyteen, esimerkiksi kauppojen pihoille, jotta kierrättäminen olisi mielekästä. Toisaalta pisteiden olisi hyvä muodostaa looginen verkosto, jossa yhdelle tyhjennysreitille sijoittuu useampi keräyskohde. Näin voidaan pienentää kuljetuksesta syntyviä päästöjä ja kustannuksia. [40.]

Keräysvälineinä voivat toimia kannelliset jätelavat, pienemmät jäteastiat, metalliset tekstiilinkeräysastiat tai syväkeräyssäiliöt. Poistotekstiilit pilaantuvat herkästi kosteissa olosuhteissa. Sopiva jäteastia tulisivin valita arvioidun kerätyn poistotekstiilimäärän mukaan, sillä suurissa astioissa tyhjennysvälit voivat olla pitkiä, mikä altistaa tekstiilit pilaantumiselle. Myös astian sijoittamisella on merkitystä, sillä ulkotiloihin asetetuissa, helposti aukeavissa astioissa kerättyihin poistotekstiileihin kertyy nopeasti kosteutta. [41.]

Jätelaitosten vastuulle kuuluu myös kerätyn poistotekstiilin esilajittelu. Lajittelun taso voidaan määrittellä sopimuksessa kunkin jätelaitoksen resurssien mukaan tai lajittelussa voitaisiin hyödyntää alueellista yhteistyötä, jossa useamman kunnan keräämät poistotekstiilit lajiteltaisiin alueellisesti ja vain materiaalitasolle lajitellut poistotekstiilit toimitettaisiin mekaaniseen kierrätykseen Lounais-Suomen Jätehuollon jalostuslaitoksiin Paimioon ja Topinpuistoon. Lajitteluprosessi on kuvattu tarkemmin luvussa 4. [42; 43.]

4 Kierrätysmenetelmät

Tässä luvussa käsitellään erilaisia kierrätysmenetelmiä pääpiirteittäin. Itse kierrätysmenetelmien lisäksi luvussa keskitytään työn tilaajan pyynnöstä lopputuotteiden hyödyntämismahdollisuuksiin sekä prosessien energiankulutukseen. Kierrätysmenetelmien ympäristövaikutuksia tarkastellaan erikseen luvussa 6.

Kaikki kierrätysmenetelmät vaativat tekstiilien lajittelun ennen kierrätysprosessia. Lajittelulla saadaan kasvatettua lopputuotteen arvoa, ja toisaalta joillekin kemiallisille prosesseille tarkka lajittelu on välttämätöntä prosessin onnistumiseksi. Tekstiilit voidaan lajitella käsin ja koneellisesti infrapunatekniikalla esimerkiksi materiaalin sekä värin mukaan. Valtaosa poistotekstiileistä lajitellaan käsin. Vähintään esilajittelu on tarpeen tehdä manuaalisesti, sillä automatisoidut koneet eivät pysty tunnistamaan uudelleenkäyttöön tai polttoon kuuluvia tekstiilejä. Tunnistusteknologiaa voidaan käyttää apuna myös manuaalisessa lajittelussa, mutta usein laitteet ovat melko hitaita. Esilajiteltujen tekstiilien automatisoitu koneellinen lajittelu on kuitenkin todettu lupaavaksi tavaksi tehostaa toimintaa ja kasvattaa käsittelykapasiteettia. [20, s. 9; 44, s. 58; 45.]

4.1 Uusio- ja uudelleenkäyttö

Uudelleenkäytöllä (eng. reuse) tarkoitetaan tuotteen tai jonkin sen osan hyödyntämistä uudelleen samaan tarkoitukseen kuin se on alun perin suunniteltu [15, § 6 kohta 20]. Poistotekstiilien uudelleenkäyttö on jätelain etusijajärjestyksen mukaan ensisijaista tekstiilien kierrätykseen nähden (luku 2.1). Tekstiilien uudelleenkäyttö ei siis ole kierrättämistä, mutta kestävän uudelleenkäytön merkittäviä ympäristöhyötyjä on hyvä tarkastella kierrätysratkaisujen yhteydessä.

Uudelleenkäyttö on kestävää, kun se tapahtuu esimerkiksi Suomen tapauksessa Euroopan alueella. Vientiin päätyvien tekstiilien ei tulisi vaikuttaa kohdemaan talouteen tai ympäristöön. Esimerkiksi uudelleenkäyttöön tarkoitettujen tekstiilien päätyminen jätteeksi voi olla ongelma ja ympäristöriski maissa, joissa ei ole kunnollista jätehuoltoa. [46.]

Ellen MacArthurin säätiön [47, s. 46, 139] tutkimuksen mukaan maailmanlaajuisesti tekstiilituotetta on arvioitu käytettävän noin 160 kertaa koko sen elinkaaren aikana. Jos käyttömäärä kaksinkertaistettaisiin, olisi tutkimuksen mukaan mahdollista vähentää alan kasvihuonekaasupäästöjä noin 44 %. Arvio perustuu uuden tuotteen valmistuksesta syntyvien päästöjen välttämiseen sekä käyttö- että uudelleenkäyttövaiheessa. Liitteeseen 2 on listattu tekstiilikuitujen valmistuksen

keskimääräiset kasvihuonekaasupäästöt ja valmistuksen energiankulutus. Ellen MacArthurin säätiön [48, s. 71] vuoden 2021 raportissa esitetyn lineaarisen mallin mukaan vaatteelle tulee käyttökertoja noin 20–25, kun tuote poistetaan käytöstä vuoden käytön jälkeen. Käyttökertoja voidaan lisätä kiertotalousmallin mukaisesti esimerkiksi uudelleenmyymällä, vuokraamalla ja korjaamalla tekstiilituotteita.

Suomalainen Globe Hope edistää uudelleenkäyttöä valmistamalla muun muassa laukkuja ja asusteita ylijääneistä tekstiilituotteista, kuten turvavöistä ja messumatoista [49]. Myös vaatelainaamoiden palvelujen hyödyntäminen on lisääntynyt. Esimerkiksi juhlavaatteiden lainaamisella saadaan tuotteelle keskimääräisesti enemmän käyttökertoja. [50.] Lisäksi perinteisten kirpputorien rinnalle on auennut useita käytettyjä vaatteita myyviä verkkokauppoja, kuten Emmy Clothing Company Oy ja Rekki [51; 52].

Uusiokäyttö puolestaan on kierrättämistä ja sillä viitataan jätteen saattamiseen takaisin tuotannon raaka-aineeksi [53]. Kierrätys voi tapahtua esimerkiksi luvuissa 4.2–4.4. kuvatuilla menetelmillä.

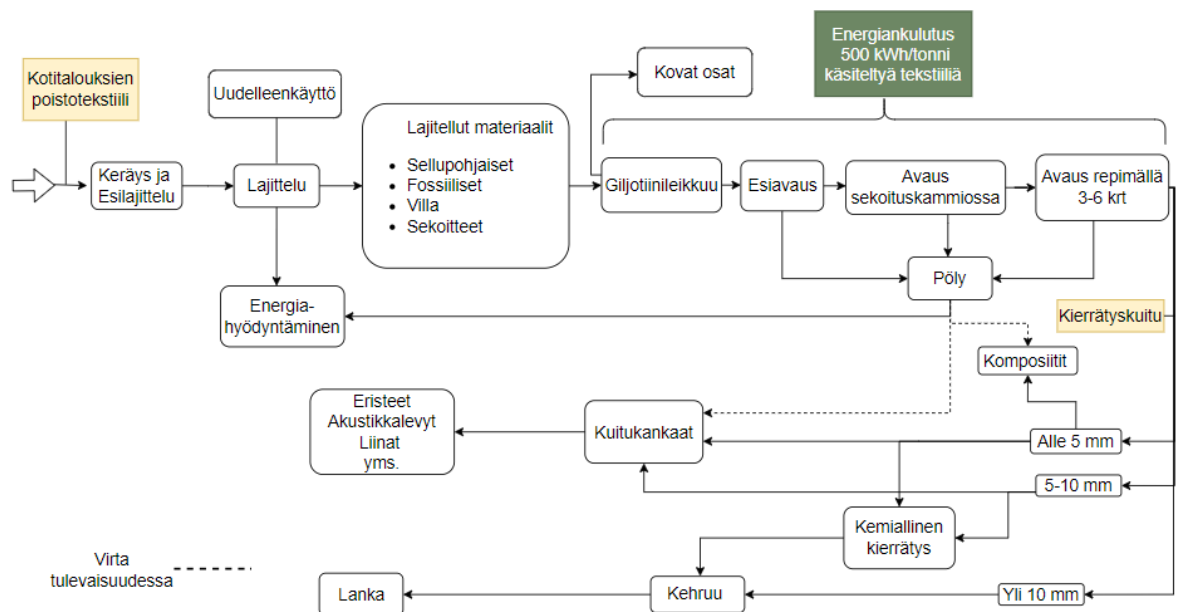
4.2 Mekaaninen kierrätys

4.2.1 Prosessi

Mekaanisen kierrätysprosessin tarkoituksena on avata poistotekstiilit takaisin tekstiilikuiduiksi. Prosessi alkaa lajiteltujen poistotekstiilien silppuamisella noin 15–40 cm²:n kokoisiksi paloiksi esimerkiksi giljotiinileikkurilla. Suuremmat palat ovat lopputuotteen kannalta parempia, sillä kuidut jäävät pidemmiksi ja ovat helpommin hyödynnettävissä jatkojalostuksessa. Tekstiilipaloista tulee poistaa kovat osat, jotka haittaavat prosessin seuraavia vaiheita sekä laitteistoja. Nämä voidaan poistaa esimerkiksi painovoiman ja magneetin avulla, tai mekaanisesti käsin, jos tekstiilipalat halutaan jättää silppuamatta suuremman koon säilyttämiseksi. Suomessa erilliskeräykseen päätyneet pilaantuneet tekstiilit

hyödynnetään energiana, mutta joissakin tapauksissa tekstiilien pesu ennen varsinaista kierrätystä on myös mahdollista. [20, s. 14; 54, s. 29, 30.]

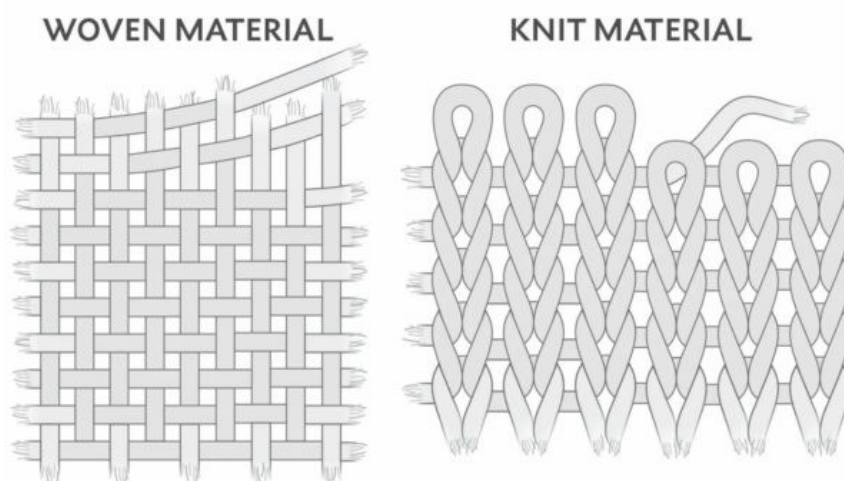
Leikatut palat syötetään revittäväksi. Esimerkiksi LSJH:lla prosessi sisältää esiavauksen, avauksen sekoituskammiossa ja varsinaisen avauksen repimällä. Avauskoneita on peräkkäin noin 3–6 kappaletta, niiden määrän mukautuen syötteen sekä halutun lopputuotteen mukaan. Ensimmäisissä koneissa repijäpiikkejä on harvemmassa ja ne ovat karkeampia, kun taas loppupään koneiden piikit ovat lyhyitä ja asetettu tiheästi. Kuidut lyhenevät jokaisen avauskierroksen aikana, joten turhia prosessivaiheita tulisi välttää. Karstaamalla kuidut saadaan suoristettua ja järjestettyä yhdensuuntaisiksi, mikä helpottaa langaksi kehruuta. Kuvassa 2 on esitettyä mekaanisen kierrätyksen prosessi ja lopputuotteet pääpiirteittäin. Kuvassa esiintyvät lopputuotteet on tarkennettu luvussa 4.2.2. [20, s. 14; 54, s. 29, 30; 55.]



Kuva 2 Mekaanisen kierrätyksen prosessikaavio.

Prosessiin soveltuu teoriassa kaikki tekstiilimateriaalit, -tuotteet ja -rakenteet. Kuitenkin kuitumateriaali ja -rakenne vaikuttaa tarvittaviin laitteistoihin ja lopputuotteeseen. Esimerkiksi löysät neulerakenteet aukeavat kudottuja helpommin, jolloin myös kuitujen voidaan olettaa pysyvän pidempinä (kuva 3). Erittäin

kovien kankaiden, esimerkiksi aramidista valmistettujen työvaatteiden, mekaaninen kierrätys vaatii erityiset laitteet, jotka on suunniteltu kestämaan vahvojen kankaiden avaaminen. Elastaani ja pinnoitetut tekstiilit haittaavat myös kierrätysprosessia, sillä ne estävät tekstiilipalojen aukeamisen. Kemikaaleja saataan joissain tapauksissa hyödyntää haitallisten aineiden poistamiseksi, sillä itse mekaaninen kierrätys ei muuta kuitujen kemiallista koostumusta tai sisältöä. [20, s.14; 54, s. 26–28.]

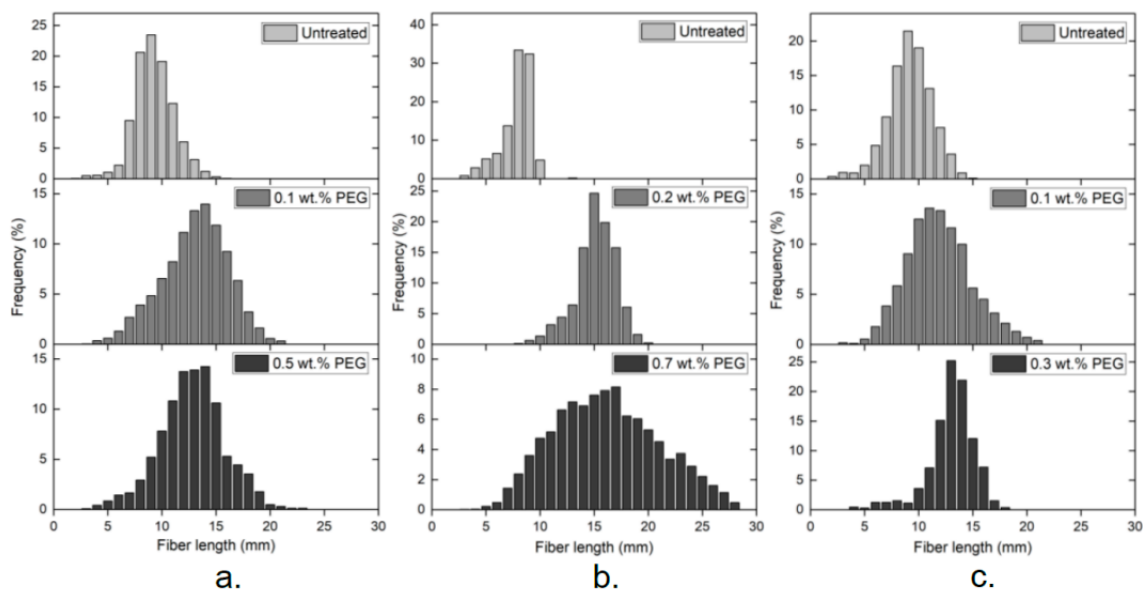


Kuva 3 Vasemmalla kudottu (woven) ja oikealla neulottu (knit) tekstiilirakenne [56].

