

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2022

Ona Vassallo

KIERRÄTETYN POLYESTERIKUIDUN ELINKAARIARVIOINTI

– Rester Oy:n Paimion tehtaalla

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2022 | 47 sivua

Ona Vassallo

Kierrätetyn polyesterikuidun elinkaariarviointi

- Rester Oy:n Paimion tehtaalla

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Rester Oy:n kierrätyskuidun tuotannon ilmastovaikutuksia elinkaariarvioinnin (LCA) avulla. Elinkaariarviointi perustuu standardeihin LCA-menetelmiin ja rajoittuu tässä työssä kehdosta tehtaan portille, eli poistotekstiilin esikäsittelystä valmiiksi kuiduksi. Tämän opinnäytetyön pohjatietoina käytettiin tutkimuksia tekstiilijätevirroista Suomessa, erilaisista kierrätystekniikoista ja polyesterin tuotantomenetelmien ympäristövaikutuksista, ja laskennan data tuli pääasiassa suoraan Resteriltä. Tulosten tulkinta suoritettiin ja tuloksia verrattiin viimeaikaisiin tutkimuksiin muovipulloista kierrätetyn PET:in ja neitseellisen PES:sin tuotannosta.

Valmistuksen materiaalina oli mainitsemattoman yrityksen poistotekstiili ja toiminnallisena yksikkönä käytetty tonni valmistettua kierrätettyä polyesterikuitua. Suurimmat kasvihuonekaasupäästöt tulivat poistotekstiilien pesusta ja kuivaamisesta sekä laitoksella syntyvän rejektin polttamisesta. Koska LCA-laskurissa oli epävarmoja tietoja, tehtiin myös herkkyysanalyysi. Siitä pääteltiin, että oikealaisen hiilisertifioidun sähkön käytöllä on suuri vaikutus ja että laitoksen jätevirtaa koskevan koostumustutkimuksen tekeminen ja hyödyntäminen saattaisi vähentää hiilidioksidipäästöjä prosessista.

Asiasanat:

Elinkaariarviointi, hiilijalanjälki, kierrätys, tekstiilikuitu

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy- and environmental engineering

2022 | 47 pages

Ona Vassallo

The life cycle analysis of recycled polyesterfibre

- At Rester Ltd's facility in Paimio

The aim was to find out the climate impact of Rester Oy's recycled fiber production through a life cycle assessment (LCA). The analysis is based on standard LCA-methods and restricted to announce data from cradle to the factory's gate, i.e. from the pretreatment of the textile waste to the finished fiber. Studies about textile waste streams from Finland, different recycling technologies and the environmental impact of polyester production methods were used as basic information for this thesis, and the data used in calculations came primarily from Rester. The interpretation of results was done and these results were compared to recent studies of recycled PET from plastic bottles and the production of virgin PES.

The material for the production was waste textile from an unmentioned company and the functional unit used was one tonne of produced recycled polyesterfibre. The largest greenhouse gas emissions came from washing and drying of the waste textiles and burning the rejects of the facility. Because there were some uncertain data in the LCA-calculator, a sensitivity analysis was performed. It concluded that using proper carbon certified electricity does make quite the impact, and that devising a composition study about the factory's waste stream and utilizing the result in the future could bring down the carbon emissions of the process.

Keywords:

Life cycle analysis, carbon footprint, recycling, textile fibers

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Poistotekstiilin materiaalivirrat ja tekstiilien kierrätystekniikat	10
2.1 Poistotekstiilien materiaalivirrat Suomessa	10
2.2 Polyesterin kierrätystekniikat	12
2.3 rPET ja neitsyt polyester	14
3 Elinkaariarviointi	19
4 Menetelmät - Kierrätetyn polyesterin elinkaariarviointi	21
4.1 Tavoite ja laajuus	22
4.1.1 Rajaukset, Oletukset & Epävarmuustekijät	24
4.2 LCI – Elinkaaren inventaario	26
4.2.1 LCA-laskurin rakentaminen	29
4.3 LCIA – Elinkaarivaikutusten arviointi	30
4.3.1 Hiilijalanjälki	30
4.3.2 Vedenkulutus	34
5 LCA-tulosten tulkinta	35
5.1 Herkkyyssanalyysi	35
5.1.1 Rejektin koostumus	35
5.1.2 Sähkön päästökertoimien muutokset	36
5.2 Vertailu rPET & neitseellinen PES	38
5.3 Suositukset	40
6 Johtopäätökset	42
Lähteet	44

Kaavat

Kaava 1. Laskurissa käytetty kaava.	29
-------------------------------------	----

Kuvat

Kuva 1. Tekstiilivirrat Suomessa (Dahlbo ym. 2021).	11
Kuva 2. Lähikuva mekaanisesti avatusta polyesterikuidusta.	13
Kuva 3. PES kuitukangaslaatu eri väreihin lajiteltuna.	14
Kuva 4. rPET kuitukangas.	15
Kuva 5. Prosessi Paimion tehtaalla.	21
Kuva 6. Rejeksiä prosessista.	23
Kuva 7. Kierrätetyn PES kuidun systeemikaavio.	24
Kuva 8. Pölyä, joka luokitellaan myös rejektiksi.	25
Kuva 9. Valmis PES kuitukangaslaatu paalattuna ja varastoituna.	30
Kuva 10. GWP 100, t CO ₂ ekv. Rester Oy:n Paimion tehdas ja esimerkkinä käytetty pesula.	32
Kuva 11. Kierrätetyn polyesterikuidun GWP 100 Paimion tehtaalla, ex. Pesula.	33
Kuva 12. Ilman pesulan suurta päästöä suurin on rejektien poltto (tonnia CO ₂ -ekv).	33
Kuva 13. Rejektin laskennallinen hyöty verrattuna Skenaarioon 1.	36
Kuva 14. Skenaarioiden 1, 2 ja 3 sähkönkulutuksen päästöjen vertailu keskenään.	37
Kuva 15. Sähkön skenaarioiden osuus kokonaispäästöistä.	38
Kuva 16. Sähkön skenaarioiden osuus päästöistä, joihin ei ole laskettu pesulan päästöjä mukaan.	38
Kuva 17. Lämmön kulutuksen vertailu Rester:in kierrätetyn polyesterin, neitsyt polyesterin ja rPET:in kesken (per tonni kuitua).	39

Kuva 18. Kierrätetyn polyesterikuidun GWP 100 vertailu (per tonni kuitua). 40

Taulukot

Taulukko 1. Vertailukohteet polyesterikuidun tuotannon päästöistä ja lämpöenergian kulutuksesta, per tonni kuitua.	17
Taulukko 2. Laskurissa käytetyt tiedot, joihin lisätään päästökertoimet, per tonni tuotettua PES kuitua.	27
Taulukko 3. Laskurissa käytetyt päästökertoimet.	28
Taulukko 4. Kasvihuonekaasupäästöt Paimion kierrätys prosessissa, skenaariossa 1, per tonni lopputuotetta.	31
Taulukko 5. Hiilijalanjälki ilman pesulan osuutta.	32
Taulukko 6. Veden kulutuksen jakautuminen systeemissä.	34
Taulukko 7. Rejektin koostumus.	35
Taulukko 8. Sähkön päästökertoimien skenaariot (1-3).	37

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Lyhenne	Lyhenteen selitys (Lähdeviite)
LCA	Life Cycle Analysis, Elinkaariarviointi
LCI	Life Cycle Inventory, Elinkaaren inventaario
LCIA	Life Cycle Impact Assessment, Elinkaarivaikutusten arviointi
rPET	Recycled polyethylene terephthalate, Kierrätetty PET tai pullopet
PES	Polyesteri
COT	Puuvilla
PEF	Product environmental footprint, Tuotteen ympäristöjalanjälki
GWP	Global warming potential, ilmaston lämpenemispotentiaali
PESCO	Polyester-Cotton blend, Polyesteri-puuvilla sekoite

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja, Rester Oy, on tekstiilinkierrätysratkaisuja tarjoava suomalainen yritys, joka mahdollistaa yritystekstiilien kierrätyksen uudeksi tekstiilikuiduksi. Työn tarkoitus on selvittää Rester Oy:n Paimion tehtaalla kierrätetyn polyesterikuidun elinkaariarviointi (LCA) tietyin rajauksin.

Euroopan parlamentin vuonna 2018 hyväksymän jätedirektiivin mukaan EU-maiden on vuoteen 2025 mennessä erilliskerättävä tekstiilit (EU 2018/851). Komission uuden strategian toimenpiteillä myös tuetaan kiertotalouden materiaali- ja tuotantoprosesseja, puututaan vaarallisiin kemikaaleihin ja autetaan kuluttajia valitsemaan kestäviä tekstiilejä (Euroopan komissio 2020).

Suomen hallitus on jo vuonna 2021 alkanut selvittämään mahdollisuutta käynnistää tekstiilien erilliskeräys ennen jätedirektiivissä asetettua vuoden 2025 määräaikaa (HE 40/2021). Tämä selvitys hyväksyttiin 18.11.2021 ja se velvoittaa nykyistä tehokkaampaan erilliskeräykseen ja kierrätykseen. Erilliskeräysvelvoite koskee Suomessa myös tekstiilijätettä vuodesta 2023 lähtien (Suomen tekstiili ja muoti 2021), mikä tarkoittaa Suomen olevan kaksi vuotta EU:n aikatavoitetta edellä.

Vuoteen 2025 mennessä on siis tulossa suuria muutoksia tekstiilijätteen keräykseen ja yleisen keräyksen lisääminen avaa myös mahdollisuuksia uusille materiaalivirroille. Euroopan komissio (2022) on luonnostellut strategiaa, jonka avulla pyritään tarjoamaan alueen tekstiiliteollisuudelle puitteet kestäväää kehitystä tukevan ja kilpailukykyisen toiminnan mahdollistamiseksi. Aloitteessa mainitaan mahdollisten tavoitteiden asettamisesta tekstiilin kierrätyksen ja keräyksen tehostamiseksi entisestään, joiden alla Rester Oy:n kaltainen yritys toimii.

Tämän työn tavoitteena on arvioida Rester Oy:n Paimion tehtaalla tapahtuvan kierrätetyn polyesterikuidun tuotannon hiilijalanjälki ja sen tulosten vertailu rPET-kuituun ja neitseelliseen polyesterikuituun. Toinen tärkeä tavoite on löytää systeemin prosesseista paranneltavaa ja esittää ehdotukset tässä

opinnäytetyössä. Aluksi tutustutaan polyesterin ilmastovaikutuksiin ja esitellään tutkimusmetodina käytetty elinkaariarviointi.

2 Poistotekstiilin materiaalivirrat ja tekstiilien kierrätystekniikat

Tämä luku selvittää Suomen poistotekstiilin materiaalivirtoja, polyesterikuidun (PES) tuotantoa, mitä kuidulle yleensä tapahtuu käytön jälkeen ja mitä mahdollisuuksia sillä on. Rester Oy:lle tuleva materiaali, jota tässä opinnäytetyössä tutkitaan, on polyesteriä tai polyesterisekoitetta, joka Paimion tehtaalla mekaanisesti avataan ja kierrätetään. Tässä työssä Paimion tehtaalla kierretettävät tekstiilituotteet ovat post-consumer poistotekstiilijätettä, jotka poistuvat omista tekstiilikierroistaan saadakseen uuden elämän uutena tuotteena. On myös olemassa pre-consumer tekstiilijätettä, joka on suoraan tehtailta tulevaa tekstiilijätettä. Tämä yleensä esiintyy tuotannon sivuvirtana, esimerkiksi kun kankaita leikataan. Jätteenä pre-consumer jae on yleisesti laadultaan tasaisempaa kuin post-consumer poistotekstiili, ja täten helpommin kierrätettävissä (Suomen tekstiili ja muoti 2021).