Mekaanisen kierrätyksen energiankulutus on melko alhainen, noin 300–500 kWh/t kierrätettyä tekstiiliä, verrattuna muihin kierrätysmenetelmiin. Muita mekaanisen kierrätyksen etuja on sen edullisuus ja helppous, sillä prosessi ei vaadi esimerkiksi kemikaalien käyttöä. Koska mekaaninen kierrätys soveltuu useimmille kuitutyypeille, sen avulla voidaan lisätä kiertotaloutta ja vähentää polttoon päätyvien poistotekstiilien määrää runsaasti. [54, s. 33, 67.]

Mekaanisen kierrätyksen suurin haaste on kuitujen lyhentyminen prosessin aikana. Lindström ym. [57, s. 8] tutkivat esikäsittelyvaiheessa lisättyjen liukastusaineiden vaikutusta kuitupituuksiin. Polyetyleeniglykolin (PEG) todettiin auttavan kuitupituuden säilyttämisessä, etenkin polyesterin osalta (kuva 4). Kuitupituudet, keskiarvo noin 15 mm, jäävät kuitenkin langan ja uusien tekstiilien valmistuksen

näkökulmasta edelleen melko lyhyiksi. Tutkimusten mukaan 12–15 mm pitkät kuidut soveltuvat kehruuseen, mutta tuovat lankaan vain paksuutta eivätkä niinkään lujuutta. [20, s. 15; 54, s. 32.]



Kuva 4 Kierrätettyjen tekstiilien kuitupituudet eri määrillä polyetyleeniglykolia. Kuvassa a. puuvilla b. polyesteri ja c. puuvilla-polyesterisekoite. [57, s.8.]

Mekaanista kierrätystä voidaan hyödyntää kierrätyskuitujen valmistukseen tai se voi toimia esikäsittelynä muille kierrätysmenetelmille. Esimerkiksi Infinited Fiber Company tulee käyttämään omassa kemiallisessa kierrätysprosessissaan LSJH:lla mekaanisesti kierrätettyjä selluloosapohjaisia kuituja. [58.]

4.2.2 Lopputuotteet

Haasteena mekaanisessa kierrätyksessä on myös lopputuotteen laadun ja koostumuksen vaihtelevuus. Syötteen tarkat kuitupitoisuudet voi olla haastava määrittää, sillä esimerkiksi kuluttajilta peräisin oleva poistotekstiili on hyvin heterogeenistä ja vaatteiden alkuperää ei usein tunneta. Lisäksi prosessilaitteisiin jääneet kuidut voivat vaikuttaa lopputuotteen koostumukseen. Kierrätyskuituja hyödyntävät toimijat tarvitsevat usein jatkokäsittelyä varten tiedon tuotteen

tarkasta koostumuksesta, eli runsas laadunvaihtelu voi vaikuttaa tuotteita hyödyntävien yritysten määrään. [54, s. 34, 35.]

Mekaanisesti kierrätettyjä tuotteita voidaan hyödyntää uusien tekstiilien raaka-aineina, kuitutekstiileissä ja komposiiteissa. Kierrätetyistä kuiduista saadaan tuotteita muun muassa hotelli- ja ravintola-alalle sekä rakennus-, auto- ja tekstiiliteollisuuteen. Tuotteita, joissa voidaan käyttää kierrätyskuituja ovat esimerkiksi pyyhkeet, akustiikkalevyt, eristeet ja sisustusankaat. Tuotteet voivat olla joko osittain tai kokonaan valmistettu kierrätyskuiduista. Suomessa LSJH:n kierrätyskuitua ovat hyödyntäneet joissain määrin esimerkiksi Jokipiin Pellava, Globe Hope sekä Nordic Upstream. Maailmalla kierrätyskuituja käytetään muun muassa autoissa lämpö- ja äänieristeinä noin 15 kg henkilöautoa kohden. [59; 60, s.38–39; 61; 62.]

Lyhentyneen kuitupitoisuuden vuoksi kierrätetyistä kuiduista valmistetut tuotteet päätyvät yleensä avoimeen kiertoon eli tuotteita ei voida kierrättää uudelleen vaan ne päätyvät käytön jälkeen energiahyödynnettäviksi. Esimerkiksi komposiittien uudelleenkierrätys on lähes mahdotonta useiden eri materiaalien sekoittamisen tuottamien haasteiden takia. Asiantuntijat ovat kuitenkin todenneet, että avoin kierto on silti parempi vaihtoehto kuin suora energiahyödyntäminen. [7, s. 14; 63.]

Lopputuotteen jatkojalostustarve riippuu prosessiin syötettävästä materiaalista sekä halutusta lopputuotteesta. Kierrätyskuidun uudelleenkuidutukselle, kuitukankaan valmistukselle ja kehrulle tulee olla erilliset laitteistot [60, s. 37]. Toisaalta komposiiteissa käytetyt kierrätyskuidut eivät vaadi juurikaan jatkojalostusta. Esimerkiksi alle 1 mm:n pituiset kuidut soveltuvat hyvin täyteaineeksi [20, s. 16, 17]. Suurin osa (80–95 %) kierrätetyistä luonnonkuiduista hyödynnetään kuitukankaissa ja vain noin 5–20 % voidaan käyttää korvaamaan langanvalmistuksessa neitseellisiä raaka-aineita. Synteettisiä kuituja voidaan hyödyntää langanvalmistuksessa hieman enemmän (noin 25–55 %). [54, s. 86, 91.]

Kuten edellisessä luvussa todettiin, 10–15 mm:n pituisia kuituja pystytään hyödyntämään langanvalmistuksessa, mutta lopputuote on kestävyydeltään heikompi kuin täysin neitseellisistä kuiduista valmistettu lanka. Kierrätyskuituja sekoitetaan usein neitseellisten kuitujen kanssa laadun varmistamiseksi. H&M Groupin mukaan kierrätettyä puuvillaa voidaan käyttää korvaamaan 20–30 % neitseellistä puuvillaa langanvalmistuksessa, jotta laatu säilyisi riittävänä [64, s. 41]. Toisaalta myös korkeampia korvaavuusasteita on raportoitu: Ellen McArthur Foundationin [47, s. 98] mukaan kierrätetyn puuvillan osuus voi vaihdella 20 %:sta 90 %:iin. Esimerkiksi farkkukankaista halutaan usein kulutusta kestäviä, joten niissä kierrätyskuidun osuus on pienempi. Lindströmin ym. [57, s. 2] kokoamassa tutkimusraportissa puuvillalle oli kokeiltu 51 %:n, 50 %:n ja 25 %:n korvaavuusasteita.

Kierrätettyä villaa voidaan käyttää langanvalmistuksessa korvaamaan neitseellistä villaa 1:1, kun kuitu on kierrätetty kerran. Tämän jälkeen korvaavuus voi olla noin 70 %. [47, s. 98; 65, s. 15]

Mekaanisesti kierrätetyn polyesterikuidun hyödyntämisestä ja laadusta on tehty vain vähän tutkimuksia. On kuitenkin oletettu, että myös synteettiset kierrätyskuidut tulee sekoittaa neitseellisten kanssa jossakin suhteessa menetetyn kuitupituuden vuoksi. Kuitukankaiden valmistus ei vaadi neitseellisiä raaka-aineita, vaan ne voidaan valmistaa pelkistä kierrätetyistä kuiduista. [54, s. 32.]

Useimmissa tutkimuksissa kuitenkin käytetään laskennassa 1:1 korvaavuutta sekä langan että kuitukankaiden valmistuksessa [66, s. 363]. Tämä ja edellä mainitut korvaavuusasteet tulisikin ottaa huomioon ympäristövaikutuksia käsittelevien tutkimusten tulkinnessa (luku 5.2).

4.3 Kemiallinen kierrätys

Kemiallinen kierrätys on mekaanista selvästi vähemmän käytetty kierrätysmenetelmä. Syynä tähän on kemiallisen kierrätyksen korkea hinta sekä suuri energian- ja kemikaalienkulutus. Kemiallinen kierrätys perustuu tekstiilimateriaalien

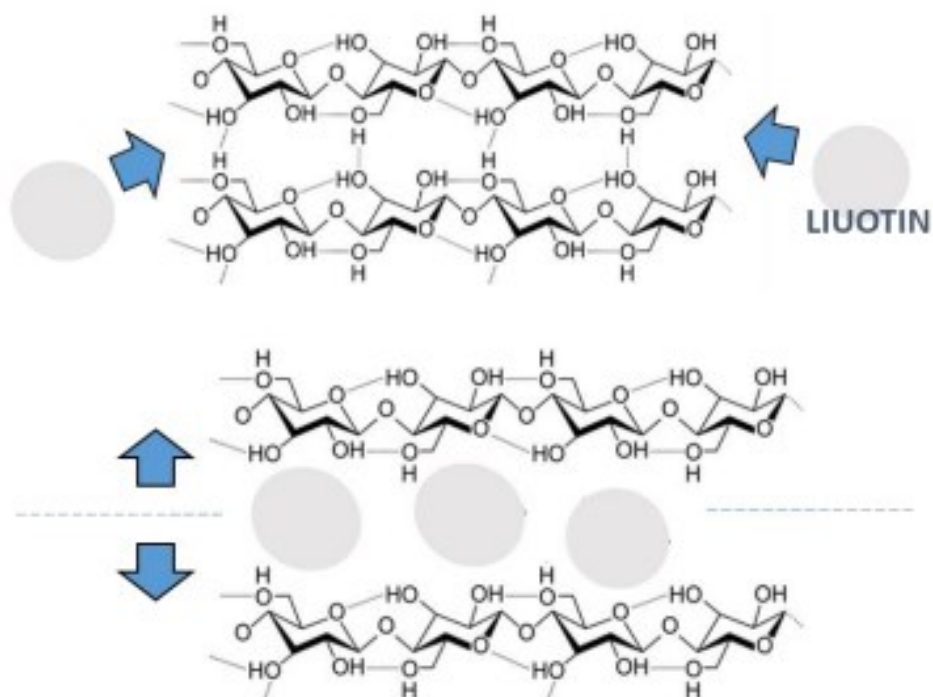
hajottamiseen polymeeri- tai monomeeritasolle, josta se voidaan valmistaa takaisin neitseellistä alkuperää vastaaviksi kuiduiksi tai hyödyntää muuna raaka-aineena. [20, s. 7; 54, s. 58, 59.]

Syötteen tarkan raaka-ainejakauman tulisi olla tiedossa ennen prosessin aloittamista, sillä eri materiaaleille soveltuu eri kemikaalit. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että myös kuitusekoitteet voitaisiin kierrättää kemiallisesti, jos tarkka materiaalikoostumus tiedetään. Uusien prosessivaiheiden lisääminen vaikuttaa kuitenkin esimerkiksi kustannuksiin, joten useat valmistajat vaativat mahdollisimman homogeenistä (>90 %:n pitoisuus) syötettä. Kemiallisen kierrätyksen etuna on se, että kuitujen laatu ei heikkene prosessin aikana (eng. upcycling) ja lopputuote on melko tasalaatuista. Poiketen mekaanisesta kierrätyksestä myöskään tekstiilin rakenteella ei ole kierrätyksen kannalta merkitystä. [20, s. 8; 54, s. 49, 53; 67, s. 6, 14.]

Tässä luvussa tarkastellaan selluloosapohjaisten poistotekstiilien kierrätystä polymeereinä ja polyesterin kierrätystä monomeereinä.

4.3.1 Kierrätys polymeereinä

Poistotekstiilien selluloosapohjaiset tuotteet, esimerkiksi puuvilla-, pellava-, viskoosi- ja hampumateriaalit, voidaan kierrättää samalla prosessilla, jolla valmistetaan selluloosapohjaisia muuntokuituja. Muuntokuidulla tarkoitetaan tekokuituja, jotka valmistetaan liuottamalla luonnosta peräisin olevia raaka-aineita polymeereiksi (kuva 5). Liuoksesta saadaan uusia kuituja märkäkehruumenetelmien avulla. Selluloosapohjaisten muuntokuitujen valmistusprosessi on usein pääpiirteittäin sama, mutta liuotuskemikaaleja voidaan muuttaa syötteestä ja halutusta lopputuotteesta riippuen. [20, s. 18; 68.]



Kuva 5 Kuidun hajoaminen polymeereiksi [69, s. 12].

Prosessin alussa selluloosapohjaisesta poistotekstiilistä poistetaan kovat osat ja tekstiilipalat jauhetaan hienoksi tekstiilimassaksi. Syötteenä sopii myös mekaanisesta kierrätyksestä syntyvät lyhyet selluloosakuidut. Metalliosien poisto ja kuitujen valkaisu pystytään tekemään kemiallisesti prosessin seuraavassa vaiheessa. Massasta valmistetaan selluloosaliuos, josta saostuu kehruhauteessa kuituja. Taulukossa 3 on esitelty erilaisia menetelmiä, joilla voidaan valmistaa selluloosamuuntokuituja poistotekstiileistä. [20, s. 18.]

Taulukko 3 Selluloosamuuntokuitujen vertailu [69, s. 12–13; 70, s. 35; 71; 72, s. 53–54, 83].

	Lyocell	Ioncell	Infinna
Liutin	NMMO	[DBHN][OAc]	OC(NH ₂) ₂ (Urea)
Muut kemikaalit	Vesi	Vesi	Rikkihappo Natriumhydroksidi (lipeä) Sinkkioksidi
Prosessi	Liutus liuottimeen Ilmaraollinen märkäkehruu	Liutus ioniseen liuottimeen Ilmaraollinen märkäkehruu	Erottelu muista kuiduista liuottamalla Karbamaatin (CCA) muodostus urealla Liutus alkaliseen liuokseen Märkäkehruu
Toksisuus	Ei	Ei	Turvallisempi kuin esimerkiksi viskoosin valmistus
Valmistaja	Tencel, ReFibra	Aalto-yliopisto ja Helsingin yliopisto	Infinited Fiber Company
Kaupallinen	Kyllä	Ei	Ei (tavoite vuonna 2024)

Kierrätetyistä kuiduista voidaan valmistaa lankaa tai kuitukankaita. Poistotekstiileistä valmistettujen muuntokuitujen mekaaniset ominaisuudet ovat parempia tai vastaavat neitseellisestä selluloosasta valmistettuja kuituja. Esimerkiksi Ioncell-tekniikalla valmistettujen kuitujen vetolujuuden on todettu olevan jopa 2,5 kertaa parempi kuin neitseellisten puuvillakuitujen [73]. Myös Lyocell-kuidut ovat vahvempia kuin perinteiset viskoosikuidut [74, s. 4587, 4588].

Selluloosapohjaisten poistotekstiilien kierrätys polymeereinä kuluttaa huomattavasti enemmän energiaa kuin mekaaninen kierrätys. Esimerkiksi Lyocell-prosessiin perustuvassa puuvillan liuotuksessa energiankulutus on 1 050 kWh/t kierrätettyä poistotekstiiliä ja puuvilla-polyesterisekoitteen kierrätysprosessissa

noin 1 500 kWh/t. Energiaintensiivisin prosessivaihe on kuitenkin kehruu, joka kuluttaa noin 3 700 kWh/t tekstiiliä. [75, s. 3; 76, s. 5] Infinna-kuitujen valmistuksen kokonaisenergiankulutus on jopa 6 340–8 800 kWh/t tuotettua kuitua [70, s. 84; 77, s. 5; 78, s. 874].

4.3.2 Kierrätys monomeereinä

Synteettiset poistotekstiilit voidaan kierrättää monomeereinä, eli polymeeriketjujen molekyyl iosina. Prosessi on harvinaisempi kuin synteettisten kuitujen termiinen kierrätys (luku 4.4), sillä prosessi teknisesti haastavampi. Monomeereinä kierrätystä voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi sekoitemateriaalien kierrätyksessä polymeerikierrätyksen ohessa. [20, s. 22.]

Kierrätyspolyesteristä valmistettujen tekstiilien raaka-aineena on useimmiten muovipullot ja esimerkiksi kalastusverkot, eikä niinkään poistotekstiilien polyesterituotteet [54, s. 52]. Prosesseja voidaan kuitenkin soveltaa myös poistotekstiilien kierrätykseen. Japanissa tuotetaan kaupallisesti polyesteristä metanolyysiprosessilla dimetyylitereftalaattia (DMT) ja etyleeniglykolia, eli polyetyleenitereftalaatin (PET) lähtöaineita [79, s. 41]. Prosessissa PET-granulaatit depolymeroidaan metanolin avulla. Aluksi polyesteriä sisältävä poistotekstiilimateriaali revitään tai leikataan pienemmiksi paloiksi ja joissain tapauksissa granuloidaan. Palat puhdistetaan kemiallisesti ja syötetään prosessilaitteeseen, jossa polymeeriketjut avataan molekyylitasolle ja puhdistetaan. Tämän jälkeen monomeerit voidaan polymeroida uudelleen tai hyödyntää muiden kemikaalien raaka-aineina. Muita käsittelymenetelmiä ovat esimerkiksi hydrolyysi ja glykolyysi. [20, s. 22; 76, s. 3.]

Depolymeroinnissa syötteen tulisi olla mahdollisimman homogeenista ja puhdasta, jotta prosessia pystytään hallita ja lopputuote olisi laadultaan hyvää. Uudelleen polymeroitu kuitu vastaa ominaisuuksiltaan neitseellistä polyesterikuitua. [20, s. 22.] Prosessi on myös tehokas: noin 90 % PET:istä pystytään muuttamaan metanolyysiprosessissa DMT:ksi [80, s. 4].

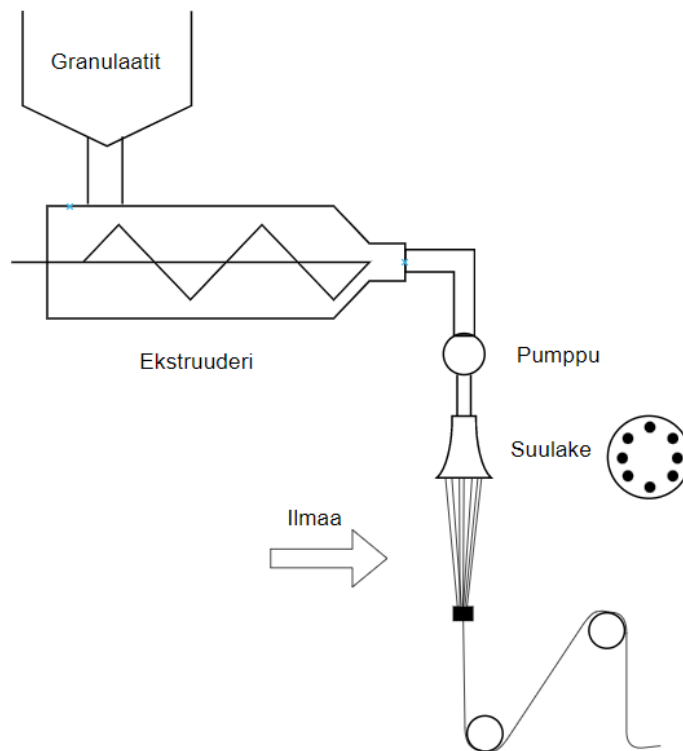
Toisaalta DMT:n valmistus kuluttaa energiaa noin 3 300 kWh/t DMT:tä. Lisäksi DMT:n uudelleen polymerisointi ja kehruu langaksi vie sähkö- ja lämpöenergiaa yhteensä noin 5 327 kWh/t tuotettua lankaa. [80, s. 3; 81, s. 27.] Yhden polyesteritonin kierrätys metanolyysillä vaatii noin 330 kg metanolia. Metanoli on luokiteltu ihmiselle myrkylliseksi kemikaaliksi, mutta sitä ei ole todettu ympäristölle vaaralliseksi. [54, s. 77; 82.]

4.4 Terminen kierrätys

Termisellä kierrätyksellä tarkoitetaan lämmön avulla tapahtuvaa kierrätystä, jossa tekstiilit avataan joko polymeeri- tai molekyyllitasolle [20, s. 19, 23].

Termoplastiset polymeerit eli kestopuovut, esimerkiksi polyesteri, voidaan kierrättää termisesti polymeereiksi. Prosessista käytetään myös termiä termomekaaninen kierrätys. Poistotekstiilien synteettiset materiaalit tulee lajitella ennen varsinaista prosessia tarkasti materiaalin ja värin mukaan, sillä eri polymeerimateriaalien sekoittuminen heikentää lopputuotteen ominaisuuksia. Lajitellut poistotekstiilit leikataan pienempiin osiin ja samalla poistetaan prosessia haittaavat osat, kuten napit ja vetoketjut. Tekstiilipalaset sulatetaan granulaateiksi, jotka voidaan jatkojalostaa uusiksi tekstiilituotteiksi tai hyödyntää muuten muovituotteina. [20, s. 19–21; 54, s. 38–42.]

Tekstiilikuidun valmistus granulaateista tapahtuu sulakehruumenetelmällä. Prosessissa granulaatit sulatetaan ekstruuder-laitteessa noin 200–290 °C:n lämpötilassa (kuva 6). Sulanut massa ohjataan reikiä sisältävän suulakkeen läpi. Muodostuvista kuitusäikeistä voidaan valmistaa uusia tekstiilejä. Jokainen kierrätyskerta kuitenkin heikentää kuidun kestävyysominaisuuksia hieman. Onkin arvioitu, että polymeerit voitaisiin kierrättää noin kahdeksan kertaa. Haasteena kierrätykselle on myös se, että kuluttajilta peräisin olevien materiaalien tarkka koostumus voi olla mahdoton määrittää. Esimerkiksi polyesteri voi koostua suosituimman PET:n lisäksi myös muista polymeereistä ja PET:n lähtöaineita voi olla useissa eri suhteissa. [20, s. 19–21; 54, s. 38–42.]



Kuva 6 Sulakehruu [mukaillen 83, s. 4].

Poistotekstiilien polyesterikuitujen termomekaanisen kierrätyksen energiankulutuksesta on saatavilla vähän avointa tietoa. Voidaan kuitenkin olettaa, että prosessi on melko samanlainen kuin PET-pullojen kierrätys kuiduiksi ja kierrätystekstiilien raaka-aineiksi. Arvioiden mukaan sulakehruu-menetelmällä valmistettu kierrätyspolyesteri vie noin 33–59 % vähemmän energiaa kuin neitseellisen polyesterin valmistus, joka kuluttaa noin 29 000–35 000 kWh/t kuitua. [65; 84, s. 14; 85.] Kierrätettyä polyesteriä voidaan käyttää langanvalmistuksessa korvaamaan neitseellisiä raaka-aineita noin 35–100 % riippuen valmistetun langan paksuudesta [86, s. 5]. Kaupallisesti kierrätyspolyesteristä valmistettuja tekstiilituotteita valmistaa esimerkiksi japanilainen Teijin Group (ECOPET™) [85].

Terminen konversio sopii poistotekstiileille, joille mekaaninen tai kemiallinen kierrätys ei sovellu. Tällaisia tuotteita ovat esimerkiksi sekoitemateriaalit ja pi-laantuneet tekstiilit. Termisen konversion prosesseja ovat pyrolyysi ja kaasutus. Pyrolyysissä orgaanisten aineiden polymeerirakenne voidaan hajottaa korkean lämmön avulla anaerobisissa olosuhteissa. Kaasutus perustuu puolestaan orgaanisten aineiden hajottamiseen kaasumaiseen muotoon esimerkiksi arinapol-tolla. Lopputuotteina saadaan muun muassa lyhyitä hiilivetyjä ja aromaattisia yhdisteitä, jäännöshiiltä sekä synteesikaasuja. Terminen konversio voidaan luo-kitella poistotekstiilien kierrätysmenetelmäksi, jos siitä syntyviä lopputuotteita hyödynnetään kemianteollisuuden raaka-aineina eikä ainoastaan vaihtoehtoi-sina polttoaineina. [20, s. 23–25; 54, s. 47.]

4.5 Energiahyödyntäminen

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (2008/98/EY) mukaan kierrätyk-seen ei sisälly tuotteen energiahyödyntäminen [87, artikla 3 kohta 17]. Tässä työssä on kuitenkin koettu tarpeelliseksi tarkastella poistotekstiilien hyödyntä-mistä energiana, sillä se on poistotekstiilien pääasiallinen hyödyntämismuoto Suomessa. Tekstiilien energiahyödyntäminen ei luultavimmin myöskään lopu täysin, vaikka poistotekstiilien erilliskeräysvelvoite alkaa vuonna 2023. Lisäksi eri kierrätysmenetelmien ympäristövaikutusten tarkastelussa energiahyödyntä-minen toimii useimmiten vertailukohtana.

Yhdyskuntajätteen poltolla tuotetaan vuosittain noin 8 % (3 TWh) Suomen koko-naislämmöntuotannosta ja 2 % (1,2 TWh) sähköntuotannosta. Esimerkiksi Van-taan Energian nykyisen jätevoimalan tuotannolla katetaan puolet Vantaan kau-kolämmöntarpeesta ja kolmannes sähköstä. [88; 89.] Kotitalouksilta peräisin olevasta yhdyskuntajätteestä noin 6,1 % koostuu vaatteista ja jalkineista ja esi-merkiksi vuonna 2021 HSY:n alueella sekajätteen kokonaismäärästä noin 2,4 % oli kierrätykseen kelpaavia poistotekstiilejä. [37; 90.]

Taulukkoon 4 on listattu eri tekstiilimateriaalien sekä vertailun vuoksi yleisim-pien energiantuotannon polttoaineiden lämpöarvoja. Lämpöarvo kertoo

syntyvän lämmön määrän poltettavan aineen massaa kohden [91, s. 28]. Taulukosta voidaan huomata, että synteettisillä materiaaleilla, kuten polyesterillä ja polyamidilla on lähtökohtaisesti korkeampi lämpöarvo kuin luonnonkuiduilla. Kuitenkin lajittelemattomana, sekajätteen seassa poltettaessa kaikille materiaaleille käytetään sekajätteen lämpöarvoa [20, s. 23]. Energian lisäksi poistotekstiilien polttamisesta syntyy aina myös päästöjä. Esimerkiksi polyesterin polton hiilidioksidipäästöt ovat noin 1,45 kg CO₂/kg ja puuvillan noin 0,997 kg CO₂/kg [92, s. 99]. Kivihiilen polton hiilidioksidipäästöt ovat noin 1,85–3,3 kg CO₂/kg [93; 94]. Toisaalta biopohjaisten tuotteiden, kuten puuvillan, poltosta syntyvät päästöt katsotaan usein laskennassa neutraaleiksi niiden ilmasta sitoman hiilen takia [95].

Taulukko 4 Poltettavien aineiden tehollisia lämpöarvoja [91, s. 11–14, ; 96; 97].

Poltettava materiaali	Lämpöarvo (MJ/kg)
Puuvilla	13,8
Villa	24,1
Viskoosi (bambu)	13,8
Polyesteri (PET)	22,2
Polyamidi	32,0
Sekajäte	10,0
Metsähake	10,0
Kivihiili	25,0
Turve	10,1

Jätteiden energiahyödyntäminen on jätelain etusijajärjestyksen loppupäässä, eli sitä tulisi hyödyntää vain tilanteissa, joissa jätettä ei kannata tai voida kierrättää (luku 2.1). Polttamalla päästään kuitenkin eroon haitta-aineita tai muita epäpuhauksia sisältävistä tuotteista sekä jätemateriaaleista, joille ei ole vielä kannattavaa kierrätysmenetelmää. [98.]

5 Elinkaariarviointimenetelmä

Elinkaariarvioinnilla tarkoitetaan jonkin tuotteen tai palvelun elinkaaren aikana kuluttamien resurssien ja ympäristövaikutusten arviointia. Elinkaarella viitataan kaikkiin vaiheisiin raaka-aineiden hankinnasta tuotteen loppusijoitukseen. Toisaalta elinkaariarviointi voidaan tehdä myös rajatummalle välille, esimerkiksi raaka-aineiden hankinnasta tuotteen valmistukseen, jolloin käytön ja loppusijoituksen päästöt jätetään huomioimatta. Elinkaariarviointia ohjaa kansainväliset ISO 14 040 ja 14 044 -standardit. [99, s. 9; 100, s. 9.]

Elinkaariarviointi aloitetaan tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyllä. Tavoitteiden asettelussa tarkennetaan esimerkiksi selvityksen käyttötarkoitus ja kohdeyleisö. Soveltamisalan määrittelyssä puolestaan kuvataan muun muassa tuotejärjestelmä ja järjestelmän rajat, toiminnallinen yksikkö (FU) sekä vaikutusluokat ja vaikutusluokkaindikaattorit. Tuotejärjestelmä kuvaa tuotteen tai palvelun elinkaaren aikaisia yksikköprosesseja. Selvityksessä tulee kertoa tarkasti, mitkä yksikköprosessit ja esimerkiksi syötteet ja tuotteet rajataan tarkasteluun. Prosessien tai prosessivirtojen poisjättäminen tulee myös perustella. Toiminnallinen yksikkö on referenssiyksikkö, jota käytetään inventaarioanalyysissä. Tässä työssä tarkastelluissa tutkimuksissa toiminnallinen yksikkö on usein ”tonni kierätettyä tekstiiliä”. [99, s. 19, 20; 100, s. 17–20.]