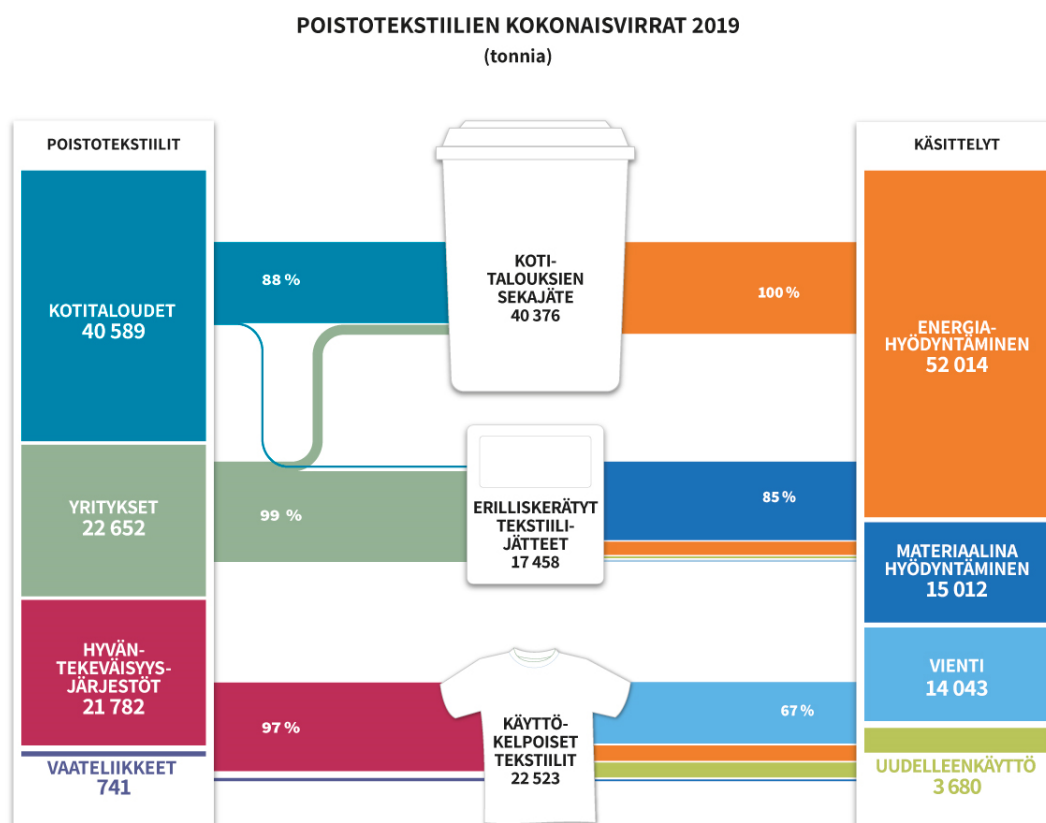
Polyesteri on eniten tuotettu tekstiilikuitu, jota pääsääntöisesti tuotetaan Kiinassa. Vuonna 2020 polyesterin kokonaistuotanto oli noin 63 miljoonaa tonnia. Sen osuus globaaleista kuitumarkkinoista oli noin 56 prosenttia (Suomen tekstiili ja muoti 2021, The Fiber Year 2021 s.321 mukaan.), ja josta kierrätetyn polyesterin osuus oli noin 14,7 prosenttia samana vuonna.

Tutkimukset ovat osoittaneet, että neitseellisen ja kierrätetyn polyesterin ominaisuudet ovat samanlaiset, paitsi lujuus, joka heikkenee kierrätetyn polyesterin tapauksessa kierrätysprosessin aikana (Sandin ym. 2019). Ominaisuudet vaihtelevat enemmän, kun polyesteriä kierrätetään useasti. Arviolta noin 99 prosenttia kierrätetystä polyesteristä valmistetaan PET-muovipulloista termisesti kierrättämällä (Suomen tekstiili ja muoti 2021).

2.1 Poistotekstiilien materiaalivirrat Suomessa

Vuoden 2019 tehdyn selvityksen mukaan Suomessa vaatteiden ja kodintekstiilien kulutuksessa on pysytty samalla tasolla kuin vuonna 2012

(SYKE 2021). Poistotekstiilien keräys kotitalouksista on sen sijaan lisääntynyt: vuodesta 2012 vuoteen 2019 on tapahtunut 39% kasvu. Kun vuonna 2019 tekstiilien kokonaiskäyttö selvitettiin Suomessa se oli 130 811 tonnia, joista käytettiin yli 62 000 tonnia uusia vaatteita ja kodin tekstiileitä (Dahlbo ym. 2021). Suurin osa käytetyistä vaatteista, noin 40 000 tonnia, päätyi sekajätteeseen (Kuva. 1.), josta se on hyödynnetty energiana.



Kuva 1. Tekstiilivirrat Suomessa (Dahlbo ym. 2021).

Erilliskerätyt tekstiilijätteet koostuivat suurimmalta osin yrityksiltä kerätyistä poistotekstiileistä, joista pystyttiin hyödyntämään noin 15 000 tonnia materiaalina, mikä on yli 85% kaikesta erilliskerätystä tekstiilistä. Suuri prosentuaalinen osuus johtuu todennäköisesti siitä, että erilliskerätyt tekstiilit ovat käyttökelpoisia (puhtaita ja ehjiä). Tämän tilaston ulkopuolelle jäävä tekstiilijäte poltetaan. Motivan (2018) mukaan kuluttajilta kerättyjen tekstiilien käyttö kierrätyksessä voi olla hankalaa materiaalin kirjavuuden takia. Jotta materiaalivirrat Rester Oy:n kaltaisille yrityksille löytäisivät tiensä ja

vahvistuisivat, myös tekstiilituotteiden alkuperäisillä valmistajilla on vastuu tuotteen uudelleenkäyttö- ja kierrätysmahdollisuuksista (Motiva 2018). Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että vaatteiden alkuperäisessä kierrossa kirjavuuteen, laadun tasaisuuteen ja kestävyYTEEN on puututtu ja poistotekstiileille mietitty kierrätysmahdollisuudet.

2.2 Polyesterin kierrätystekniikat

Yleisesti polyesteriä kierrätetään mekaanisesti, kemiallisesti sekä termisesti. Kemiallisessa kierrätysprosessissa on mahdollista saada aikaan neitseellisen kuidun veroista tekstiilikuitua (Auranen 2018). Polyesterin kemiallinen kierrätys on kuitenkin kallista eikä sen vuoksi yhtä yleistä kuin terminen kierrätys (Suomen tekstiili ja muoti 2021, 63).

Termisessä kierrätysprosessissa polyesterituote, usein pullopolyester, revitään mekaanisesti pienemmiksi rakeiksi, minkä jälkeen rakeet sulatetaan ja prosessoidaan uudestaan kuiduksi (Suomen tekstiili ja muoti 2021, 63).

Mekaaninen kierrätys tarkoittaa poistotekstiilien kierrätyksessä kankaiden avaamista ja leikkuuta koneilla. Mekaaninen tapa huonontaa kankaaksi tarkoitetun lopputuotteen laatua lyhentämällä kuidun pituutta, joka vaikuttaa kankaan kestävyYTEEN. Lyhennettyyn kuituun on yleensä lisättävä neitseellistä raaka-ainetta mukaan, jotta saataisiin tarpeeksi pitkää, hyvänlaatuista ja käytön kestävä kuitua, josta tehdä laboratoriotestit läpäisevää kangasta (Auranen 2018). Resterillä tehdään sekä kuitukangaslaatua että lankalaatua, joista käsittelemme tässä opinnäytetyössä vain toista, kuitukangaslaatua. Kuitukangaslaatuun (Kuva 2.) ei tarvitse lisätä neitseellistä polyesteriä kuidun pidentämiseksi, sillä siitä ei tule lankaa eikä kangasta, vaan esimerkiksi akustiikkalevyn täytettä. Kuidun pituuteen voidaan vaikuttaa jonkin verran mekaanisen kierrätyksen prosessin aikana muun muassa hienosäätämällä koneiden syöttönopeutta.



Kuva 2. Lähikuva mekaanisesti avatusta polyesterikuidusta.

Resterin tehtaalte tuleva poistotekstiili on valmiiksi lajiteltua mm. kankaan laadun ja värin mukaan, mitkä vaikuttavat lopputuotteeseen ja sen käyttömahdollisuuksiin (Kuva 3.). rPET lankaa tehdessä langan väri määräytyy pitkälti minkä värisistä pulloista sitä on tehty, ellei langan muotoiluvaiheessa lisätä väriaineita. Markkina-arvoltaan korkein pulloPET on läpinäkyvää (Shen ym. 2010).



Kuva 3. PES kuitukangaslaatu eri väreihin lajiteltuna.

2.3 rPET ja neitsyt polyester

Jotta voitaisiin vertailla Rester Oy:n kierrätetyn PES kuidun ympäristövaikutuksia kierrätettyyn pullopolyesterikuituun ja neitseelliseen polyesterikuituun, on löydettävä suhteellisen samanlaiset prosessit ja lopputuotteet joita vertailla. Yleisesti polyesterikuitu on loistava eristäjä, se on vahva ja sillä on korkea vetolujuus. Muita toivottavia ominaisuuksia ovat sen kulutuskestävyys ja tulenkesto. Nämä ominaisuudet tekevät siitä erinomaisen äänieristysmateriaalin esimerkiksi teollisuudessa (Phelps 2021). Kuvassa 4. näkyy rPET:istä tehty akustiikkalevyn täyte.



Kuva 4. rPET kuitukangas.

Pullopolyesterin kierrätysprosessi sisältää pullojen keräämisen lajitteluasemilta ja pullojen hajottamisen hiutaleiksi ennen kuin mekaaninen kierrätysprosessi voi alkaa. Pullopolyesterin mekaaninen kierrätys (aikaisemmin kuvailtu terminen kierrätys) eroaa Paimion tehtaalla tapahtuvasta mekaanisesta kierrätyksestä niin, että osassa prosessia polyesterihiutaleet sulatetaan (melt-extruded) ja muotoillaan säikeeksi (filaments), joka sitten leikataan kuiduksi ja paalataan.

Molemmissa prosesseissa, sekä rPET:in että Paimion PES kuidun tapauksissa, LCA laskenta lähtee yleensä käyntiin ”cut-off” -säännöstä, eli siitä kun jäte otetaan ulos sen omasta materiaalikierrosta ja siirtyy uuteen kiertoon nollapäästöisenä. Kierrätetyn pullopolyesterin tapauksessa prosessiin lisätään lämpöä materiaalin sulattamista varten noin 13 GJ:n verran per tonni kuitua (Shen ym. 2010), kun taas Paimion tehtaan prosessi vie lämpöä vain tilojen lämmityksen verran.