Inventaarioanalyysissä kerätään kaikki toimintajärjestelmän syötteiden, tuotosten sekä päästöjen tiedot. Syötteitä ovat esimerkiksi energia- ja raaka-ainevirrat. Tuotosvirtoihin lasketaan itse tuotteen lisäksi rinnakkaistuotteet ja jätevirrat. Kerättyjen tietojen varmistaminen ja suhteuttaminen toiminnalliseen yksikköön tehdään erilaisilla laskentamenettelyillä. Inventaarioanalyysivaiheessa voidaan myös tarvittaessa suorittaa allokointi eli syöte- ja tuotosvirtojen jakaminen useammalle tuotejärjestelmälle. [99, s. 21; 100, s. 21–26.]

Vaikutusarviointi-osiossa hyödynnetään inventaarioanalyysin tuloksia potentiaalisten ympäristövaikutusten määrittämiseen. Pakollisena vaikutusarviointiin kuuluu inventaarioanalyysitulosten sijoittaminen soveltamisalan määrittelyssä

valittuihin vaikutusluokkiin sekä vaikutusluokan indikaattoritulosten laskeminen. Vaikutusluokkiin sijoitetut inventaariotiedot muutetaan karakterisointikertoimilla samaan yksikköön ja yhdistetään kunkin luokan sisällä. Saatu indikaattoritulos kuvaa vaikutuksia määrällisesti. Vaikutusarvioinnin lopuksi määritetään kunkin vaikutusluokan loppupiste, joka kuvaa jotakin huolta aiheuttavaa ympäristökysymystä, esimerkiksi ihmisten terveyttä tai luonnonvaroja. [99, s. 21–24; 100, s. 26–31.]

Viimeisenä tulkitaan inventaarioanalyysistä ja vaikutusarvioinnista saatuja tuloksia. Näiden pohjalta tehdään johtopäätöksiä ja esitetään suosituksia, joita voidaan käyttää toiminnan parantamiseksi tai esimerkiksi poliittisten päätösten tukena. Lisäksi tulkintavaiheessa arvioidaan tulosten luotettavuus täydellisyyden ja johdonmukaisuuden tarkistuksella sekä herkkyyshanalyysillä. Tarkistuksilla varmistetaan, että kaikki tarpeellinen tieto on tutkittu ja että se on riittävän luotettavaa. [99, s. 24; 100, s. 33–37.]

Elinkaariarviointityön nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi on luotu useita ohjelmistoja. Tunnetuimpia ohjelmistoja ovat GaBi, SimaPro sekä ilmainen OpenLCA. Lisäksi laskennassa on apuna kattavat tietokannat, kuten ecoinvent sekä GaBin oma tietokanta. [101; 102; 103; 104; 105]

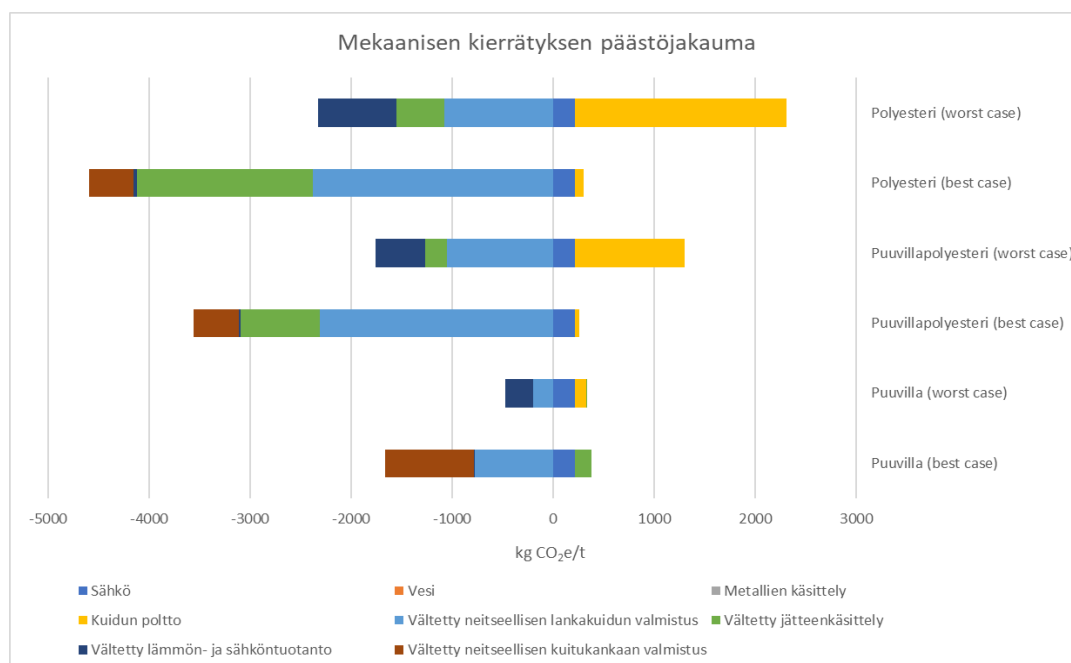
6 Tekstiilien kierrätyksen ympäristövaikutusten arviointi

Tässä luvussa tarkastellaan eri tutkimuksissa saatuja, tekstiilien kierrätykseen liittyviä, ympäristövaikutusarvioinnin tuloksia. Pääasiassa tutkimuksissa vertaillaan eri kierrätysmenetelmien kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna neitseellisten kuitujen valmistukseen tai kierrätyksen etuja energiahyödyntämiseen verrattuna. Osassa tutkimuksista on huomioitu ilmastonlämpenemisen lisäksi myös muita ympäristövaikutuksia, kuten veden käyttö ja happamoituminen.

6.1 Tutkimustuloksia mekaanisesta kierrätyksestä

Euroopan komission teettämässä Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling -raportissa [54, s. 191, 192, 194–196, 198, 199] tarkasteltiin puuvillan, puuvilla-polyesterisekoitteen sekä polyesterin mekaanisen kierrätyksen ympäristövaikutuksia ilmastonmuutoksen näkökulmasta. Tarkastelun rajaukseen sisältyi kuljetusten sekä lajittelun päästöt, mutta esimerkiksi langanvalmistukseen liittyvää kehruuta ei huomioitu.

Materiaalien kierrätyksen päästöjä tarkasteltiin niin kutsutuilla best case- ja worst case -skenaarioilla. Parhaassa tapauksessa kuidut hyödynnettiin joko langan tai kuitukankaan valmistukseen, kun taas vähiten suotuisassa tapauksessa vain langanvalmistukseen kelpaavat kuidut käytettiin korvaamaan neitseellisiä kuituja ja loput hyödynnettiin energiana. Kuvaan 7 on koottu malli saaduista tuloksista, minkä lisäksi liitteestä 3 löytyy laskennan tarkat arvot, sekä best case- ja worst case -skenaarioiden eri tekstiilien hyödyntämistekniikoiden osuudet. [54, s. 173.]



Kuva 7 Mekaanisen kierrätyksen päästöjakauma [ks. 54, s. 191, 192, 194–196, 198, 199].

Kaikissa tapauksissa mekaanisen kierrätyksen avulla pystyttiin säästämään kasvihuonekaasupäästöjä. Suurimmat nettosäästöt tulivat polyesterin kierrätyksestä, kun kaikki kuidut hyödynnettiin korvaamaan neitseellisiä kuituja. Kuvasta 7 huomataan myös, että polyesterin polttamisella on suurimmat negatiiviset vaikutukset ilmastonmuutokseen (päästöt noin 2 100 kg CO₂e/t käsiteltyä poistotekstiiliä), eli voidaan todeta, että etenkin synteettisten kuitujen kierrättäminen ja hyödyntäminen uusiomateriaalina on tärkeää.

Best case -skenaariossa päästiin seuraaviin nettopäästöihin: puuvilla –1 280 kg CO₂e/t, puuvilla-polyesterisekoite –3 300 kg CO₂e/t ja polyesteri –4 295 kg CO₂e/t. Puuvillan CO₂e-päästövähennys jäi pienimmäksi, mutta kierrätyksellä voidaan kuitenkin saavuttaa muita positiivisia ympäristövaikutuksia. [54, s. 192, 195, 198.]

Esimerkiksi puuvillan kasvatuksen, loukutuksen ja värjäämisen välttäminen säästää runsaasti vettä, lannoitteita ja kemikaaleja. Esteve-Turrillasin ym. [106, s. 114] tutkimuksen mukaan välttämällä nämä prosessit langanvalmistuksessa ja käyttämällä kierrätettyjä puuvillakuituja voidaan säästää 0,32 kg SO₂e (happamoituminen), 0,033 kg PO₄³⁻e (rehevöityminen) ja 5 594 kg vettä toiminnallisen yksikön ollessa 1 kg puuvillalankaa. Toisaalta neitseellisen puuvillakuidun valmistukseen kuluvan veden määrästä on esitetty hyvin vaihtelevia arvioita (2–20 m³/kg kuitua). [107, s. 31].

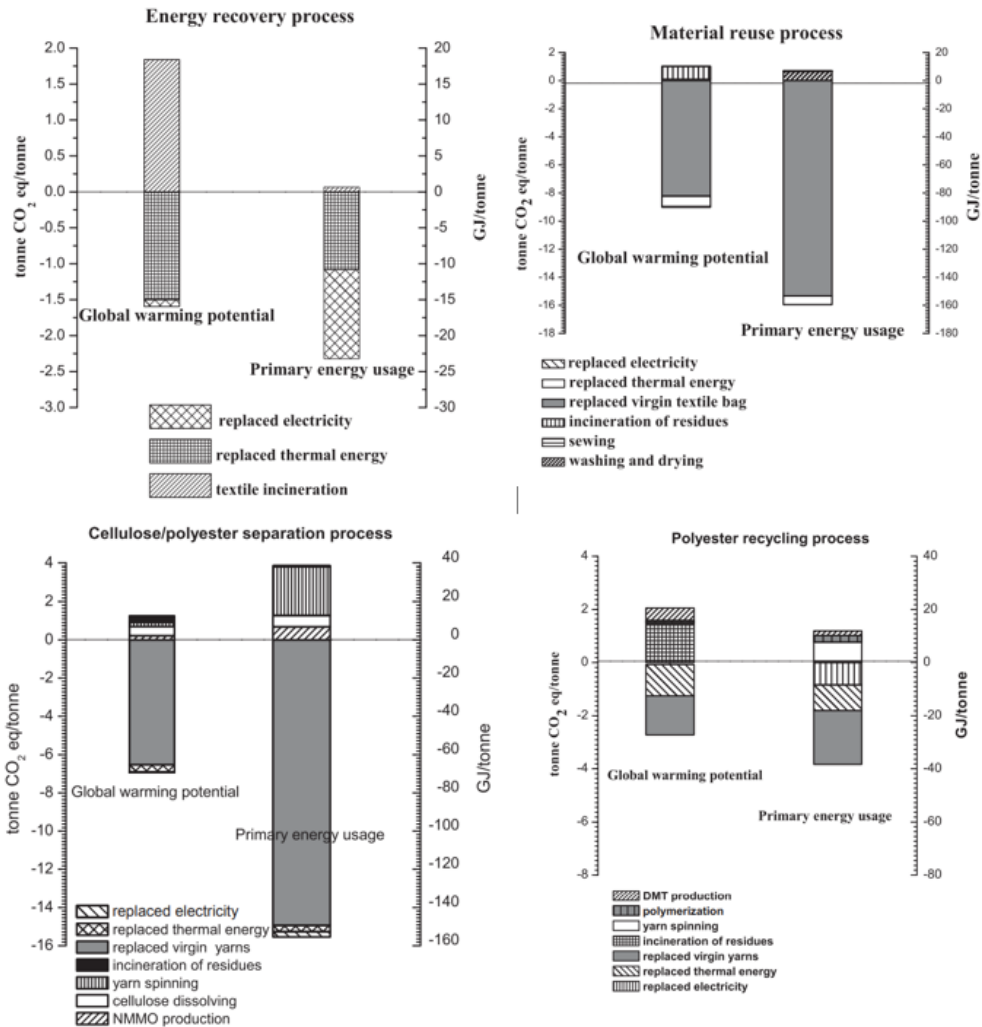
Myös yritykset ovat tehneet arvioita omien mekaanisesti kierrätettyjen kuitujen ympäristövaikutuksista. Rester Oy:n mekaanisesti kierrätetyt kuidut säästävät kasvihuonekaasupäästöjä arviolta 5 170 kg CO₂e ja yli 2 miljoonaa litraa vettä kierrätettyä kuitutonna kohden, kun vertailukohteena ovat Yhdysvalloissa tuotetut neitseelliset materiaalit. [108.] Rester oli mukana pilotissa, jossa kerättiin ja kierrätettiin 5 000 kg rautakauppakettu Starkin työvaatteita. Kierrätetyt kuidut tullaan hyödyntämään esimerkiksi eristeissä ja akustiikkalevyissä. Yhteensä pilotissa säästettiin kasvihuonekaasupäästöjä noin 19 000 kg CO₂e eli 3 800 kg CO₂e/t ja noin 2,5 miljoonaa litraa vettä. [109.]

Recover Textile Systemsin oma mekaaninen kierrätysmenetelmä, Recover™, tuottaa kierrätettyjä puuvillakuituja ja -kuitusekoitteita (RCotton ja RColorBlend) sekä pre consumer että post consumer -jätteestä. Yritys lupaa, että RCotton-kuitua voidaan käyttää lopputuotteessa vähintään 15 %. Korvaamalla 15 % neitseellisiä raaka-aineita RCotton-kuidulla voidaan säästää 3 431 kg CO₂e-päästöjä/t kuitua sekä 2,2 miljoonaa litraa vettä. [110.]

6.2 Tutkimustuloksia kemiallisesta kierrätyksestä

Zamanin ym. [76, s. 2–9] tutkimuksessa vertailtiin kolmen eri tekstiilien kierrätysmenetelmän ympäristövaikutuksia suhteessa tekstiilien energiahyödyntämiseen. Vertailtavia menetelmiä olivat tekstiilien uudelleenkäyttö materiaalina, NMMO-tekniikka sekä polyesterin kemiallinen kierrätys monomeereinä. Tutkimuksen toiminnallinen yksikkö oli ”tonni kotitalouksien poistotekstiiliä”. Eniten positiivisia vaikutuksia oli materiaalien uudelleenkäytöllä: kasvihuonekaasupäästöjä voitiin säästää 8 000 kg CO₂e/t ja energiaa 45 556 kWh/t, kun tuotoksi oletettiin 50 % ja lopun menevän energiahyötykäyttöön.

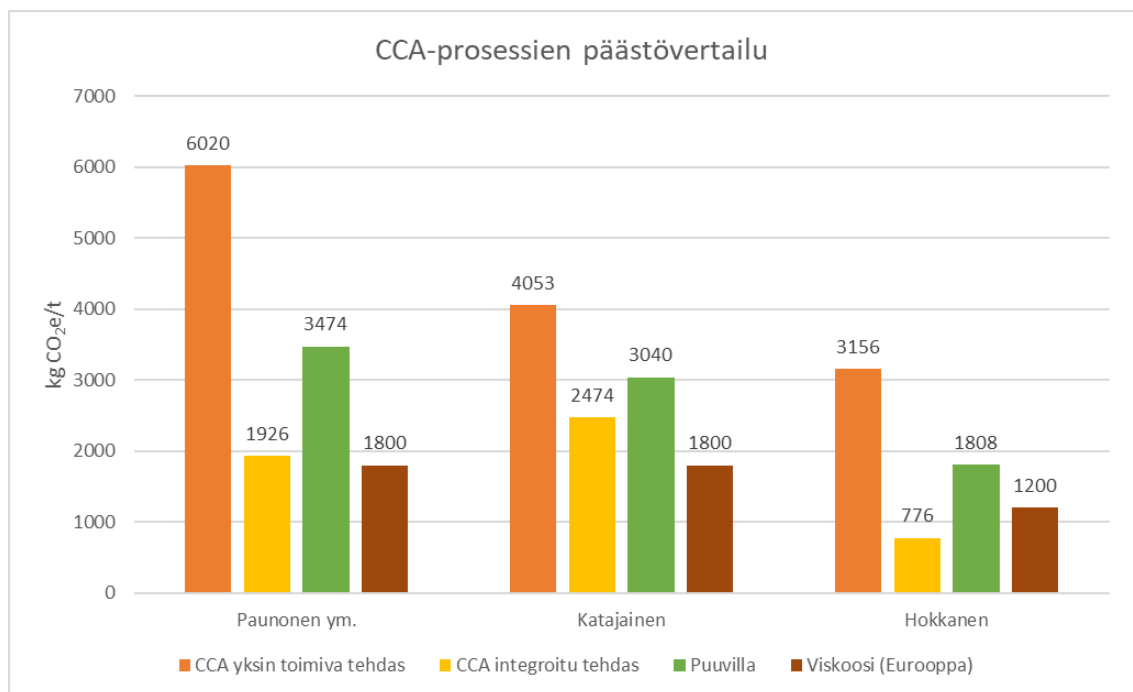
Tutkimuksessa vertailut kemialliset kierrätysmenetelmät, NMMO-liuotus selluloosan ja polyesterin erotuksessa ja DMT:ksi hajottaminen polyesterin kierrätyksessä, ovat myös ympäristön kannalta parempia vaihtoehtoja kuin poistotekstiilien energiahyödyntäminen. NMMO-prosessissa säästetään primäärienergiaa 32 220 kWh/t ja 5 500 kg CO₂e kasvihuonekaasupäästöjä toiminnallista yksikköä kohden, kun oletetaan, että poistotekstiilistä 50 % on puuvillaa, joka liukee täysin prosessissa ja loput 50 % on polyesteriä, joka voidaan sulakehrätä. Polyesterin kierrätyksen hyödyt olivat heikoimmat verrattuna energiahyödyntämiseen. Nettopäästöiksi arvioitiin noin –900 kg CO₂e/t ja –7 220 kWh/t energiaa, kun 25 % poistotekstiilistä kierrätetään ja loput hyödynnetään energiana. Kierrätetyn DMT:n valmistuksen päästöt on arvioitu olevan noin 980 kg CO₂e/t DMT:tä, kun taas esimerkiksi NMMO voidaan kierrättää lähes kokonaan takaisin prosessiin, jolloin kemikaalin valmistuksen ja käytön aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt pienenevät. Tutkimuksen tulokset esitettynä graafisesti kuvassa 8. [76, s. 3, 6; 80, s. 3.]



Kuva 8 Energiahyödyntämisen, uudelleenkäytön ja eri kierrätysmenetelmien päästövertailu [76, s. 6–7].

Tutkimuksessa tarkastellaan kierrätysprosessin lisäksi langaksi kehuun vaikutuksia, mutta esimerkiksi kuljetuksesta syntyvät päästöt todettiin mitättömiksi (n. 23,4 kg CO₂e/t). Kierrätettyjen tuotteiden oletetaan korvaavan neitseellisistä raaka-aineista valmistettua lankaa. Mekaanisesta kierrätyksestä poiketen, kemiallisen kierrätyksen menetelmissä tulisi ottaa laitteen sähkönkulutuksen lisäksi huomioon myös kemikaalien aiheuttamat ympäristövaikutukset. Zamanin ym. raportissa on kuitenkin katsottu, että NMMO:n käytön ja DMT:n valmistuksen ekotoksisuus on melko mitätön ja että esimerkiksi puuvillan kasvatuksessa käytettyjen torjunta-aineiden välttäminen on suurempi etu. [76, s. 9.]

Selluloosapohjaisten poistotekstiilien kierrätystä selluloosakarbamaatti-prosessilla on tutkittu kahdessa lopputyössä ja yhdessä tieteellisessä julkaisussa. Vertailukohteina tutkimuksissa on käytetty neitseellisen puuvillan ja viskoosin valmistusta. Kaikissa kolmessa tutkimuksessa ympäristövaikutuksia tarkastellaan usean eri skenaarion kautta. Yleisesti parhaat tulokset saatiin, kun kierrätyslaitos integroitiin jo olemassa olevaan sellutehtaaseen ja kun käytetyt kemikaalit pyrittiin kierrättämään takaisin prosessiin (kuva 9). Integroitu tehdas käyttää toiminnoissaan esimerkiksi sellutehtaan ylimääräistä energiaa sekä kemikaalivirtoja. Laskennassa biomassalla tuotettu sellutehtaan energia katsotaan päästöiltään neutraaliksi, mikä pienentää samalla prosessin päästöjä. Päästöerot yksin toimivan ja integroidun tehtaan välillä voidaan huomata vertailemalla kuvan 9 oransseja ja keltaisia palkkeja. [70, s. 105–108; 77, s. 59; 78, 874–878.]



Kuva 9 CCA-prosessien sekä puuvillan ja viskoosin valmistuksen päästövertailu. [koostettu lähteistä 70, s. 107; 77, s. 56; 78, s. 875].

Suomalainen Infinited Fiber Company perustaa kaupallisen mittakaavan, kierrätyspuuvillasta CCA-kuituja valmistavan tehtaan suljettuun Veitsiluodon paperikonehalliin. Tulevan tehtaan päästöjä voidaan siis verrata jossain määrin kuvan 9 yksin toimiviin tehtaisiin. Tutkimuksissa on tehty oletus, että yksin toimivat

tehtaat käyttäisivät prosesseissaan fossiilisia energianlähteitä. Infinited Fiber Company tulee kuitenkin käyttämään omassa tehtaassaan muun muassa uusiutuvalla energialla tuotettua höyryä, mikä tulee ottaa huomioon vertailua tehdessä. [111; 112.]

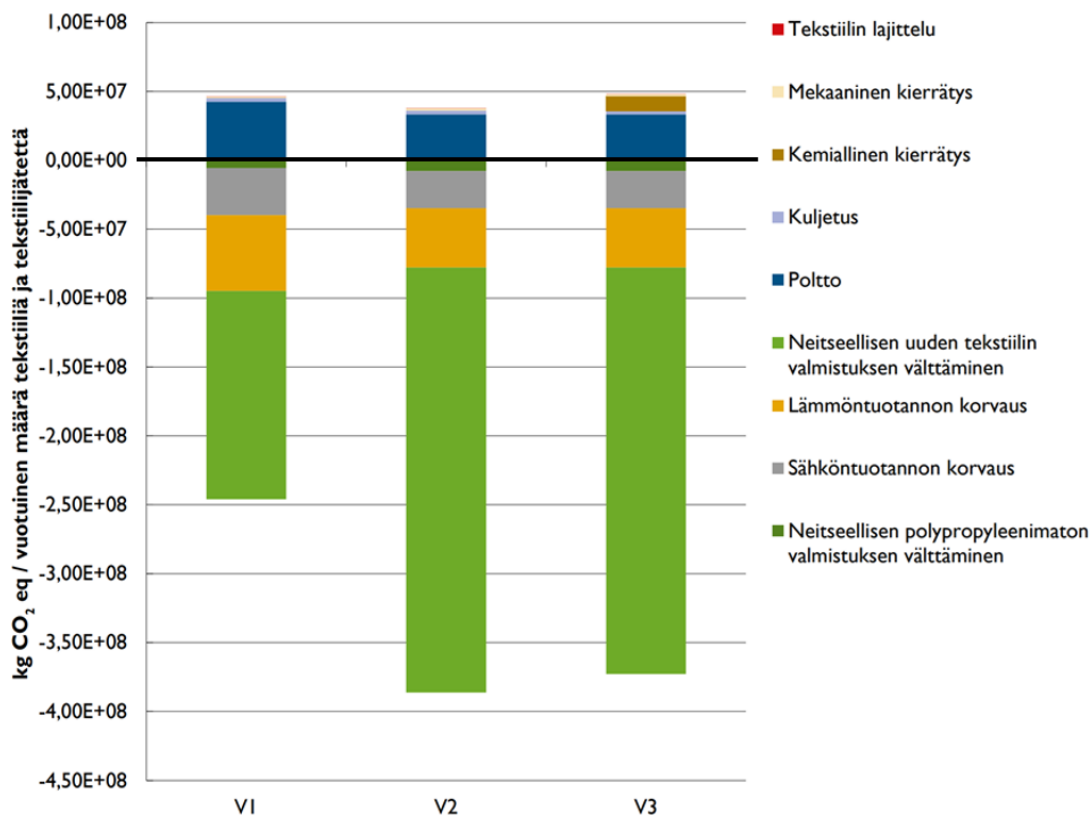
Selluloosapohjaisten poistotekstiilien kierrätys CCA-kuiduiksi tuottaa siis enemmän tai lähes saman verran kasvihuonekaasupäästöjä kuin neitseellisen puuvillan valmistus. Kemiallisella kierrätysmenetelmällä voidaan kuitenkin säästää neitseellisten puuvillakuitujen tuotannon vaatimia luonnonvaroja, kuten vettä. Selluloosakarbamaatti-prosessin on tutkittu kuluttavan vettä noin 31–86 m³/1 000 kg tekstiilikuitua. [70, s. 108; 77, s. 56; 78, s. 877.]

6.3 Muita tutkimustuloksia tekstiilien kierrätyksestä

Poistotekstiilien kierrätyksen ja uudelleenkäytön ympäristövaikutuksista on julkaistu myös yleisiä tutkimuksia, joissa ei niinkään painoteta tiettyä kierrätysmenetelmää, vaan tarkastellaan neitseellisten kuitujen valmistamisen korvaamisesta syntyviä hyötyjä. Esimerkiksi Dahlbon ym. [60, s. 41–43] raportissa tarkasteltiin poistotekstiilien hyödyntämisen päästöjä kolmen eri skenaarion kautta:

- V1: Tilanne vuonna 2012, jossa 20 % erilliskerätään ja 80 % kerätään sekajätteen mukana. Erilliskerätystä 16,5 % päätyy uudelleenkäyttöön, 1,5 % kierrätetään mekaanisesti ja 2 % energiahyödynnetään.
- V2: Tehostettu uudelleenkäyttö, jossa 40 % erilliskerätään ja 60 % päätyy sekajätteeseen. Erilliskerätystä 34 % uudelleenkäytetään, 2 % kierrätetään mekaanisesti ja 4 % hyödynnetään energiana.
- V3: Tehostettu kierrätys, jossa poistotekstiilin keräys on sama kuin V2:ssa, mutta uudelleen käyttöön päätyy 14 %, kemialliseen ja mekaaniseen kierrätykseen yhteensä 22 % ja energiahyödynnykseen 4 %.

Raportissa kuitujakaumaksi oletettiin 57,2 % polyesteriä, 37,4 % puuvillaa ja 5,4 % viskoosia, mikä vastaa tekstiilien tuotannon jakaumaa vuonna 2015. Työssä oletettiin, että kierrätetyillä kuiduilla korvataan neitseellisen öljynimeytysmaton valmistusta ja uudelleenkäytöllä neitseellisen uuden tekstiilin tuotantoa. Eri vaihtoehtojen vaikutukset on esitetty kuvassa 10. [60, s. 41–43.]



Kuva 10 Eri skenaarioissa syntyvät ja säästetyt kasvihuonekaasupäästöt [60, s. 47].

Kuvasta huomataan, että tehostettu uusiokäyttö (V2) on arvion mukaan paras vaihtoehto ja eniten vaikutusta on neitseellisten tekstiilien valmistuksen välttämisellä eli uudelleen käytön tehostamisella. Kaikissa skenaarioissa eniten päästöjä aiheutti sekajätteeseen päätyneiden poistotekstiilien polttaminen, kun taas kuljetuksesta syntyvät päästöt todettiin melko mitättömiksi. V3-skenaariossa kemiallinen kierrätys tuotti myös hieman päästöjä, mutta yleisesti kaikkien kolmen vaihtoehdon nettopäästöt olivat negatiivisia. Myös nettovaikutukset happamoitumiseen, alailmakehän otsonin muodostumiseen ja hiukkasten syntymiseen ovat negatiivisia kaikissa skenaarioissa. [60, s. 46–47.]

Kaikissa skenaarioissa erilliskerätyistä, uudelleen käyttöön menevistä poistotekstiileistä noin 67 % päätyisi vientiin ulkomaille [60, s. 41–43]. Tekstiilivirtaselvityksen [8, s. 36] mukaan käytetyistä vaatteista yli 50 % päätyy Baltian maihin. Kuitenkin esimerkiksi hyväntekeväisyysjärjestö Fidalle lahjoitetuista tuotteista

56 % päätyy Euroopan alueella ja noin 16 % lopulta EU:n ulkopuolelle [113]. Tekstiilien päätyessä kauas alkuperämaasta on vaikea todentaa, että tuotteet päätyvät varmasti uudelleenkäyttöön ja korvaamaan neitseellistä tekstiilien valmistusta [46; 114, s. 9].

Sveitsiläisen, Federal Office for the Environmentin [65, s. 14] kokoaman raportin mukaan kierrätetyn puuvillan käyttäminen säästää energiaa 20 % verrattuna neitseellisen puuvillan valmistukseen. Kierrätetty polyesteri puolestaan säästää energiaa 59 % ja pienentää hiilidioksidipäästöjä 32 %. Kierrätetyn nylonin energiansäästöpotentiaali on noin 60 % ja säästöt CO₂-päästöissä 26 % verrattuna neitseellisiin kuituihin. Data saatuihin arvoihin on kerätty Quantis World Apparel & Footwear Life Cycle -tietokannasta sekä The Waste and Resources Action Program -tietokannasta. Tuloksissa tulee huomioida laskennassa tehdyt vahvat yleistyksiset, sillä esimerkiksi erilaisten kierrätysmenetelmien eroista päästöjen tai energiankulutuksen näkökulmasta ei ole ilmoitettu.

Robert Bodinin [115, s. 24, 53, 57–64] lopputyössä vertaillaan kahta poistotekstiilien hyödyntämisstrategiaa: poltto ja uudelleenkäyttö. Uudelleenkäyttöön kuuluu tässä tarkastelussa poistotekstiilien erottelu yhdyskuntajätteestä ja lajittelu uudelleenkäyttöön, kierrätykseen tai polttoon. Tarkasteltu poistotekstiili koostuu puuvillasta (43 %), polyesteristä (31 %), nailonista (12 %), viskoosista (11 %) ja villasta (3 %). Tulokseksi saatiin, että tekstiilien uudelleenkäyttö on parempi vaihtoehto kasvihuonekaasupäästöjen ja luonnonvarojen säästämisen näkökulmasta. Poistotekstiilien polttaminen kuitenkin oli parempi vaihtoehto rehevöitymisen, happamoitumisen ja ekotoksisuuden kannalta. Uudelleenkäyttö-skenaariossa merkittäviä päästöjä aiheutti poistotekstiilien kuljetukset Ruotsista Alankomaihin ja muualle Eurooppaan. Bodinin mukaan ehdottoman tärkeää olisi kuitenkin keskittyä itse tekstiilien tuotannon päästöjen vähentämiseen.