ALPLA:n vuonna 2017 tekemän selvityksen tuloksena kierrätetyn pullopolyesterin CO₂-päästöt olisivat 79 prosenttia pienemmät verrattuna neitseelliseen polyesterimateriaaliin, ja hiilijalanjäljeksi laskettiin 0,45 kg CO₂ ekvivalenttia per kilo kierrätettyä pullopolyesteriä (Packaging Europe 2017). Näihin lukuihin oli vaikea löytää varmistettua dataa, eikä kyseisen tutkimuksen laskurin metodeja voitu tarkistaa. Sama selvitys väitti neitseellisen polyesterin tuotannon päästöjen olevan 2,15 kg CO₂ ekv per kilo.

ALPLA väitti uudestaan jo vuonna 2018 pystyneensä vähentämään rPET:in CO₂ päästöt 0,21 kg CO₂ ekvivalenttiin (Higgs 2018), ja vuonna 2020 nollaamaan päästöt (Packaging Europe 2020). Nämä luvut saavutettiin laskemalla energian kulutuksesta tulevat päästöt uusiutuvien energioiden päästökertoimilla, jotka ovat usein oletettu lähelle nollaa tai nollaksi. Jälkimmäinen nollapäästöinen rPET saavutettiin sertifioimalla; yritys tarjoaa asiakkailleen hiilineutraalia rPET:tä sertifikaattien oston perusteella. Jäljellä olevat väistämättömät päästöt, jotka liittyvät esimerkiksi syöttömateriaalin toimittamiseen tehtaille, korvataan siten hiilisertifikaateilla (Packaging Europe 2020). Näiden lukujen vertaaminen tämän opinnäytetyön tuloksiin on epäolennaista, sillä niistä ei ole julkista dataa juuri laisinkaan. Paimion tehtaan kierrätetyn polyesterikuidun tuotannon sähkö ostetaan päästöttömistä lähteistä, mutta herkkyysanalyysissä otetaan huomioon myös yleiset sähköverkon päästökertoimet.

Aikaisemmin rPETin tuotannon päästökertoimeksi on laskettu 0,96 t CO₂ ekvivalenttia per tonni kuitua (Shen ym. 2010), joka on huomattavasti korkeampi kuin ALPLA:n luku, mutta paljon paremmin dokumentoitu. Se

sisältää mekaanisen kierrätyksen lämpösulattamalla, materiaalien kuljetukset ja pesun, sekä valmiin tuotteen paalauksen. Tutkimuksessa mainitaan myös PET pullojen kierrätyksen kuiduksi muilla metodeilla, kuten semi-mekaaninen ja kemiallinen kierrätys. Näiden GWP 100 (global warming potential, ilmaston lämpenemispotentiaali) on korkeampi, ja niiden prosesseissa yritetään saada ulos neitseellistä polyesteriä laadultaan vastaavaa kuitua. Niiden GWP jää kuitenkin neitseellistä polyesterikuitua, 4,06 t CO₂ ekv. (Shen ym. 2010), pienemmäksi.

Muut lähteet arvioivat neitseellisen polyesterin GWP:n välille 1,7-4,5 kg CO₂ ekvivalenttia per kilo kuitua, riippuen kuidun bio-pohjaisuudesta (Roos ym. 2015). Neitseellinen polyesteri myös vie enemmän energiaa: jopa 95 GJ tuotettua kuitutonnin kohden. Energia on usein tuotettu fossiilisilla lähteillä (Shen ym. 2010).

Kokonaisuudessaan mekaanisesti kierrätetyn rPET:in ilmaston lämmityspotentiaali on 76% alhaisempi kuin neitseellisen polyesterin (Shen ym. 2010), ja se on jo itsessään vakuuttavaa. Tässä ongelma on kuitenkin se, että kun pullopolyesteri karkaa omasta materiaalikierrostaan on tilalle tullut materiaali tuotettu fossiilisilla polttoaineilla.

Taulukko 1. Vertailukohteet polyesterikuidun tuotannon päästöistä ja lämpöenergian kulutuksesta, per tonni kuitua.

	rPET CO₂ (t CO₂ ekv)	Neitseellinen PET (t CO₂ ekv)	rPET, lämpö (GJ)	Neitseellinen, lämpö (GJ)
<i>ALPLA 2017</i>	0.45	2.15	ei tiedossa	ei tiedossa
<i>Shen ym. 2010</i>	0.96	4.06	13	95
<i>Roos ym. 2015</i>		1.7-4.5		96

Taulukkoon 1. on koottu tämän opinnäytetyön vertailukohteet. Kierrätetyn polyesterin LCA-laskenta on vielä alkutekijöissään, eikä varteenotettavia vertailukohteita ole monia. Prosessien laskenta on vielä alkutekijöissään siksi, koska kaupallisen tason tuotanto on aikaisempien laskentojen aikaan ollut vähäistä ja teknologia kierrätykselle vasta kehittymässä. Tämän opinnäytetyön laskennassa keskitytään kuitukangaslaatuun, kun taas vertailukohdista ei ole tietoa ovatko ne lankalaatua vai kuitukangaslaatua ja kuinka tämä ero vaikuttaisi tuotantoon.

Tässä kohtaa on hyvä ymmärtää, että jos kierrätys vain lisää tuotantoa kokonaisuudessaan, eikä neitseellisen raaka-aineen tuotantoa korvata millään, niin vaikuttaa siltä, ettei kierrätyksestä ole minkäänlaista ympäristöllistä hyötyä. Tämä pätee huomattavasti esimerkiksi puuvillan tuotannossa puhuttaessa veden kulutuksesta ja ekotoksisuudesta (Roos ym. 2015). Polyesterin kemiallisesti tuotettu kuitu, joka tuottaisi laadultaan neitseellistä vastaavaa kuitua, pystyisi teoreettisesti korjaamaan tämän, vaikka sen tämän hetkiset kasvihuonekaasupäästöt ovat korkeammat kuin mekaanisen kierrättämisen. Tämäkin pätee vain, jos laadullisesti neitseellistä vastaavaa kuitua käytettäisiin alkuperäisessä kierrossaan, jonka kriteerit Rester Oy:n lankalaatuisen polyesterikuidun tuotanto täyttää. Lankalaatuisen kuidun tuottaminen on jo suljetun kierron kierrättämistä (poistotekstiilistä uudestaan käyttökelpoiseksi tekstiiliksi), eli siinä tapauksessa vajetta tekstiilikiertoon ei synny. Tässä opinnäytetyössä tutkitulla kuitukangaslaadulla korvattaisiin sekä neitseellistä että rPET kuitua, kun kyse on akustiikkalevyjen tuotannosta, mutta vaikutusta poistotekstiilien alkuperäiseen kiertoon ei tiedetä.

3 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi tai Life Cycle Assessment (LCA) on työkalu, jossa systeemiin tulevat ja siitä poistuvat määrälliset materiaali- ja energiavirrat lasketaan ja arvioidaan päästöjen ja ympäristövaikutusten mukaan. Tutkimukset sisältävät kaikki elinkaaren vaiheet kehdosta hautaan: raaka-aineiden hankinta, valmistus, käyttö ja käyttöön päättymiskäsittely. Joskus laajuus on rajallisempi, esim. kehdosta tehtaan portille, joka keskittyy vain tuotantovaiheeseen, kuten tämän opinnäytetyön rajaus. Tulokset lasketaan toiminnallista yksikköä kohden, joka on tuotejärjestelmän ennalta määritetty tulos. LCA voi selvittää tuotteen, palvelun tai kokonaisen yrityksen ympäristövaikutuksia. (SFS-EN ISO 14040, 2006; SFS-EN ISO 14044, 2006.)

On siis kyseessä suhteellinen ympäristövaikutusten tarkastelu, jossa huomataan kriittisimmät kohdat vaikutuslajien kannalta ja mitkä prosessit ovat herkkiä päästöille ja kokonaiskulutukselle. Analyysillä haetaan kokonaiskuvaa systeemistä.

LCA sisältää neljä vaihetta: tavoitteen ja laajuuden määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusten arviointi ja tulosten tulkinta. Tavoite määrittää mitä varten ja kenelle analyysi on tarkoitettu. Laajuus tarkoittaa analyysin tarkkuutta, systeemikuvaa, toiminnallista yksikköä, vaikutusten harkintaa ja laskentametodeja.

Inventaarioanalyysi kokoaa laskuriin kaiken systeemiin syötetyn sekä ulos tulevat virrat, jotka yhdessä muodostavat lopputuloksen. Osaa näistä tiedoista kutsutaan primääridataksi, eli suoraan toimeksiantajalta saaduiksi tiedoiksi. Osa tiedoista on sekundaaridataa, eli kirjallisuutta tutkimalla saatua tietoa, joka voi poiketa todellisesta tilanteesta, mutta on lähin mitä pystymme laskurissa käyttämään aikaisempien tutkimusten perusteella.

Vaikutuksen arviointi ja tulosten tulkinta tehdään laskurista saatujen tietojen ja oletusten pohjalta. Inventaarioanalyysin jälkeen vaikutuksiin sovelletaan elinkaari-vaikutusten arviointia (LCIA), joka lasketaan esimerkiksi ilmaston

lämmityspotentiaalina (GWP) sadalle vuodelle. Tämä näkyy taulukoissa muodossa kg CO₂- tai t CO₂ -ekvivalenttina.

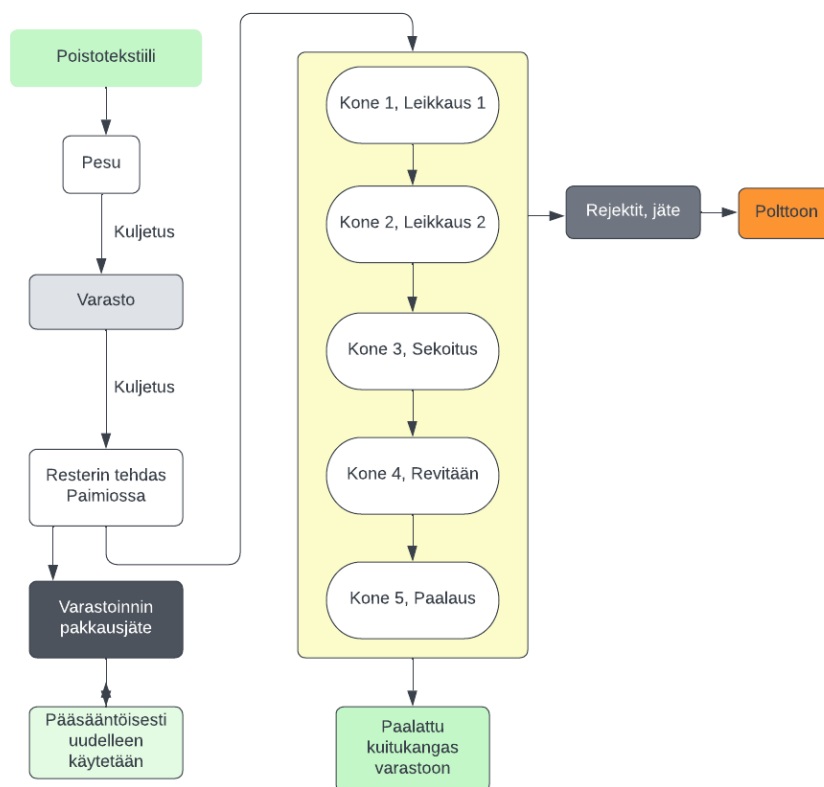
LCA ymmärretään useimmiten viitaten ISO-standardeihin 14040 ja 14044. Nämä kuvaavat vain yleistä rakennetta ja vaatimuksia jättäen paljon tilaa yksilöllisille valinnoille. Muitakin metodeja voidaan käyttää, kuten GHG-protokolla sekä tuotteen ympäristöjalanjäljen (PEF) laskenta.

LCA:lla on edelleen monia rajoituksia ja epävarmuustekijöitä, jotka on tunnustettava kun käyttää työkalua ja sen tuloksia. Oikein tehty tutkimus selittää kaikki oletukset avoimesti, väittämättä mitään, mitä ei voida todistaa. Erilaiset LCA-sovellutukset ja menetelmät tarkoittavat, että kaikki tulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään. Väärät tulkinnat voivat johtaa suurempiin ympäristövaikutuksiin, vaikka alkuperäiset tavoitteet ovat päinvastaiset.

4 Menetelmät - Kierrätetyn polyesterin elinkaariarviointi

Resterin tehtaalla kierrätetään mm. polyesterikankaita ja polyesterisekoitekankaita mekaanisesti avaamalla ne, silppuamalla ne kaksi kertaa, sekoittamalla ja repimällä ne auki (Kuva. 5.). Prosessin lopuksi kuitu paalataan, jonka jälkeen se on valmis lähtemään tehtaalta. Paimion tehtaalla tapahtuva mekaaninen kierrättäminen tarkoittaa, ettei prosessissa käytetä vettä tai sulamisprosesseja kuidun uudelleen muotoiluun, toisin kuin kemiallisissa tai termisissä kierrätysprosesseissa. Muun muassa kierrätetty pullopolyester tai rPET joudutaan kierrättämään kemiallisesti tai termisesti.

Rester Oy:n Paimiossa sijaitsevan tehtaan prosessi



Kuva 5. Prosessi Paimion tehtaalla.

Tämän opinnäytetyön laskenta alkaa tekstiilijätteen keräyksestä, eli jäte tulee systeemiin nollapäästöisenä jonka jälkeen huomioidaan kaikki myöhempi prosessointi (Salmenperä 2017). Jätelain (646/2011) mukaan jätteellä

tarkoitetaan ainetta tai esinettä, jonka sen haltija on poistanut tai aikoo poistaa käytöstä. Tekstiilijäte on käytöstä poistettua tekstiiliä, joka on kerätty kierrätystä tai muuta hyödynnystä varten eikä se myöskään kelpaa sellaisenaan uudelleenkäyttöön eli se on rikkinäistä ja/tai likaista (Salmenperä 2017). Tekstiilijätteitä kierrätetään mekaanisesti, kemiallisesti tai termisesti, joilloin käsittelystä tulee uusien tuotteiden raakaaineita.

Tarkempi raja Rester Oy:lle tuleville poistotekstiileille on post consumer - tekstiilijäte, joka on laissa luokiteltu kuluttajilta kerättyksi, sekalaiseksi tai entuudestaan tuntemattomaksi tekstiilijätteeksi. Tälle on terminä ehdotettu suomenkielistä ”kuluttajapoisto” nimeä. (Auranen 2018). Rester Oy:lle tulevat tekstiilit ovat lajiteltua yrityksiltä kerättyjä poistotekstiilejä, mutta poistuvat kuitenkin kuluttajien käytöstä, eikä niitä voi siksi luokitella pre-consumer - jätteeksi. Poistotekstiilit ovat valmiiksi lajiteltu, ja tämän opinnäytetyön LCA-laskenta alkaakin poistotekstiilien pesusta esimerkiksi valitussa pesulassa ja kuljetuksista Rester Oy:n Paimiossa sijaitsevalle tehtaalle.

Rester Oy:n tuotanto on avoimen kierron kierrättämistä siksi, koska polyesterikangas otetaan pois sen omasta kierrosta kankaana ja se saa uuden elämän uutena tuotteena (Sandin ym. 2019). Kiertoa kutsutaan avoimeksi, sillä siinä poistuu materiaali sen alkuperäisestä kierrosta. Usein avoin kierto huonontaa materiaalin laatua niin, ettei sitä voi enää käyttää sellaisenaan aikaisemmassa kierrossa, ja uudesta tuotteesta ei enää käytön jälkeen voida valmistaa uutta laatua vastaavaa tuotetta.

4.1 Tavoite ja laajuus

Laskennan tavoitteena on selvittää Rester Oy:n Paimiossa sijaitsevalla tehtaalla tuotetun kuitukangaslaadun hiilijalanjälki prosessissa, jossa tuotetaan kuitua mm. akustiikkalevyjen täyttöön. Työn tarkoitus on selvittää tietyn kuitukangaslaadun kasvihuonekaasupäästöt kyseisellä tehtaalla. Prosessi on iteratiivinen eli itseään korjaava: työn tulokset voivat vaikuttaa prosessin osiin

positiivisesti siinä mielessä, että se tuo esille korjattavia tai paranneltavia kohtia tehtaalla.

Tässä työssä kierrätettyä polyesterikuitua tarkastellaan kehdesta tehtaan porteille, mikä sisältää nollapäästöiseksi oletetun poistotekstiilin pesun ja kuljetuksen Resterin tehtaalle Paimioon, kankaiden kierrätyksen mekaanisesti avaamalla ja valmiin tuotteen paalaamisen.

Tiedossa ei ole vielä varastoinnin viemää aikaa, vaikka Knuutila (suul. tiedonanto 28.4.2022) mainitsi pyrkimyksen pienentää varastointiaikaa minimissään viikkoon. Tähän työhön ei sisällytetä varastoinnista aiheutuvaa infran lämmitystä, vaan yleiset tehtaan lämmityskustannukset toiminnallisen yksikön tuotannon ajalta.

Laskurissa toiminnallisena yksikkönä käytetään 1000 kg tuotettua polyesterikuitua, joka muotoutuu prosessin aikana sisään syötetystä tonnimäärästä ja siitä poistuvasta rejektin, eli sivuvirtana syntyvän jätteen määrästä. Rejektit sisältävät nappeja, vetoketjuja ja pölyä, jotka poistuvat koneista tuotannon aikana (Kuvat 6.).

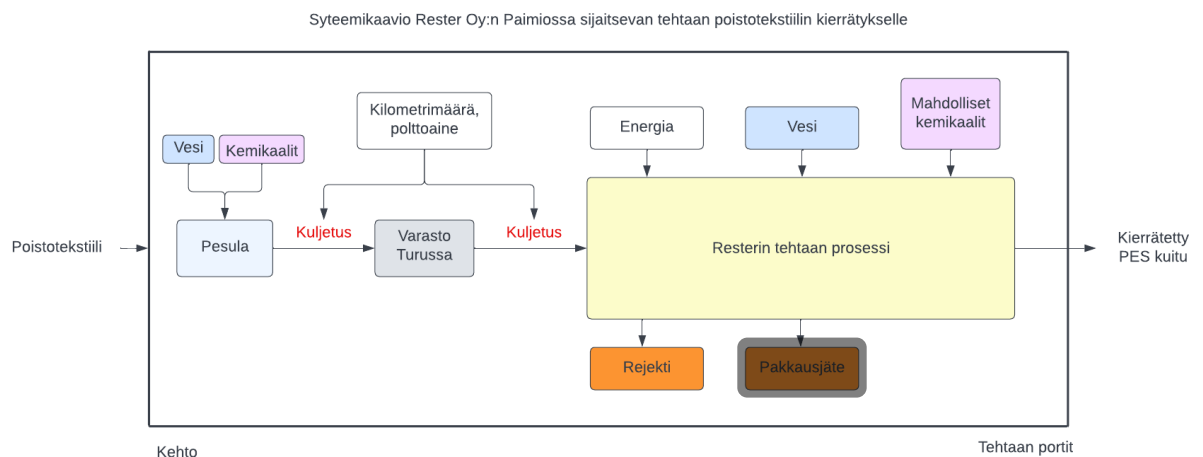


Kuva 6. Rejektiä prosessista.

4.1.1 Rajaukset, Oletukset & Epävarmuustekijät

Työ on rajattu tutkimaan PES/PESCO kuitukangaslaadun tuotantoa, eli vain osaa koko tehtaalle tulevan kankaan kierrätyksestä. Systeemi on rajattu pesusta ja tehtaalle kuljetuksesta aina valmiin kuitukankaan paalaukseen asti (Kuva 7.).

Työ ei ota huomioon varastointiin liittyviä infran lämmityskustannuksia, sillä opinnäytetyön teon hetkellä varastointiaika ei ole varma ja tulee muuttumaan. Knuutilan mukaan (suul. tiedonanto 28.4.2022) optimaalinen varastointiaika Paimion tehtaalla olisi alle viikon, mutta virallisesti se ei ole vielä tiedossa. Lisäksi työ ei ota huomioon kartonkipakkausjätteen (suursäkit ym. jotka pääsääntöisesti uusiokäytetään) päästöjä, sillä Paimion tehdas on siirtymässä käyttämään erilaisia kuljetuksen aikana käytettäviä kestopakkauksia, joiden ei oleteta menevän rikki siinä määrin, että se olisi työlle olennaista. Kuvassa 7. pakkausjäte on siis harmaamaalattu, jotta se jäisi systeemin rajauksesta pois.



Kuva 7. Kierrätetyn PES kuidun systeemikaavio.

Tässä kohtaa Rester Oy:n prosessia (27.4.2022) ei oteta huomioon prosessista tulleen pölyn uudelleen käyttöä, vaan se menee oletuksena muun

rejektimateriaalin kanssa polttoon (Kuva 8.). Polttoon menevän rejektin koostumusta ja hiilen määrää on vaikea määrittää, ja se tulisi olla seuraava selvitettävä asia Rester Oy:n Paimion tehtaalla. Ei ole tiedossa rejektin prosentuaalista koostumusta tai osien painoa, mikä tekee jätteenpoltosta vapaaksi pääsevän hiilidioksidin sekä syntyvän energiamäärän arvioinnin hankalaksi. Metalliset osat ovat polttolaitoksella päästö- ja lämpöarvoiltaan automaattisesti nolla, mutta kuten todettu, sen määrän tarkka arviointi ei ole tässä kohtaa mahdollista. Polttoon menevä rejekti siis lasketaan jätteenkäsittelyn keskimääräisellä päästökertoimella ja huomioidaan myöhemmin herkkyysanalyyseissä.



Kuva 8. Pölyä, joka luokitellaan myös rejektiksi.

Useissa vasta käyttöön otetuissa teollisissa prosesseissa on epävarmuustekijöitä, kuten koneiden sähkön kulutus, tehokkuuden maksimointi ja kuljetusten päästöt, jotka myös elinkaari-inventaarion laskurissa joudutaan arvioimaan. Epävarmuudet voivat johtua teollisen prosessin hienosäädöistä ja uusien asiakkaiden erilaisista vaatimuksista. Resterin tapauksessa kangas-

ajojen erilaisuus asettaa hieman erilaiset säädöt; joissain kuiduissa prosessin syötön on oltava hitaampaa jotta saadaan haluttua laatua (linjan tehokkuus laskee, mikä saattaa nostaa tai alentaa sähkökustannuksia), vettä on käytettävä enemmän palonestoon tai tehtaalle tuleva poistotekstiili vaatii enemmän rejektin poistattamista. Koneiden tehojen pienet prosentuaaliset vaihtelut eivät vaikuta päästölaskentaan niin paljoa, että niistä kannattaisi ottaa herkkyysanalyysiin esimerkit, mutta käytetyt päästökertoimet saattavat olla suurempi kysymys.