Vuonna 2017 Yhdysvalloissa noin 43 % kierrätetyistä PET-pulloista päätyi tekstiiliteollisuuden raaka-aineeksi [116, s. 3]. Shenin ym. [117, s. 42] julkaisussa vertailtiin luvussa 4 esitettyjen polyesterin kierrätysmenetelmien ympäristövaikutuksia neitseellisen PET-kuidun valmistukseen. Tulokset on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5 PET-kuitujen valmistuksen ympäristövaikutuksia [117, s. 42].

Vaikutusluokka	Termomekaanisesti kierrätetty PET	Monomeereinä kierrätetty PET	Neitseellinen PET
Ilmastonlämpeneminen (kg CO ₂ e/t)	1 880	3 080	4 060
Happamoituminen (kg SO ₂ e/t)	9	-	21
Rehevöityminen (kg PO ₄ ³⁻ e/t)	0,7	-	1,2

Tarkasteltujen vaikutusten arvot eivät ole negatiivisia (vrt. Zamanin ym. [76] tulokseen), koska laskennassa ei ole huomioitu lopputuotteilla korvattuja neitseellisiä kuituja. Monomeereinä kierrätyksen arvot saattavat myös poiketa, sillä Zamanin ym. [76] tutkimuksessa on käytetty poistotekstiilejä ja Shenin ym. [117] julkaisussa PET-pulloja kierrätyksen raaka-aineena. Arvoista voidaan kuitenkin päätellä, että ainakin termomekaaninen kierrätys on ympäristön kannalta parempi vaihtoehto neitseellisen polyesterikuidun valmistukseen verrattuna.

7 Johtopäätökset

7.1 Tulosten arviointi

Työssä tarkasteltujen lähteiden perusteella voidaan todeta, että tekstiilien uudelleenkäyttö on parempi vaihtoehto kuin niiden kierrättäminen, mutta toisaalta etenkin synteettisten kuitujen kierrätyksen ympäristöhyödyt ovat suuremmat kuin niiden polttamisella saavutetut. Kierrätysmenetelmistä mekaanisella kierrätyksellä oli selvästi pienimmät haitalliset ympäristövaikutukset, sillä päästöjä katsottiin syntyvän vain prosessin energiankulutuksesta. Ongelmana on kuitenkin kierrätyskuidun huono laatu ja täten heikommat hyödyntämismahdollisuudet. Kuitupituutta pyritään kuitenkin parantamaan uusien tekniikoiden ja innovaatioiden avulla.

Myös kemiallisten kierrätysmenetelmien voidaan todeta olevan ympäristövaikutusten näkökulmasta pääasiassa suotuisampia vaihtoehtoja kuin kierrättämättä jättäminen. Kemialliset prosessit vaativat paljon energiaa ja ovat vielä kalliita, mutta niistä saadut lopputuotteet ovat ominaisuuksiltaan lähes neitseellisten kuitujen tasoisia. Tutkituista menetelmistä ainoastaan selluloosakarbamaatti-prosessi oli kasvihuonekaasupäästövertailussa neitseellisiä kuituja huonompi vaihtoehto. Toisaalta prosessin avulla voidaan säästää puhdasta vettä ja raaka-aineet saadaan pidettyä kierrossa. Kemiallisia kierrätysmenetelmiä hyödynnetään hyvin pienessä mittakaavassa, ja ainakin toistaiseksi mekaaninen kierrätys vaikuttaa kannattavammalta tekniikalta etenkin tilanteissa, joissa prosesseihin käytetään uusiutumattomia energianlähteitä.

Kuvissa 7, 8 ja 10 on tarkasteltu poistotekstiilien polton vaikutuksia lämmön- ja sähköntuotannon korvaamiseen. Tuloksissa on hieman eroja, mitkä saattavat johtua esimerkiksi tutkimuksissa tehdyistä energiantuotantoon liittyvistä oletuksista. Kuvasta 7 voidaan huomata, että synteettisten kuitujen poltosta on enemmän haittaa kuin energiantuottamisen korvaamisella saavutettuja hyötyjä. Kuvissa 8 ja 10 ei olla määritetty erikseen tuloksia selluloosapohjaisille ja synteettisille kuiduille. Molemmissa tutkimuksissa toiminnallinen yksikkö sisälsi noin

50 % polyesterituotteita. Zamanin ym. [76] mukaan polton nettopäästöt olivat arvoltaan positiiviset (230 kg CO₂e/t), kun taas Dahlbon ym. [60] tutkimuksesta voidaan huomata selviä hyötyjä, kun sähkön- ja lämmöntuotantoa korvataan poistotekstiilien polttamisella.

7.2 Pohdinta

Eri kierrätysmenetelmien vertailu keskenään osoittautui haastavaksi tutkimuksissa käytettyjen erilaisten toiminnallisten yksiköiden sekä lähtötilanteessa tehtyjen arvioiden ja olettamusten eroavaisuuksien takia (liite 2). Esimerkiksi Euroopan komission teettämässä julkaisussa tutkittiin tietyn kuitutyypin vaikutuksia, kun taas useimmissa muissa raporteissa toiminnallinen yksikkö oli tietty määrä poistotekstiiliä ennen kierrätystä. Lisäksi elinkaariarvioinnin rajauksissa oli eroja. Esimerkiksi langankehruun päästöjen ja neitseellisten tuotteiden korvaavuuden huomioimisessa ei ollut yhtenäistä linjaa. Kaikissa tutkimuksissa kuitenkin käytettiin cut-off-allokointia, eli tuotteet katsottiin päästöttömiksi elinkaariarvioinnissa määritetyn rajauksen alkupäässä.

Poistotekstiilien eri kierrätysmenetelmien ympäristövaikutuksista on toistaiseksi saatavilla hyvin vähän tieteellisiä ja tuoreita julkaisuja, vaikka tekstiiliteollisuuden haitoista on puhuttu jo useita vuosia. Lisäksi julkaisuissa painotettiin työn toteutuksen vaatimia vahvoja yleistyksiä ja olettamuksia ajankohtaisen sekä tutkitun tiedon puutteen takia. Myöskään yritysten antamien arvojen taustalla olevat tutkimukset eivät ole julkisia. Nämä seikat heikentävät tulosten luotettavuutta, mutta voidaan kuitenkin olettaa, että tulokset ovat ainakin suuntaa antavia.

Tutkitut ympäristövaikutukset liittyivät pääasiassa kasvihuonekaasupäästöihin sekä vedenkulutukseen. Muita vaikutusluokkia, kuten rehevöitymistä tai happamoitumista ei juurikaan tutkittu, tai ne todettiin melko vähin perusteluin mitättömiksi. Mikromuovit eivät toistaiseksi kuulu mihinkään elinkaariarvioinnin vaikutusluokkaan, mutta olisi aiheellista tutkia, millaisia määriä niitä syntyy esimerkiksi kierrätetyn polyesterituotteen pesusta. Toisaalta uusiutumattomista

luonnonvaroista valmistettujen synteettisten kuitujen säilyttäminen suljetussa kierrossa on tärkeää, sillä tunnetusti niiden valmistuksesta syntyy runsaasti päästöjä ja kilpailu raaka-aineista voi olla kovaa.

Kierrätyskuiduilla tulisi ehdottomasti korvata neitseellisistä raaka-aineista valmistettuja tuotteita, eikä niinkään lisätä tuotevalikoimaa. Laadukkaimmista kierrätyskuiduista saattaa toisaalta syntyä jopa kilpailua, jolloin tulisi keksiä keinoja saada kuidut tehokkaimpaan ja parhaaseen mahdolliseen jatkojalostukseen. Voidaan esimerkiksi olettaa, että Infinited Fiber Company, jonka tuotantokapasiteetti on noin 30 000 t/a, tavoittelee kaikkia LSJH:n kierrättämiä puuvillakuituja omaan tuotantonsa, vaikka pisimmät kuidut voitaisiin hyödyntää suoraan langanvalmistukseen. Ylimääräisistä prosesseista syntyy aina päästöjä, jolloin kierrätetyn tuotteen ympäristökuorma kasvaa.

Työn tuloksia arvioidessa voidaan myös pohtia, tulisiko tekstiilituotteiden olla mahdollisimman pitkäikäisiä vai enemmän helposti kierrätettävissä. Erilaisia kuitusekoitteita käytetään parantamaan tekstiilien ominaisuuksia ja kestävyyttä, mutta usein ne ovat haastavia ja kalliita kierrättää. Toisaalta pitkäikäisyyttä lisää myös tuotteen ajattomuus sekä laadun huomioon ottava valmistustekniikka. Tässä työssä vertailtujen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että ympäristön kannalta on parasta, että tuotteelle tulee mahdollisimman monta käyttökerrota sen elinkaaren aikana.

8 Yhteenveto

Tekstiiliteollisuus ja länsimaalaiset kulutustottumukset eivät ole nykyisellään kestäviä. Muutoksen edistämiseksi on laadittu EU:n sekä kansallisen tason lakeja ja säädöksiä. Myös erilaiset poistotekstiilien kierrätysmenetelmät ovat lisääntyneet ja kehittyneet 2010-luvulta lähtien. Kiertotaloustavoitteiden saavuttaminen vaatii kuitenkin myös valtavia muutoksia kuluttajien tottumuksissa ja asenteissa. Kierrätysasteen parantaminen onkin asia, johon jokainen voi yksilötasolla vaikuttaa.

Poistotekstiilien hyödyntämismahdollisuudet noudattavat jätelaissa määritettyä etusijajärjestystä. Tekstiilien uudelleenkäyttämisen ja käyttöiän pidentämisen tulisi olla aina ensimmäinen vaihtoehto. Uudelleenkäytöllä säästetään arvokkaiden raaka-aineiden lisäksi kierrätyksestä syntyvät päästöt. Useat eri kierrätysratkaisut kuitenkin mahdollistavat raaka-aineiden tehokkaan hyödyntämisen, kun ne eivät ole enää käytettävissä muulla tavalla. Poistotekstiilien energiahyödyntäminen ei yleensä ole ympäristön kannalta suotuisin vaihtoehto, mutta se toimii hyvänä vaihtoehtona kierrätykseen kelpaamattomien tuotteiden hyödyntämiselle.

Erilliskeräyksen alkaessa kuntien on huolehdittava riittävästä tiedottamisesta ja kuluttajien ohjeistamisesta. Keräysastioiden ohjetaulujen tulisi olla selkeitä, yksiselitteisiä sekä yhdenmukaisia eri jätehuoltoyritysten välillä. Toisaalta myös kuluttajien on otettava vastuuta tuottamiensa poistotekstiilien oikeaoppisesta lajittelusta uudelleenkäyttöön, kierrätettäviin poistotekstiileihin ja sekajätteeseen.

Erilliskeräyksen alkamisen myötä kierrätyskuiduille kaivataan myös uusia hyödyntäjiä. Tulevissa opinnäytetöissä olisikin hyvä löytää ratkaisuja hyödyntämismahdollisuuksien edistämiseksi, kierrätettyjen kuitujen kysynnän kasvattamiseen sekä mekaanisesti kierrätettyjen kuitujen laadun parantamiselle. Myös uusien, innovatiivisten kuitujen käyttökohteiden kehittäminen edistäisi kiertotaloustavoitteita.

Lähteet

- 1 Tikkanen, Sarianne. 2019. Tekstiilit matkalla kohti kiertotaloutta. Webinaarin esitysmateriaali. Ympäristöministeriö.
- 2 Niinimäki, Kirsi; Peters, Greg; Dahlbo, Helena; Perry, Patsy; Rissanen, Timo & Gwilt, Alison. 2020. The environmental price of fast fashion. Verkkoaineisto. Springer Nature Limited. <https://finix.aalto.fi/wp-content/uploads/2021/04/Nature_review_Niinimaki-2020.pdf>. Luettu 23.5.2022.
- 3 Saarinen, Elina. 2022. Muotialan mullistus. Uusiouutiset 3/2022, s. 23.
- 4 UN Alliance For Sustainable Fashion addresses damage of 'fast fashion'. 2019. Verkkoaineisto. Yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelma. <<https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-alliance-sustainable-fashion-addresses-damage-fast-fashion>>. Luettu 23.5.2022.
- 5 Vaateteollisuuden kasvihuonepäästöistä yli 40 prosenttia olisi ratkaistavissa kuluttajien valinnoilla. 2020. Verkkoaineisto. LAB-ammattikorkeakoulu. <<https://lab.fi/fi/uutiset/vaateteollisuuden-kasvihuonepaastoista-yli-40-prosenttia-olisi-ratkaistavissa-kuluttajien>>. Luettu 23.5.2022.
- 6 Omondi, Benard. 2021. The Most Polluting Industries in 2022. Verkkoaineisto. Eco Jungle. <<https://ecojungle.net/post/the-most-polluting-industries-in-2021/>>. Luettu 10.6.2022
- 7 Hedrich, Saskia; Janmark, Jonatan; Langguth, Nikolai; Magnus, Karl-Hendrik & Strand, Moa. 2022. Scaling textile recycling in Europe—turning waste into value. McKinsey Apparel, Fashion & Luxury Group.
- 8 Dahlbo, Helena; Nurmi, Piia; Oksanen, Pauliina; Pokela, Oskari; Rautiainen, Aija; Savolainen, Hannu & Virta, Marketta. 2021. Textile flows in Finland 2019. Verkkoaineisto. Turun ammattikorkeakoulu. <<https://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522167873.pdf>>. Luettu 20.5.2022.
- 9 Textiles in Europe's circular economy. 2019. Verkkoaineisto. Euroopan ympäristökeskus. <<https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-in-europes-circular-economy/textiles-in-europe-s-circular-economy>>. Päivitetty 9.3.2021. Luettu 20.5.2022.
- 10 Textiles: Material-Specific Data. Verkkoaineisto. United States Environmental Protection Agency. <<https://www.epa.gov/facts-and-figures->

- about-materials-waste-and-recycling/textiles-material-specific-data>. Päivitetty 22.6.2022. Luettu 20.7.2022.
- 11 Palvelumme. Verkkoaineisto. LCA Consulting Oy. <<https://lca-consulting.fi/palvelumme/>>. Luettu 23.5.2022.
 - 12 LCA Consulting osaksi Etteplan Oyj:tä. Verkkoaineisto. LCA Consulting Oy. <<https://lca-consulting.fi/lca-consulting-osaksi-etteplan-oyjta/>>. Luettu 23.5.2022.
 - 13 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU). 2018. 2018/851.
 - 14 Valtioneuvoston asetus jätteistä. 2021. 978/2021.
 - 15 Jätelaki. 2021. 17.6.2011/646.
 - 16 Kulutusopas. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <<https://www.uusiouutiset.fi/Kulutusopas.pdf>>. Luettu 4.7.2022.
 - 17 Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. 2022. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9d2e47d1-b0f3-11ec-83e1-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF>. Luettu 18.5.2022.
 - 18 Recycled Claim Standard (RCS) + Global Recycled Standard (GRS). Verkkoaineisto. Textile Exchange. <<https://textileexchange.org/standards/recycled-claim-standard-global-recycled-standard/>>. Luettu 7.7.2022.
 - 19 SFS/SR 174 Tekstiilituotteet, hoito-ohje ja kokomerkinä. Verkkoaineisto. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. <<https://sfs.fi/osallistu-ja-vaikuta/standardisointiryhmat/teva-seurantaryhma/>>. Luettu 20.5.2022.
 - 20 Kamppuri, Taina; Heikkilä, Pirjo; Pitkänen, Marja; Saarimäki, Eetta; Cura, Kirsti; Zitting, Jaakko; Knuutila, Henna & Mäkiö, Inka. 2019. Tekstiilimateriaalien soveltuvuus kierrätykseen. Verkkoaineisto. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. VTT Tutkimusraportti Nro VTT-R-0091-19. <https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24225719/VTT_R_00091_19.pdf>. Luettu 17.5.2022.
 - 21 Salmenperä, Hanna. 2017. Poistotekstiileihin kytkeytyvät juridiset ja hallinnolliset tulkinnat sekä menettelyt. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus. <https://storage.googleapis.com/turku-amk/2018/02/termit-ja-lainsaadanto_syke.hannasalmenpera.2017.pdf>. Luettu 25.5.2022.