Paimion tehtaalla käytetty sähkö on Lumme Energian Puhdas Takuu Sähköä, jota käytetään tehtaassa lämmitykseen, valaistukseen ja koneiden pyörittämiseen. Puhdas Takuu Sähkö on suomalaisen hiilisertifikaatin omaavaa uusiutuvaa sähköä, jonka päästökertoimena käytetään sen uusiutuvuuden takia nollaa (Lumme Energia 2019). Tämä mitätöisi kaiken Paimion tehtaalla käytetyn sähköön hiilipäästöt. Lumme Energia listaa nettisivuillaan suurimman osan sähköstä tuotettavan ydinvoimalla ja fossiilisilla (ydinvoima 41%, fossiiliset ja turve 32%, ja uusiutuvat yhteensä 27%), ja heidän yleinen päästökertoimensa sähkölle on 0,184 kg/kWh (Lumme Energia 2020), joka on Suomen sähköntuotannon keskimääräistä päästökerrointa, 0,091 kg/kWh, korkeampi (Fingrid 2021). Koska Lumme Energia hiilisertifikoit päästönsä, on olennaista katsoa päästöjä myös ilman sertifikaatteja suhteutettuna pesun ja tehtaassa prosessin kokonaispäästöihin. Päästökertoimien vaikutus Paimion tehtaassa prosessiin lasketaan eri skenaarioihin (skenaariot 1-3) ja kootaan Tulosten tulkinnan alle lukuun 5.1. Herkkyysanalyysi.

4.2 LCI – Elinkaaren inventaario

Laskurissa primääridata on mm. energian ja veden kulutus, rejektien polttoon menevä määrä ja mahdolliset kemikaalit, jotka ovat Rester Oy:ltä saatuja tietoja. Osa tiedoista on suoraan Knuutilaa haastatteleamalla hankittu, tai hänen kauttaan. Sekundaaridata sisältää kuljetukset pesulan, varaston ja tehtaassa väliltä sekä pesulan veden, sähköön ja kemikaalien kulutuksen. Jotta laskuri olisi mahdollisimman yksinkertainen, sekä sekundaari että primääridata on laskuriin

listattu samalle välilehdelle. Taulukosta 2. näkee tiedot listattuina ja määrällisesti.

Veden kulutuksessa on huomioitu jätevesi vain pesulan vedessä, sillä Paimion tehtaalla kuituun lisätty vesi ei mene viemäriin, vaan haihtuu kokonaisuudessaan joko prosessin aikana tai varastossa. Pesulassa käytetty vesi on huomioitu vesihuollon ja jäteveden kannalta, ja se sisältyy esimerkkinä käytetyn pesulan päästökertoimeen.

Taulukko 2. Laskurissa käytetyt tiedot, joihin lisätään päästökertoimet, per tonni tuotettua PES kuitua.

Primääridata

<i>Mitä?</i>	<i>Missä?</i>	<i>Määrä</i>	<i>Yksikkö</i>	<i>Lähde</i>
<i>Energia</i>	Kokonaistuotanto, koneet	245	kWh	Knuutila 2022
<i>Sähkö</i>	Tilojen lämmitykseen käytetty sähkö	80	kWh	Knuutila 2022
<i>Veden kulutus</i>	Paimion tehdas, palon ja pölyn esto	42,8	l	Knuutila 2022
<i>Kemikaalit</i>	Kokonaistuotanto, kyseessä PES/PESCO	0	l	Knuutila 2022
<i>Rejektit</i>	Kokokaistuotanto	100	kg	Knuutila 2022
<i>Kuljetus 1</i>	Pesulasta Turun varastolle	350	km	Knuutila 2022
<i>Kuljetus 2</i>	Turun varastolta Paimion tehtaalle	30	km	Knuutila 2022
<i>Pesula (esimerkki)</i>	Pesulassa tapahtuva	0,388803	suora päästökerroin,	Esimerkiksi otetun

poistotekstiilin pesu ja kuivaus		t CO ₂ ekv/tonni pyykkiä	yrityksen vastuullisuus raportista, 2021.
-------------------------------------	--	---	--

Olennaisia tässä työssä ovat myös kootut päästökertoimet ja niiden puolueeton arviointi. Päästökertoimina on käytetty avoimen datan valintoja, jotka on helposti todennettavissa ja löydettävissä Excelin laskuriin kootusta lähdeluettelosta, tai Taulukosta 3. Päästökertoimet eivät kaikilta osin kuvaa juuri Resterin systeemiä, vaan ovat keskimääräisissä oletuksia. Etenkin esimerkkipesulan päästöt ovat suhteellisen isot, vaikka todellisuudessa Resterille tulevalle poistotekstiilille riittää kevyempi pesu.

Taulukko 3. Laskurissa käytetyt päästökertoimet.

Mistä?	Mikä?	määrä	yksikkö	Lähde
Vesi	Tehtaalla	0,009	kg/m ³	HSY avoin data
Kuljetukset	Diesel- tuotanto	0,55	kg CO ₂ /l	JCR 2014
	Diesel- poltto	2,34	kg CO ₂ /l	VTT Lipasto
Täysperävaunu 60t / 70% maantie	dieselin kulutus	0,016	l/tkm	VTT Lipasto
Pesula	Vesi, kemikaalit & kuivaus	0,327	t CO ₂ ekv/tonni pyykkiä	Esimerkkinä käytetty pesula, 2021
Yleissähkö		0,091	kg CO ₂ /kWh	Fingrid
	Puhdas Takuu sähkö	0	kg CO ₂ /kWh	Lumme
	Sähkö, Lumme	0,184	kg CO ₂ /kWh	Lumme
Yhdyskuntajäte, seka	Polton CO ₂	0,4	kg CO ₂ /kg	SYKE

4.2.1 LCA-laskurin rakentaminen

Tiedot kerätään aikaisemmista tietolähteistä, sekä haastatteleamalla Henna Knuutilaa, Rester Oy:n toimeksiantajaa. Tiedot pesusta ja ensimmäisen vaiheen kuljetuksista on hankittu Knuutilan kautta eräästä yrityksestä, jota tässä opinnäytetyössä käytetään esimerkkinä pesun ja kuljetuksen ensimmäisen vaiheen vaikutuksista tuloksiin. Kuidun ajon tiedot energialle on otettu Paimion tehtaan prosessiajosta PESCO-kuidusta, ja rejektien ja veden kulutuksen määrät otettu PES-kuidun mukaan. (Knuutila suul. tiedonanto 28.4.2022).

Koska laskurin täytyy olla joustava tulevia primääri ja sekundaaridatan muutoksia varten, laskurin tiedot kootaan eri välilehdille Exceliin. Muun muassa primääridata, globaalit parametrit (muuttumattomat luvut) ja tulokset saavat kaikki omat välilehtensä, jotta muuttuvia tietoja on helppo säätää ja globaalit parametrit pysyvät samana.

Kun kaikki tarvittavat tiedot ja parametrit on määritetty, lopulliset kehdosta portille -tulokset voidaan laskea omassa välilehdessään. Elinkaari-inventaario tehdään periaatteessa kumulatiivisilla summilla kaikista syöte- ja tuotosvirroista, ja hiilijalanjälki lasketaan sitten yhdistämällä nämä summat niihin liittyvien GWP-arvojen kanssa Tulokset -välilehdellä (Kaava 1.).

$$GWP\ 100\ tulos = \sum [(Määrä \times Päästökerroin) \div 1000]$$

Kaava 1. Laskurissa käytetty kaava.

Valmis mekaanisesti kierrätetty polyesterikuitu (Kuva 9.) paalataan ja varastoidaan ennen sen lähtemistä Resterin tehtaalta. Valmis PES kuitu (Kuva 3.) on kuitukangaslaatua ja sopii esimerkiksi akustiikkalevyjen väliin.



Kuva 9. Valmis PES kuitukangaslaatu paalattuna ja varastoituna.

4.3 LCIA – Elinkaarivaikutusten arviointi

Polyesterikuidun tuotannon ympäristövaikutukset arvioidaan yhdistämällä tulo- ja lähtötiedot niiden päästökertoimiin. Tässä opinnäytetyössä valittu vaikutuskategoria on hiilijalanjälki (GWP 100). Sitä ei ole erotettu suoriin ja epäsuoriin päästöihin, mutta suurimmat kasvihuonekaasupäästöjen lähteet voidaan tunnistaa osaprosessien avulla. Lisäksi arvioidaan herkkyyshanalyysin kautta laskurin koontivaiheessa esille nousseet epävarmuudet.

4.3.1 Hiilijalanjälki

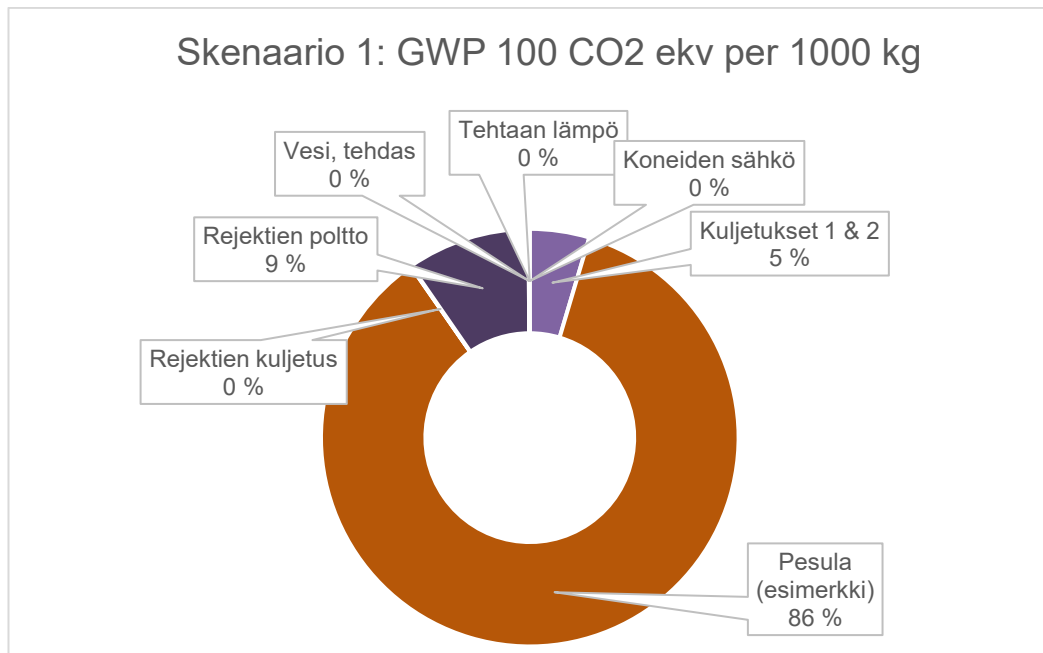
Jotta voidaan tarkastella kierrätetyn polyesterin hiilijalanjälkeä, on yksinkertaisesti kerrottava kootut tiedot niiden vastaavilla päästökertoimilla ja muutettava tuotannollista yksikköä vastaavaan muotoon (Kaava 1.). Useissa LCA-laskureissa näkyy vältettyjä hiilidioksidipäästöjä, jotka siis näkyisivät negativisena, mutta tässä prosessissa ne on jätetty huomiotta. Teoriassa myös

jätteen poltosta saatu energia voitaisiin ottaa talteen ja vähentää vältetyistä päästöistä, mutta tässä työssä ei ole arvioitu jätteenpoltin energiahyötyjä.

Taulukko 4. Kasvihuonekaasupäästöt Paimion kierrätys prosessissa, skenaariossa 1, per tonni lopputuotetta.

Poistotekstiilin kierrätys prosessi	Kasvihuonekaasupäästöt [t CO₂ ekv.] Skenaario 1, Puhdas Takuu Sähkö.	Kuinka monta % osuus on kokonaispäästöistä
<i>Kuljetukset 1 & 2</i>	0,01932	4,61%
<i>Energia, tehdas</i>	0	0%
<i>Pesula (esimerkki)</i>	0,35797	85,73%
<i>Tilojen lämmitys</i>	0	0%
<i>Rejektien kuljetus</i>	0,00016	0,04%
<i>Rejektien poltto</i>	0,04	9,53%
<i>Vesi, tehdas</i>	0,00039	0,09%
<i>yhteensä</i>	0,41957	100%

Taulukkoon 4. lasketut GWP-tulokset kertovat mistä lopullinen GWP 100 luku muodostuu, ja mistä on hyvä lähteä parantamaan. Selkeästi suurin päästö, 86% koko systeemin päästöistä tulee pesulassa tapahtuvasta sähkön, kemikaalien ja veden kulutuksesta. Tässä kohtaa ei tarkastella pesulan päästöjä tarkemmin, vaan luotetaan esimerkkipesulan vuoden 2021 vastuullisuusraportin jakamaan tietoon. Tämä tieto on linjassa yleisen ETSA:n (European Textile Services Association 2015) päästökertoimien kanssa. Kuvassa 10. näkyy kokonaispäästöjen jakautuvuus, kun oletetaan koneiden ja tehtaan käyttämän sähkön olevan päästökertoimeltaan nolla (Lumme Energian Puhdas Takuu Sähkö).



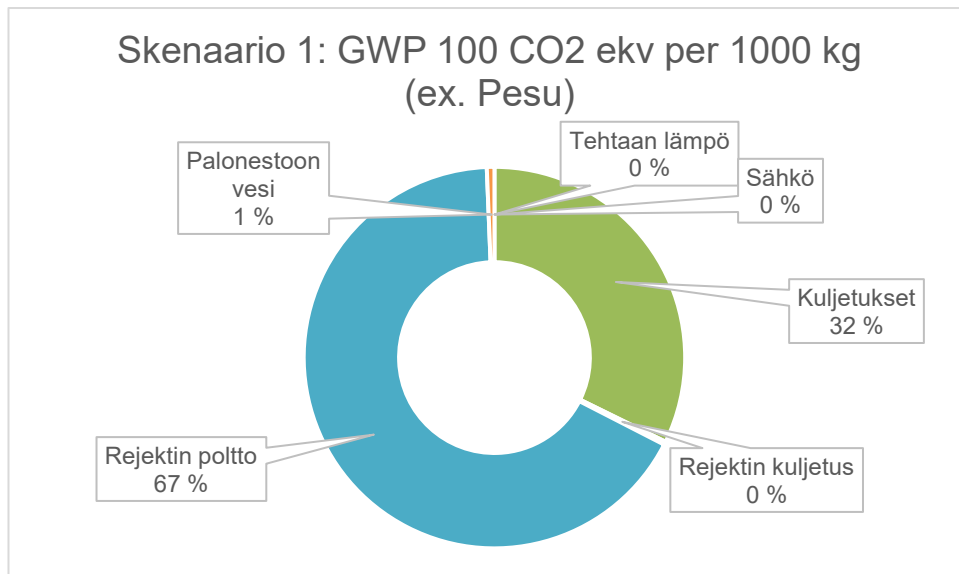
Kuva 10. GWP 100, t CO₂ ekv. Rester Oy:n Paimion tehdas ja esimerkkinä käytetty pesula.

Taulukko 5. Hiilijalanjälki ilman pesulan osuutta.

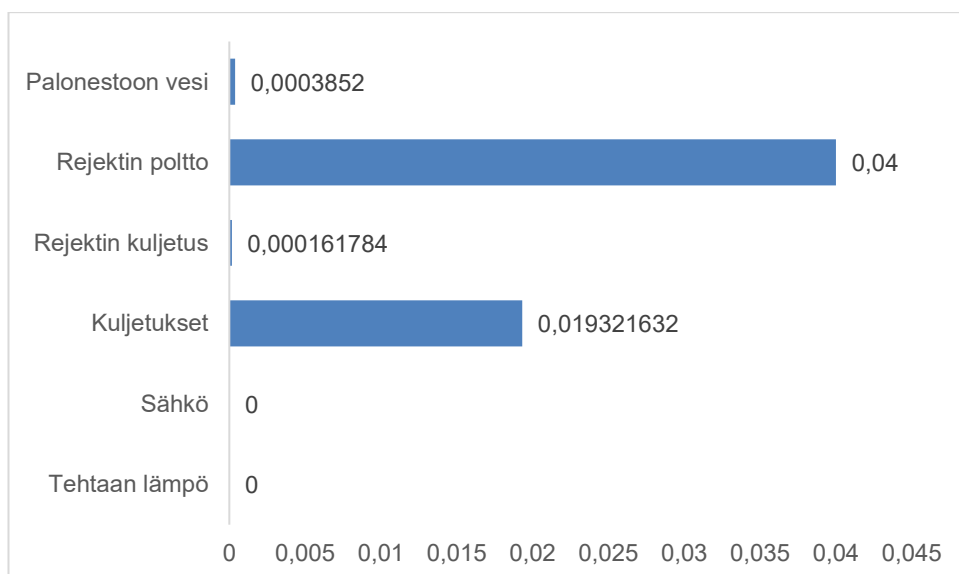
	Tulos ilman Pesulaa:		%
Tehtaan lämpö	0	t CO ₂ ekv	0,00 %
Sähkö	0	t CO ₂ ekv	0,00 %
Kuljetukset	0,019321632	t CO ₂ ekv	22,27 %
Rejektin kuljetus	0,000161784	t CO ₂ ekv	0,27 %
Rejektin poltto	0,04	t CO ₂ ekv	66,81 %
Palonestoon vesi	0,0003852	t CO ₂ ekv	0,64 %
	0,059868616	t CO ₂ ekv	100%

Jotta voidaan tarkastella pelkästään Rester Oy:n Paimiolla sijaitsevan tehtaan prosessin hiilijalanjälkeä, on listattu päästökohteet ilman pesulan aiheuttamaa suurinta päästöä. Tässä (Taulukko 5.) suurin CO₂ päästö muodostuu polttoon menevistä rejekteistä, josta 77,49% päästöistä muodostuu. Rejektin käsittelyyn on käytetty yleistä polttokelpoisen jätteen päästökerrointa, koska rejektin koostumus ei ole tarkemmin tiedossa. Tätä on koitettu mallintaa herkkyyksianalyysissä, joka löytyy Tulosten tulkinta luvusta arvioimalla rejektin

metallien osuutta. Kuvissa 11. & 12. havainnollistetaan rejektin suurta osuutta päästöistä.



Kuva 11. Kierrätetyn polyesterikuidun GWP 100 Paimion tehtaalla, ex. Pesula.



Kuva 12. Ilman pesulan suurta päästöä suurin on rejektien poltto (tonnia CO₂-ekv).

Pesulan jälkeen prosessin kriittisin osa on rejektien polttaminen ilman allokointia laskurissa. Toiseksi nousee kuljetusten osuus, olettaen kuljetusten olevan ajettu dieselkäyttöisillä ajoneuvoilla. Muutokset näihin tuloksiin ovat mahdollisia:

yrittäjän olisi määriteltävä rejektin hiilipitoisuus ja polton lämpöarvo, sekä mahdollisuuksien mukaan vaihdettava kuljetusten polttoaine biopohjaisemmaksi tai jopa täysin uusiutuvaksi. Näin saataisiin luotettavampi laskentatuloks ja pienempi tuotteen hiilijalanjälki.

4.3.2 Vedenkulutus

Taulukosta 6. näkyy miten koko systeemin vedenkulutus jakautuu. Kokonaisuudessaan vettä kului tehtaalla 42,8 litraa per toiminnallinen yksikkö, jotka kulutettiin Paimion tehtaalla palonestoon. Loput, noin 8,6 litraa per toiminnallinen yksikkö, kului esimerkkinä käytetyssä pesulassa ennen kuljetuksia. Laskurissa käytettiin HSY:n avoimen datan 9 g CO₂ ekvivalenttia per m³ vettä päästökertoimena, kun Paimion tehtaan veden kulutuksen ilmastovaikutuksia laskettiin. Esimerkkinä käytetyn pesulan veden kulutus sisältyi jo vastuullisuusraportista saatuun päästökertoimeen.

Taulukko 6. Veden kulutuksen jakautuminen systeemissä.

Vesi	Määrä	Yksikkö
Pesula	8,5608	litraa/t
Tehdas	42,8	litraa/t
Yhteensä:	51,3608	litraa/t

5 LCA-tulosten tulkinta

Tulosten analyysi sisältää tiettyjen herkkyysien arvioinnin ja miten mahdolliset muutokset systeemiin vaikuttavat hiilijalanjälkeen, sekä vertailun vastaavanlaisten LCA-laskentojen kanssa. Herkkyydet on helppoiten tunnistettavissa systeemissä käytetyissä oletuksissa, kuten nollapäästöisyyden arvioinnissa.

5.1 Herkkyysanalyysi

Laskurissa esiintyy useita epävarmuustekijöitä, kuten sähkön päästökerroin sekä rejektin poltossa vapautuvan hiilen määrä. Suoritamme niille herkkyysanalyysit, jotka kertovat kuinka paljon oletusten muuttaminen vaikuttaa lopputulokseen. Mitä tapahtuisi luvuille, jos poltettavan rejektin todellinen koostumus olisi tiedossa tai jos sähkön laskemisessa ei käytettäisi hiilisertifikaatteja?

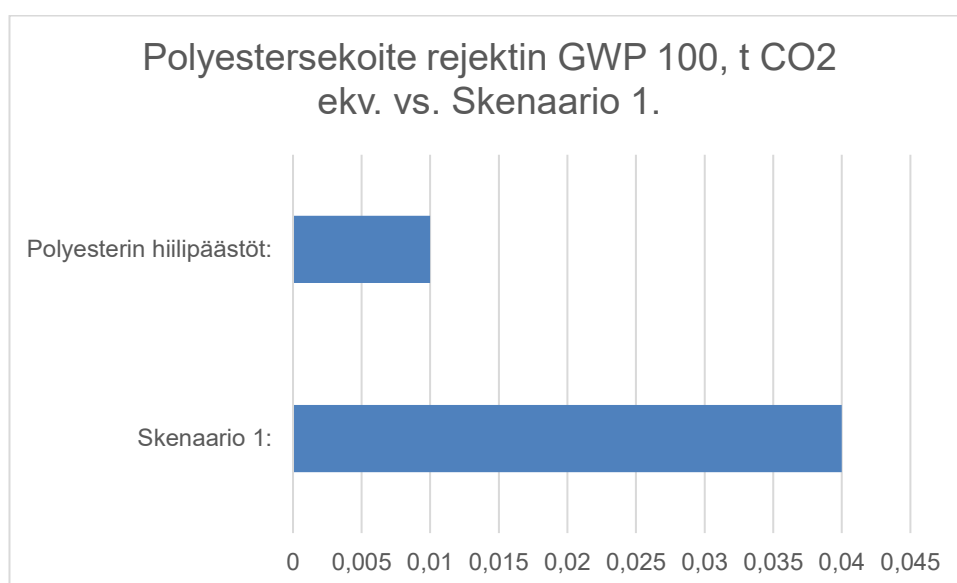
5.1.1 Rejektin koostumus

Rejektin määrästä (100 kg) suurin osa on raskaimpia metalliosia, joiden hiiliarvo polttaessa on nolla. Koska polyesterirejekti ja tehtaalla syntyvä pöly on huomattavasti kevyempää kuin metalliset (ja mahdollisesti muoviset osat) arvioidaan rejektin olevan painoltaan 25% polyesteriä ja metallia loput.