- 22 Kokkonen, Marko. Poistotekstiilin valtakunnallinen keräys. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <https://telaketju.turkuamk.fi/uploads/2020/08/5d8cc5d4-poistotekstiilin-valtakunnallinen-kerays_Isjh.pdf>. Luettu 24.5.2022.
- 23 Pokela, Oskari. 2022. Poistotekstiilin keräys. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2022/02/pokela_webinaari01022022_poistotekstiilinkerays.pdf>. Luettu 18.5.2022.
- 24 Poistotekstiilit. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://www.lsjh.fi/fi/jatelaji/poistotekstiilit/>>. Luettu 25.5.2022.
- 25 HSY laajentaa poistotekstiilin keräystä. 2022. Verkkoaineisto. Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. <<https://www.hsy.fi/ymparistotieto/tiedotteet/hsy-laajentaa-poistotekstiilin-keraysta/>>. Luettu 18.5.2022.
- 26 Vaatteet ja tekstiilit. Verkkoaineisto. Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. <<https://www.hsy.fi/jatteet-ja-kierratys/lajittelu/vaatteet-ja-tekstiilit/>>. Luettu 5.7.2022.
- 27 Kierrätys.info. Verkkoaineisto. Suomen kiertovoima KIVO. <<https://www.kierratys.info/>>. Luettu 4.7.2022.
- 28 Pokela, Oskari. 2021. Poistotekstiilinkeräyksen valtakunnallinen tilanne ja kehittyminen. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen Jätehuolto Oy. <https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2021/12/pokelaoskari_gartonanna_13122021_Isjh.pdf>. Luettu 18.5.2022.
- 29 Mahdollistamme tekstiilikuidulle uuden elämän. Verkkoaineisto. Rester Oy. <<https://rester.fi/>>. Luettu 18.5.2022.
- 30 Tuotantoprosessi. Verkkoaineisto. Dafecor Oy. <<https://dafecor.fi/tuotantoprosessi>>. Luettu 5.7.2022.
- 31 Tekstiilien kierrätystä ratkotaan paita kerrallaan. 2018. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen Jätehuolto Oy. <<https://www.lsjh.fi/fi/tekstiilien-kierratysta-ratkotaan-paita-kerrallaan/>>. Luettu 5.7.2022.
- 32 Tulokset. Verkkoaineisto. Lahden ammattikorkeakoulu. <<https://kiertotalous-kontti.webnode.fi/tulokset/>>. Luettu 1.6.2022.
- 33 Cura, Kirsti & Heikinheimo, Lea. 2016. Identifying textile fibres in discarded textiles – Case Patina. Teoksessa Cura, Kirsti (ed.). Lahti Cleantech Annual Review 2016, s. 27. The publication series of Lahti University of Applied Sciences, osa 24.

- 34 Hinkka, Ville & Palmgren, Rosa. Kustannusmalli poistotekstiilin keräyksestä, lajittelusta ja kierrätysprosesseista. Webinaarin esitysmateriaali. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <https://telaketju.turkuamk.fi/uploads/2021/03/eade3116-telaketju-webinaari_2021_3_palmgren.pdf>. Luettu 30.5.2022.
- 35 Textile Exchange Guide to Recycled Inputs. 2021. Verkkoaineisto. Textile Exchange. <<https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2021/09/GRS-202-V1.0-Textile-Exchange-Guide-to-Recycled-Inputs.pdf>>. Luettu 7.7.2022.
- 36 Kotitalousjätteet kulkevat uusiksi raaka-aineiksi. 2021. Verkkoaineisto. Ymparisto.fi. <[https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Kotitalousjatteen_kulkevat_uusiksi_raaka\(62191\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Kotitalousjatteen_kulkevat_uusiksi_raaka(62191))>. Luettu 30.5.2022.
- 37 Pääkaupunkiseudun sekajätteen koostumus vuonna 2021. Verkkoaineisto. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. <<https://julkaisu.hsy.fi/paakaupunkiseudun-sekajatteen-koostumus-vuonna-2021.html>>. Luettu 18.5.2022.
- 38 Heino, Anna; Kamaja, Mari; Markkula, Annu; Mikkonen, Hanne; Mäki, Satumaija; Saario, Mari; Sihvonen, Heli & Ylimäki, Laura. 2020. Hiilineutraali tekstiiliala – tiekartta. Verkkoaineisto. Gaia Consulting Oy. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/stjm/uploads/20200610133352/STJM-Hiilineutraali-tekstiiliala-tiekartta_FINAL.pdf>. Luettu 30.5.2022.
- 39 Heikkilä, Pirjo; Heikkilä, Jouko; Kallio, Katri; Kurki, Sofi & Harlin, Ali. 2022. Tekstiilien suljetun kierron testbed. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. VTT Tutkimusraportti Nro VTT-R-01091-21. <https://cris.vtt.fi/ws/files/55449144/VTT_R_01091_21.pdf>. Luettu 30.5.2022.
- 40 Keräyspisteet. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://poistotekstiili.lsjh.fi/poistotekstiilin-kerays-ja-lajittelu/kerayspisteet/>>. Luettu 26.5.2022.
- 41 Keräysvälineet. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://poistotekstiili.lsjh.fi/poistotekstiilin-kerays-ja-lajittelu/keraysvalineet/>>. Luettu 6.7.2022.
- 42 Pokela, Oskari. 2021. Kuinka poistotekstiilin erilliskeräys ja lajittelu toteutetaan alueellisesti? Webinaarin esitysmateriaali. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://telaketju.turkuamk.fi/uploads/2021/02/e3b40fe4-2021-02-25-telaketju-webinaari-kerays-ja-lajittelu.pdf>>. Luettu 24.5.2022.

- 43 Kokkonen, Marko. Poistotekstiilin valtakunnallinen keräys kunnallisen jätehuollon toimesta. Webinaarin esitysmateriaali. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://telaketju.turkuamk.fi/uploads/2020/03/696f0c83-2020-3-26-poistotekstiilin-valtakunnallinen-kerays-kunnallisen-jatehuollon-toimesta.pdf>>. Luettu 6.7.2022.
- 44 Heikkilä, Pirjo; Cheung, Minna; Cura, Kirsti; Engblom, Ilona; Heikkilä, Jouko; Järnefelt, Vafa; Kamppuri, Taina; Kulju, Minna; Mäkiö, Inka; Nurmi, Piia; Palmgren, Rosa; Petänen, Päivi; Rintala, Niko; Ruokamo, Annariina; Saarimäki, Eetta; Vehmas, Kaisa & Virta, Marketta. 2021. Telaketju - Business from Circularity of Textiles. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. VTT Research Report No. VTT-R-00269-21. <https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/52366217/Telaketju2_FinalReport_Public.pdf>. Luettu 27.6.2022.
- 45 Cura, Kirsti; Heikkilä, Pirjo; Kamppuri, Taina; Rintala, Niko & Saarimäki, Eetta. 2021. Textile Recognition and Sorting for Recycling at an Automated Line Using Near Infrared Spectroscopy. Verkkoaineisto. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <<https://www.mdpi.com/2313-4321/6/1/11/htm>>. Luettu 27.6.2022.
- 46 Käytetyn vaateen jäljillä. 2020. MOT-dokumentti. Yleisradio Oy. <<https://areena.yle.fi/1-50278158>>. Luettu 28.6.2022.
- 47 A New Textiles Economy: Redesigning fashion's future. 2017. Verkkoaineisto. Ellen MacArthur Foundation. <<https://emf.thirdlight.com/link/2axvc7eob8zx-za4ule/@/preview/1?o>>. Luettu 8.6.2022.
- 48 Circular Business Models: redefining growth for a thriving fashion industry. 2021. Ellen MacArthur Foundation. <<https://emf.thirdlight.com/link/circular-business-models-report/@/preview/1?o>>. Luettu 6.6.2022.
- 49 Materiaalit & tuotanto. Verkkoaineisto. Globe Hope. <<https://globehope.fi/pages/materiaalit-ja-tuotanto>>. Luettu 21.7.2022.
- 50 Linnemäki, Soile-Maria; Lyytinen, Kati & Nurmi, Piia. 2021. Vaatteiden lainaaminen on uudenlainen kuluttamisen tapa. Verkkoaineisto. Turun Sanomat. <<https://www.ts.fi/lukijoilta/5366257>>. Luettu 21.7.2022.
- 51 Emmy – aina jotain hyvää kaapissasi. Verkkoaineisto. Emmy Clothing Company Oy. <<https://store.emmy.fi/pages/kaytettyjen-merkkivaatteiden-taivas>>. Luettu 21.7.2022.
- 52 Mikä Rekki on? Verkkoaineisto. Rekki. <<https://rekki.fi/mika-rekki-on/>>. 21.7.2022.

- 53 Uusiokäyttö. 2022. Verkkoaineisto. Tieteen termipankki. <<https://tieteentermipankki.fi/wiki/Ymparistotieteet:uusiokaytto>>. Luettu 10.6.2022.
- 54 Duhoux, Tom; Maes, Edwin; Hirschnitz-Garbers, Martin; Peeters, Karolien; Asscherickx, Lise; Christis, Maarten; Stubbe, Birgit; Colignon, Philippe; Hinzmann, Mandy & Sachdeva, Anurodh. 2021. Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <<https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2022/50030-study-textile-recycling-web.pdf>>. Luettu 31.5.2022.
- 55 Poistotekstiilin jalostuslaitos. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://poistotekstiili.lsjh.fi/poistotekstiilin-jalostuslaitos/>>. Luettu 31.5.2022.
- 56 The First Step in Sourcing- Is Your Fabric a Woven, Knit or Non-woven? 2019. Verkkoaineisto. Source my Garment. <<https://sourcemygarment.com/2019/02/01/what-is-a-woven-knit-fabric-how-to-classify/>>. Luettu 14.6.2022.
- 57 Lindström, Katarina; Sjöblom, Therese; Persson, Anders & Kadi, Nawar. 2020. Improving Mechanical Textile Recycling by Lubricant Pre-Treatment to Mitigate Length Loss of Fibers. Verkkoaineisto. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1508214/FULLTEXT01.pdf>>. Luettu 14.6.2022.
- 58 Infinited Fiber Company hyödyntää LSJH:n jalostamaa kierrätyskuitua tulevassa lippulaivatehtaassaan. Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://poistotekstiili.lsjh.fi/2021/11/22/infinited-fiber-company-hyodyntaa-lsjhn-jalostamaa-kierratyskuitua-tulevassa-lippulaivatehtaassaan/>>. Luettu 3.6.2022.
- 59 Luku 2: Mitä kierrätetty tekstiilikuitu on ja mihin sitä voi käyttää? Verkkoaineisto. Kuituus. <<https://kuituus.aalto.fi/mita/>>. Luettu 31.5.2022.
- 60 Dahlbo, Helena; Aalto, Kristiina; Salmenperä, Hanna; Eskelinen, Hanna; Pennanen, Jaana; Sippola, Kirsi & Huopalainen, Minja. 2015. Tekstiilien uudelleen käytön ja tekstiilijätteen kierrätyksen tehostaminen Suomessa. Ympäristöministeriö. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/155612/SY_4_2015.pdf?sequence=4>. Luettu 18.5.2022.
- 61 Etsimme yrityksiä mukaan rakentamaan poistotekstiilin kiertotaloutta! Verkkoaineisto. Lounais-Suomen jätehuolto Oy. <<https://poistotekstiili.lsjh.fi/myynti-ja-kumppanuudet/>>. Luettu 2.6.2022.

- 62 Cura, Kirsti; Heikinheimo, Lea; Zitting, Jaakko. 2018. Kuluttajilta kerätyn poistotekstiilin valmistus kuitukankaaksi – kohti tekstiilinkierrätyksen korkeampaa keräysastetta Suomessa. Verkkoaineisto. LAMK pro. <<http://www.lamkpub.fi/2018/02/01/kuluttajilta-keratyn-poistotekstiilin-valmistus-kuitukankaaksi-kohti-tekstiilinkierrätyksen-keräysastetta-suomessa/>>. Luettu 13.6.2022.
- 63 7: Tolkku tekstiilivirtoihin. 2021. Podcast. Kuituus. <<https://kuituus.aalto.fi/podcastit/>>. Luettu 10.6.2022.
- 64 Rouch, Duncan. 2021. Fashion and clothing textiles: how to reduce the environmental and social impacts. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/349546195_Fashion_and_clothing_textiles_how_to_reduce_the_environmental_and_social_impacts>. Luettu 2.6.2022.
- 65 Rengel, Angela. 2017. Recycled Textile Fibres and Textile Recycling. Federal Office for the Environment.
- 66 Sandin, Gustav & Peters, Greg. 2018. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. Teoksessa Klemeš ym. (ed.). Journal of Cleaner Production 184 (2018), s. 363. Elsevier.
- 67 Heikkilä, Pirjo; Hinkka, Ville & Harlin, Ali. 2019. Tekstiilinkierrätyksen prosessien kustannusmallinnus. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24245321/VTT_R_06611_18.pdf>. Luettu 21.6.2022.
- 68 Muuntokuidut. Verkkoaineisto. Mikä kuitu? <<http://kuidut.omasivu.fi/kuitutietoutta/muuntokuidut/>>. Luettu 16.6.2022.
- 69 Kamppuri, Taina. Biopohjaiset kuidut. Verkkoaineisto. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<https://telaketju.turkuamk.fi/uploads/2020/12/6b05eb88-biopohjaiset-kuidut-selvitys-draft.pdf>>. Luettu 16.6.2022.
- 70 Katajainen, Leena. 2016. Puuvillapohjaisen selluloosakarbamaatin elinkaaritase. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto. JYX-tietokanta.
- 71 Nousiainen, Pertti. Selluloosatekokuitujen tuotanto murrosvaiheessa. Verkkoaineisto. Tekstiililehti. <<http://www.tekstiililehti.fi/fi/ajankohtaista/selluloosatekokuitujen+tuotannosta+-toukokuu2021/>>. Luettu 16.6.2022.
- 72 Pylkkänen, Katri; Levón, Satumaija; Kankkunen, Edith. 2021. Tekstiilikuituopas. Verkkoaineisto. Suomen Tekstiili ja Muoti ry.

- <https://www.stjm.fi/wp-content/uploads/2022/02/Tekstiilikuituopas_korjattu.pdf>. Luettu 16.6.2022.
- 73 Recycled can be better than new. 2021. Verkkoaineisto. Lindström Group. <<https://lindstromgroup.com/article/recycled-can-be-better-than-new/>>. Luettu 2.6.2022.
- 74 Zhang, Shaokai; Chen, Chunxia; Duan, Chao; Hu, Huichao; Li, Hailong; Li, Jianguo; Liu; Yishan; Ma, Xiaojuan; Stavik, Jaroslav & Ni, Yonghao. 2018. Regenerated cellulose by the Lyocell process, a brief review of the process and properties. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/324597489_Regenerated_cellulose_by_the_Lyocell_process_a_brief_review_of_the_process_and_properties>. Luettu 15.7.2022.
- 75 Oelerich, Jens; Bijleveld, Marijn; Bouwhuis, Gerrit & Brinks, Ger. 2017. The life cycle assessment of cellulose pulp from waste cotton via the SaXcell™ process. Verkkoaineisto. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 254. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/254/19/192012/pdf>>. Luettu 21.6.2022.
- 76 Zamani, Bahareh; Svanström, Magdalena, Pters, gregory & Rydberg, Tomas. 2014. A Carbon Footprint of Textile Recycling A Case Study in Sweden. Journal of Industrial Ecology, s. 2–9.
- 77 Hokkanen, Mitja. 2020. Environmental impacts of recycling-based cellulose carbamate fiber. Diplomityö. Lappeenranta–Lahden teknillinen yliopisto LUT, School of Energy Systems. LUTPub-tietokanta.
- 78 Paunonen, Sara; Kamppuri, Taina; Katajainen, Leena; Hohenthal, catharina; Heikkilä, Pirjo & Harlin, Ali. 2019. Environmental impact of cellulose carbamate fibers from chemically recycled cotton. Teoksessa Klemeš ym. (ed.). Journal of Cleaner Production 222 (2019), s. 874–878. Elsevier.
- 79 Manžuch, Zinaida; Akelytė, Rūta; Camboni, Marco & Carlander, David. 2021. Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in the Circular Economy. Verkkoaineisto. The European Chemicals Agency. <https://echa.europa.eu/documents/10162/1459379/chem_recycling_final_report_en.pdf/887c4182-8327-e197-0bc4-17a5d608de6e?t=1636708465520>. Luettu 20.6.2022.
- 80 Patagonia's Common Threads Garment Recycling Program: A Detailed Analysis. Verkkoaineisto. Patagonia. <https://www.patagonia.com/on/demandware.static/Sites-patagonia-us-Site/Library-Sites-PatagoniaShared/en_US/PDF-US/common_threads_whitepaper.pdf>. Luettu 29.6.2022.

- 81 Zamani, Bahareh. 2011. Carbon footprint and energy use of textile recycling techniques. Master of Science Thesis. Chalmers University of Technology. Chalmers-tietokanta.
- 82 OVA-ohje: Metanoli. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/metanoli.html>>. Luettu 18.7.2022.
- 83 Palacios-Mateo, Cristina; van der Meer, Yvonne & Seide, Gunnar. 2021. Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability. Verkkoaineisto. SpringerOpen. <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s12302-020-00447-x.pdf>>. Luettu 28.6.2022.
- 84 Muthu, Subramanian. 2020. Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain. E-kirja. Woodhead Publishing.
- 85 Recycled Polyester Fiber ECO PET. Verkkoaineisto. Teijin. <<http://www.hknonwoven.com/eng/pr/ECOPET%20New.pdf>>. Luettu 19.7.2022.
- 86 Uyanik, Seval. 2019. A study on the suitability of which yarn number to use for recycle polyester fiber. Verkkoaineisto. The Journal of The Textile Institute. <https://www.researchgate.net/publication/330424163_A_study_on_the_suitability_of_which_yarn_number_to_use_for_recycle_polyester_fiber>. Luettu 7.7.2022.
- 87 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi. 2008. 2008/98/EY.
- 88 Jätehuolto ja kiertotalous. Verkkoaineisto. Suomen Kiertovoima ry. <<https://kivo.fi/yymmarramme/jatehuolto-ja-kiertotalous/>>. Luettu 20.7.2022.
- 89 Jätevoimala antaa roskalle uuden elämän. verkkoaineisto. Vantaan energia. <<https://www.vantaanenergia.fi/jatevoimala-antaa-roskalle-uuden-elaman/>>. Luettu 29.6.2022.
- 90 Kotitalousjätteen keskimääräinen valtakunnallinen koostumus. Verkkoaineisto. Suomen kiertovoima ry. <https://kivo.fi/yymmarramme/koostumustietopankki/kotitalousjätteen_koostumus_yhteenveto/>. Luettu 28.6.2022.
- 91 Alakangas, Eija; Hurskainen, Markus; Laatikainen-Luntama, Jaana & Korhonen, Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Verkkoaineisto. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>>. Luettu 11.8.2022.

- 92 J.A. Conesa; R. Font; A. Fullana; I. Martí'n-Gullo'n; I. Aracil; A. Ga'ivez; J. Molto' & M.F. Go'mez-Rico. 2008. Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 84 (2009), s. 99. Elsevier.
- 93 Hiilityypit. Verkkoaineisto. uusiutuva vihreä. <<https://www.renovablesverdes.com/fi/tyyppisi%C3%A4-hiilt%C3%A4/>>. Luettu 20.7.2022.
- 94 How does using energy create carbon emissions? Verkkoaineisto. 360 Energy. <<https://360energy.net/how-does-using-energy-create-carbon-emissions/>>. Luettu 20.7.2022.
- 95 Jantunen, Pirjo. 2018. Miksi metsäenergia lasketaan nollapäästöiseksi? Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2018/nollapaastoisyys>>. Luettu 20.7.2022.
- 96 Professional database 2022. Verkkoaineisto. Sphera. <<https://gabi.sphera.com/international/support/gabi/gabi-database-2022-lci-documentation/professional-database-2022/>>. Luettu 11.8.2022.
- 97 Extension database IXa: End of life. Verkkoaineisto. Sphera. <<https://gabi.sphera.com/international/support/gabi/gabi-database-2022-lci-documentation/extension-database-ixa-end-of-life/>>. Luettu 11.8.2022.
- 98 Jylhä, Miia. 2020. Jätteenpolttu ei ole kirosana. Verkkoaineista. Telaketju. <<https://telaketju.turkuamk.fi/blogi/jatteenpolttu-ei-ole-kirosana/>>. Luettu 27.6.2022.
- 99 SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020. 2020. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 100 SFS-EN ISO 14044:2006 +A1:2018 + A2:2020. 2020. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 101 What is GaBi Software? Verkkoaineisto. Sphera. <<https://gabi.sphera.com/overview/what-is-gabi-software/>>. Luettu 14.7.2022.
- 102 openLCA – the Life Cycle and Sustainability Modeling Suite. Verkkoaineisto. OpenLCA. <<https://www.openlca.org/openlca/>>. Luettu 14.7.2022.
- 103 Ympäristövaikutusten arviointiohjelmisto. Verkkoaineisto. SimaPro. <<https://simapro.fi/>>. Luettu 14.7.2022.

- 104 GaBi LCA Databases. Verkkoaineisto. Sphera.
<<https://gabi.sphera.com/databases/gabi-databases/>>. Luettu 14.7.2022.
- 105 ecoinvent Database. Verkkoaineisto. ecoinvent. <<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>>. Luettu 14.7.2022.
- 106 Esteve-Turrillas & Guardia. 2016. Environmental impact of Recover cotton in textile industry. Resources, Conservation and Recycling 116 (2017), s. 114. Elseiver.
- 107 Sandin, Gustav; Roos, Sandra & Johansson, Malin. 2019. Environmental impact of textile fibres – what we know and what we don't know. Fiber Bible part 2. Verkkoaineisto. ResearchGate.
<https://www.researchgate.net/publication/331980907_Environmental_impact_of_textile_fibres_-_what_we_know_and_what_we_dont_know_Fiber_Bible_part_2>. Luettu 22.6.2022.
- 108 Our solution. Verkkoaineisto. Rester Oy.
<<https://www.impactreport.app/rester/Oursolution>>. Luettu 19.5.2022.
- 109 Työvaatteesta rakennuseristeeksi – tekstiilien kierrätyksellä pilotoidaan tuotekehitystä ja otetaan askel kohti vastuullisuustavoitteita. 2022. Verkkoaineisto. Encore Ympäristöpalvelut. <<https://encorepalvelut.fi/2022/06/21/tyovaatteesta-rakennuseristeeksi-tekstiilien-kierratyksella-pilotoidaan-tuotekehitysta-ja-otetaan-askel-kohti-vastuullisuustavoitteita/>>. Luettu 21.6.2022.
- 110 Sustainability. Verkkoaineisto. Recover textile systems. <<https://recoverfiber.com/sustainability>>. Luettu 18.5.2022.
- 111 Infinited Fiber picks site of shut paper plant in Finnish Lapland for its planned EUR 400 million textile fiber factory investment. 2022. Verkkoaineisto. Infinited Fiber Company Oy.
<<https://infinitedfiber.com/blog/2022/06/20/infinited-fiber-picks-site-of-shut-paper-plant-in-finnish-lapland-for-its-planned-eur-400-million-textile-fiber-factory-investment/>>. Luettu 27.7.2022.
- 112 Nevel toimittaa Infinited Fiber Companyn Veitsiluotoon suunnitteleman uusiokuitutehtaaseen energiaa ja vesihyödykkeitä. 2022. Verkkoaineisto. Nevel Oy. <<https://nevel.com/fi/story/nevel-toimittaa-infinited-fiber-companyn-veitsiluotoon-suunnitteleman-uusiokuitutehtaaseen-energiaa-ja-vesihyodykkeitä/>>. Luettu 27.7.2022.

- 113 Minne Fidalle lahjoitetut vaatteet päätyvät? 2020. Verkkoaineisto. Fida secondhand. <<https://www.fida.fi/ajankohtaista/minne-fidalle-lahjoitetut-vaatteet-paatyivat-2020/>>. Luettu 19.5.2022.
- 114 Dahlbo, Helena; Aalto, Kristiina; Eskelinen, Hanna & Salmenperä, Hanna. 2016. Increasing textile circulation—Consequences and requirements. Sustainable Production and Consumption. Elsevier.
- 115 Bodin, Robert. 2016. To Reuse or to Incinerate? Master of Science Thesis. Royal Institute of Technology.
- 116 Periyasamy, Aravin & Militky, Jiri. 2020. LCA (Life Cycle Assessment) on Recycled Polyester. Teoksessa Muthu, Subramanian (ed.). Environmental Footprints of Recycled Polyester, s. 3. Springer Singapore.
- 117 Shen, Li; Worrell, Ernst & Patel, Martin. 2010. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. Teoksessa Xu, Ming (ed.). Resources, Conservation & Recycling, s. 42. Elsevier.

Työn tilaajan asettamat kysymykset

Tässä työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mikä on syntyvien poistotekstiilien määrä Suomessa ja globaalisti?
- Millainen on poistotekstiilien koostumus ja laatu?
- Mikä on nykyinen käsittelytila (minne tekstiilit päätyvät käytön jälkeen nykytilanteessa)?
- Millaisia kierrätysmenetelmiä on olemassa?
- Mitä eri lopputuotteilla korvataan?
- Tarvitseeko lopputuotteet jatkojalostusta vai voidaanko ne hyödyntää sellaisenaan?
- Miten huomioida laadun heikkeneminen?
- Mikä on keräyksen ja kierrätyksen tavoitetila, kun kierrätystavoitteet Suomessa astuvat voimaan: kierrätysastetavoite, kierrätysmenetelmät, joilla kierrätystavoitteisiin päästään ja miten tekstiilien keräys tapahtuu alueellisesti?
- Poistotekstiilin keräyksen palvelutasovaatimukset kuntien järjestämässä keräyksessä?
- Millaisia ympäristövaikutuksia kierrätys ja tekstiilijätteiden poltto aiheuttaa?

Neitseellisten kuitujen valmistuksen päästöt ja energiankulutus

Yhden neitseellisistä materiaaleista valmistetun kuitukilon valmistuksesta aiheutuvat keskimääräiset päästöt ja energiankulutus.

Taulukko 1 Neitseellisten kuitujen valmistuksen päästöt ja energiankulutus [47, s. 127; 107, s. 31, 36; 114, s. 6].

	Päästöt (kg CO₂e/kg)	Energiankulutus (kWh/kg)
Puuvilla (raaka-aineesta kuiduksi)	2,62–4,7	3,3–13,89
Puuvillatuote (kuidusta tekstiiliksi)	7,32–9,6	31,37
Polyesteri	1,7–11,9	14,9–26,7
Polyesterituote	9,6–11,9	26,7–46,45
Viskoosi	1,43–4,78	
Viskoosituote	7,32	31,37
Pellava	0–18,6	
Villa	1,7–36,2	

Mekaanisen kierrätyksen vaikutusarviointilaskennan lähtötiedot

Taulukossa 1 mekaanisen kierrätyksen ympäristövaikutusten laskennassa käytetyt tarkat arvot. B kuvaa parasta skenaariota ja w vähiten suotuista vaihtoehtoa (CO=puuvilla, PES=polyesteri). Taulukossa 2 on eri skenaarioissa käytettyjen tekstiilien hyödyntämistekniikoiden osuudet.

Taulukko 1 Mekaanisen kierrätyksen vaikutukset eri vaikutusluokissa [ks. 54, s. 191, 192, 194–196, 198, 199].

kg CO ₂ e/t	CO b	CO w	CO/PES b	CO/PES w	PES b	PES w
Sähkö	214	214	214	214	214	214
Vesi	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069
Metallien käsittely	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691
Kuidun poltto	3,82	115	46,8	1 090	89,8	2 100
Vältetty neitseellisen kuidun valmistus	-774	-193	-2 310	-1 050	-2 380	-1 080
Vältetty jätteenkäsittely	166	8,57	-785	-213	-1 740	-472
Vältetty lämmön- ja sähköntuotanto	-9,23	-278	-21,2	-495	-33,2	-774
Vältetty neitseellisen kuitukankaan valmistus	-880	-	-446	-	-446	-

Taulukko 2 Poistotekstiilien hyödyntämisen osuudet kuitutyypeittäin [54, s. 177–182, 185–187].

	Kuitukankaan valmistus (%)	Langan valmistus (%)	Energiahyödyntäminen (%)	Metallit (%)
Puuvilla (b)	73	19	3	5
Puuvilla (w)	-	5	90	5
Puuvilla-polyesterisekoite (b)	37	55	3	5
Puuvilla-polyesterisekoite (w)	-	25	70	5
Polyesteri (b)	37	55	3	5
Polyesteri (w)	-	25	70	5