Taulukko 7. Rejektin koostumus.

Polttoon menevä rejekti (arvio)			
75% metallia	75	kg	Poltossa arvoltaan 0.
25% polyesteriä	25	kg	Yhdyskuntajätteen poltto 0,4 kg CO ₂ ekv per kg jätettä
Poltossa syntyvän hiilen määrä:	0,4 x 25% polyesteriä	kg CO ₂ ekv	10 kg CO ₂ ekv tai 0,01 t CO ₂ ekv

Taulukkoon 7. on koottu rejektin polton herkkyyssanalyysin osat ja Kuva 13. havainnollistaa päästön vähentymän mahdollisuutta, jos rejektistä pystyttäisi erottelamaan koostumus, olettaen rejektistä 25% olevan hiilipitoista polyesterisekoitetta. Tässä on käytetty yhdyskuntajätteen yleistä päästökerrointa (0,4 kg CO₂ ekv per kg jätettä). Polyesterin poltolle löydettiin myös korkeampi päästökerroin (noin 1,8 kg CO₂-ekv. / kg), jonka hyödyntäminen saattaisi olla oleellisempaa. Vertailun onnistuminen kuitenkin edellyttää skenaariossa 1. käytetyn yleisen yhdyskuntajätteen polttokertoimen käyttämissä tässäkin.



Kuva 13. Rejektin laskennallinen hyöty verrattuna Skenaarioon 1.

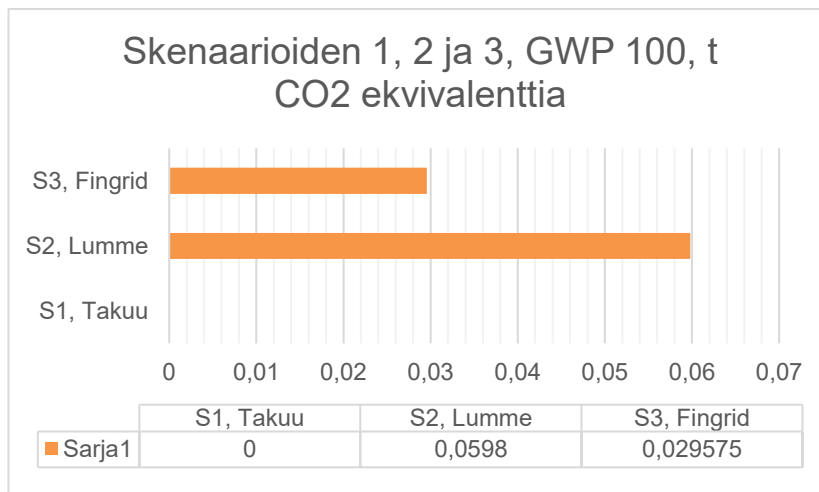
5.1.2 Sähkön päästökertoimien muutokset

Luvussa Rajaukset, Oletukset & Epävarmuustekijät avattiin syitä sähkön päästökertoimien muutoksille ja niiden pohjalta tehtyihin skenaarioihin. Taulukossa 8. on skenaarioihin käytetyt päästökertoimet ja Kuvassa 14. niiden tulokset. Vertailuna hiilisertifioitu sähkö on tietenkin päästöiltään nolla ja siksi yrityksen näkökulmasta paras vaihtoehto. Mielenkiintoista on, että Lumme Energian yleinen sähkön päästökerroin on Suomen sähköverkon keskimääräistä päästökerrointa korkeampi, joten myös sertifikoimaton sähkö on

korkeampipäästöistä. Fingridin kertoimella takuudeton sähkö olisi siis hiilipäästöiltään parempi vaihtoehto kuin Lummen takuudeton.

Taulukko 8. Sähkön päästökertoimien skenaariot (1-3).

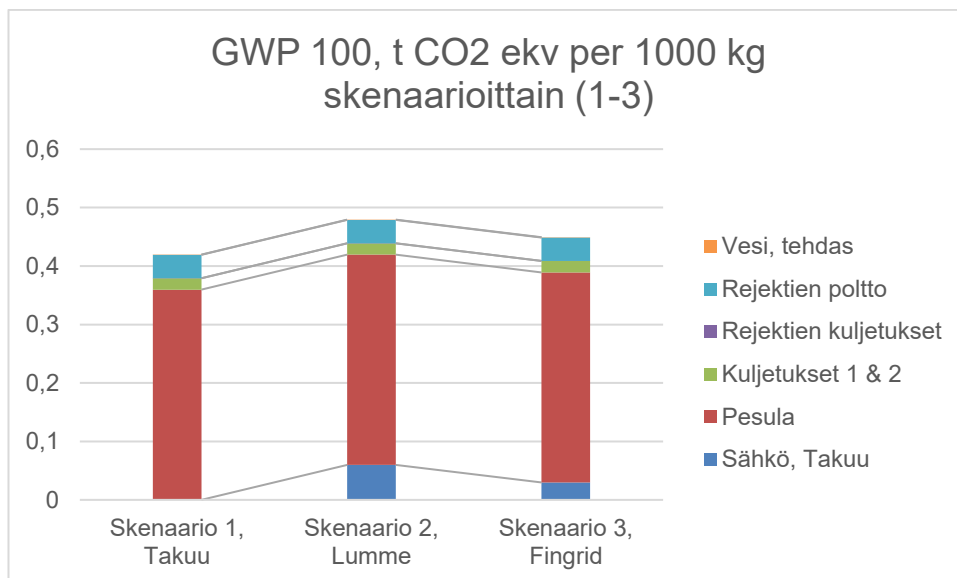
	Päästökerroin	Yksikkö	Sähkö tehtaalla (kWh)	Tulos (kg CO ₂ e)	per tonni (t CO ₂ e)
S1, Takuu	0	kg CO ₂ e/ kWh	325	0	0
S2, Lumme	0,184	kg CO ₂ e / kWh	325	59,8	0,0598
S3, Fingrid	0,091	kg CO ₂ e / kWh	325	29,575	0,029575



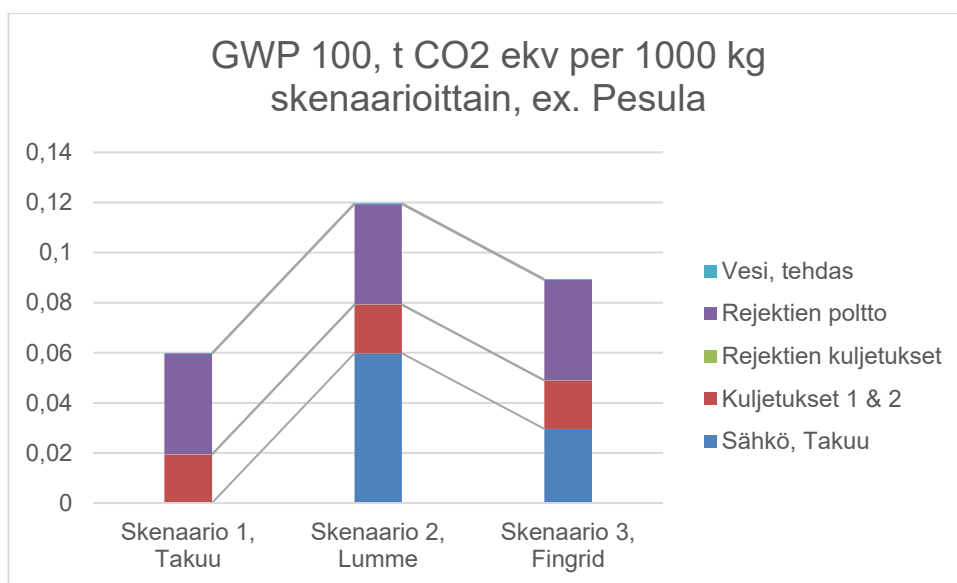
Kuva 14. Skenaarioiden 1, 2 ja 3 sähkönkulutuksen päästöjen vertailu keskenään.

Kuvassa 15. näkyy sähkön skenaariot suhteutettuna kokonaispäästöihin.

Kyseinen kuva havainnollistaa sähkön kokonaisosuutta päästöistä. Kuvassa 16. on havainnollistettu samaa kuin edellä, mutta pesulan päästöt on tässä jätetty huomiotta, jolloin sähkön osuus tulee paremmin esille.



Kuva 15. Sähkön skenaarioiden osuus kokonaispäästöistä.



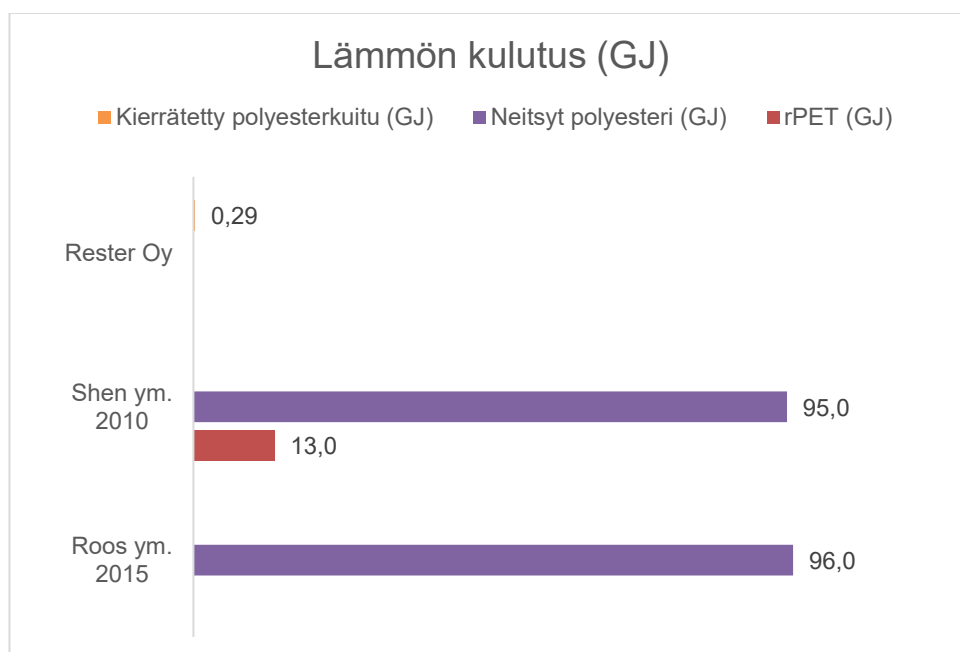
Kuva 16. Sähkön skenaarioiden osuus päästöistä, joihin ei ole laskettu pesulan päästöjä mukaan.

5.2 Vertailu rPET & neitseellinen PES

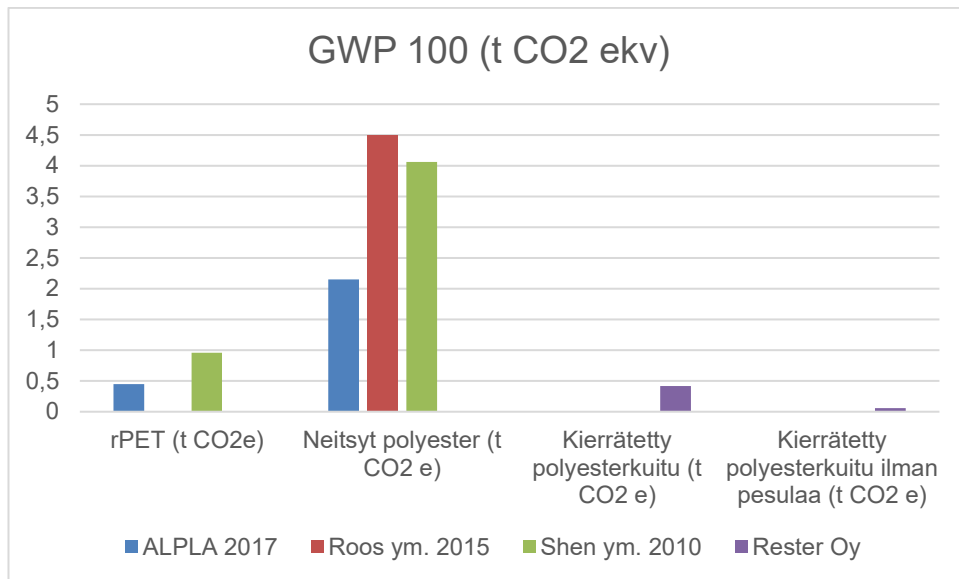
Koska rPET:in ja neitseellisen polyesterin tuotannot eroavat Rester Oy:n kierrätetyn polyesterin tuotannosta monella tavalla, tähän vertailuun on pyritty valitsemaan samoilla oletuksilla lasketut elinkaariarviot. Shen ym. (2010) sekä

Roos ym. (2015) käyttävät ”cut-off” metodia rPET:in laskemiseen, eli tekstiilijäte tulee tutkittuun systeemiin nollapäästöisenä. Samaa metodia on käytetty tässä opinnäytetyössä. ALPLA:n metodeista ei ole tietoa, mutta luku näyttää siltä, että siinäkin on käytetty samaa tyyliä laskea hiilijalanjälki. ”Cut-off”-metodi on yleinen tapa jättemateriaalien LCA-laskureissa ja siksi voidaan olettaa sitä olevan käytetty.

Vaikka prosessit ovat keskenään erilaisia, suurin eroavaisuus on kierrätyksen tekniikassa. Pullopolyesteriä ei voi olla sulattamatta jos siitä halutaan tehdä säikeitä, ja poistotekstiilejä ei tarvitse sulattaa laisinkaan. Tämä lämpömäärän suuri ero saattaa olla syy Resteri Oy:n kierrätetyn polyesterikuidun, ALPLA:n ja Shen ym. 2010 saatujen lukujen eroihin. Kuvassa 17. huomataan mekaanisesti kierrättämisen hyödyt: toiminnallista yksikköä kohden vaadittu lämpömäärä on huomattavan pieni mekaanisessa kierrätyksessä verrattuna termiseen kierrättämiseen.



Kuva 17. Lämmön kulutuksen vertailu Rester:in kierrätetyn polyesterin, neitsyt polyesterin ja rPET:in kesken (per tonni kuitua).



Kuva 18. Kierrätetyn polyesterikuidun GWP 100 vertailu (per tonni kuitua).

Kuvassa 18. näkyvä Rester Oy:n Paimion kierrätetyn polyesterin hiilijalanjälki on vain hieman ALPLA:n lukua pienempi, jonka voi olettaa johtuvan pesulan verrattain suurista päästöistä. Samassa kuvassa on havainnollistettu vertailua ilman pesulan suurta päästöä, jolloin Paimion tehtaan prosessi, joka sisältää kuljetukset pesulasta varastolle ja tehtaalle, on selkeästi hiilipäästöiltään pienin. Veden eikä energiamäärän kulutuksesta ei ole ALPLA:n kautta tietoja, joten vertailu rajautuu vain hiilijalanjälkeen.

5.3 Suositukset

Seuraavia suosituksia voi antaa kyseisen elinkaariarvioinnin parantamiseksi Paimion tehtaalla. Koska työ on ympäristön kannalta tehty, se ei ota kantaa yrityksen ekonomisiin vaihtoehtoihin ratkaisujen tekemisessä. Tämän opinnäytetyön laskemassa kuitukangaslaadun kierrätysprosessissa suurimmat päästölähteet ilmenivät pesulassa kankaita pestessä, rejektin polttamisessa sekä hiilisertifioimattoman sähkön käytössä. Poistotekstiilin pesu on kriittinen osa prosessia ja käytetyn pesulan hiilijalanjäljen selvittäminen ja siihen vaikuttaminen olisi suotavaa.

Muut suositukset tämän työn pohjalta liittyvät mm. rejektien hyödyntämiseen päästövähennyksissä. Rester Oy:n Paimiossa sijaitsevalle tehtaalle voisi työn perusteella suositella jätteen polttoon menevän rejektin koostumustutkimusta ja kierrätysmahdollisuuksien etsimistä, jotta saataisiin tietoon paljonko rejektistä on hiiliarvoltaan nolla ja kuinka paljon lämpöä ja kierrätyskelpoista materiaalia rejektistä syntyy. Työssä laskettiin hiilisertifioidun sähköön käyttöä, jonka päästökerroin on ollut nolla. Sähkölle suoritettu herkkyysanalyysi kertoo sähköön päästökertoimien vaikuttavan lopputulokseen jonkin verran, ja hiilisertifioidun sähköön olevan tässä hyvä vaihtoehto.

Myös kuljetusten vähäpäästöistämisen mahdollisuuksia tulisi tutkia, esimerkiksi kaluston retrofittauksen tutkimisella tai biopohjaisiin polttoaineisiin siirtymisellä. Jos kalusto on ulkopuoliselta urakoitsijalta vuokrattua, sen kilpailuttaminen vähäpäästöisempiin vaihtoehtoihin on myös keino vähentää lopputuotteen hiilijalanjälkeä. Nykyiset oletukset on tehty siltä pohjalta, ettei polttoon meneviä rejektejä (metallisia osia, pölyä jne) erotella eikä hyödynnetä muuten prosessissa, eivätkä kuljetukset ole hiilivapaita. Jotta laskemista saataisiin tarkennettua, tietoihin tulisi lisätä tiedot varastointiajoista ja rejektin tarkempi määrittely.

6 Johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli arvioida Rester Oy:n Paimion tehtaalla tapahtuvan kierrätetyn polyesterikuidun hiilijalanjälki ja sen tulosten vertaileminen rPET-kuituun ja neitseelliseen polyesterikuituun. Toinen tärkeä tavoite oli löytää systeemin prosesseista paranneltavaa ja esittää ehdotukset tässä opinnäytetyössä. Nämä tavoitteet saavutettiin rakentamalla muokattava laskuri, jonka tulokset löytyvät luvusta 4. ja tulosten tulkinnat luvusta 5.

Vuoden 2019 materiaalivirtaselvityksen mukaisen yrityksiltä erilliskerätyn poistotekstiilin määrä (noin 17 000 tonnia) tulee eittämättä kasvamaan tulevan lainsäädännön muutoksen myötä. Kun materiaalivirrat löytävät paikkansa ja ottajansa, ja teknologia vaatteiden tunnistamiseen, lajitteluun ja keräykseen edistyy, voidaan alkaa miettimään myös kuluttajatekstiilien kaupallista kierrättämistä uusiksi materiaaleiksi. Markkinoilla usein vertaillaan tuotteita päästöjen perusteella, joten todistetusti vähäpäästöinen kierrätysmetodi on yritykselle myyntivaltti.

Kuten polyesterin kierrätystekniikoita tarkastellessa jo todettiin, Paimion tehtaalla tapahtuva mekaaninen kierrätys eroaa termisestä ja kemiallisesta kierrätyksestä siten, ettei siinä käytetä kemikaaleja eikä lämpösulattamista, toisin kuin pulloPET:in kierrättämisessä tai neitseellisen polyesterin valmistuksessa. Tämän takia oletus on, että ainakin energiaa kuluu Paimiossa vähemmän, minkä tämä opinnäytetyö todisti. Usein LCA-laskelmissa pyritään tutkimaan muitakin ympäristövaikutuksia kuin ilmaston lämpenemispotentiaalia (esim. maankäyttö ja rehevöityminen) mutta tämän työn rajauksissa se ei ollut mahdollista. Tässä kierrätetyn polyesterin prosessissa maata käytetään pesulan ja tehtaan pinta-alan sekä varastoinnin verran.

Vaikka Paimion tehtaalla on tarkentamisen varaa tietyissä prosessin luvuissa ja sähkön valinnoissa, tehtaan prosessit ovat ilmaston kannalta hyvällä mallilla. Vertailukohteina käytetyt rPET ja neitseellinen PES vaativat molemmat avoimempia ja uudempia päästölaskentoja, sillä niihin molempiin on olemassa keinot vähentää saatuja kasvihuonekaasupäästöjä. Varsinkin rPET:in laskentaa

oli vaikea löytää, ja ne jotka väittävät olevan nollapäästöisiä eivät avaa metodejaan standardeja pidemmälle. Ja standardit jättävät paljon tulkinnanvaranaiseksi.

Vaikka poistotekstiili on raaka-aineena oletettu nollapäästöiseksi, sen poistuessa omasta kierrostaan syntyy vähentymä alkuperäiseen materiaalikiertoon, joka on luonnollisesti korvattava jollain. On jo todettu, että neitseellisen polyesterin tuotanto on korkeapäästöistä verrattuna sen kierrätettyihin vertailukohtiin, joten materiaalien korvaaminen jollain muulla tavalla olisi suotava. Tässä kohtaa Resterin pyrkimykset suljetun kierron kierrätykseen olisivat seuraava luonnollinen askel kohti poistotekstiilien kierrätyksen kaupallistamista.

Lähteet

ALPLA 2017. STUDY CONFIRMS THE EXCELLENT CARBON FOOTPRINT OF RECYCLED PET. Viitattu 29.4.2022. <https://blog.alpla.com/en/press-release/newsroom/study-confirms-excellent-carbon-footprint-recycled-pet/08-17>

Auranen, A. 2018. Tekstiilijätteestä mekaanisesti kierrätetty kuitu ja sen soveltuvuus eri prosesseihin. Opinnäytetyö. Vestonomi. Metropolia ammatikorkeakoulu. Viitattu 27.4.2022.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/153658/Auranen_Anneli.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Dahlbo, H.; Rautiainen, A.; Savolainen, H.; Oksanen, P.; Nurmi, P.; Virta, M. & Pokela, O. Tekstiilivirrat Suomessa 2021. Viitattu 2.5.2022. Saatavilla sähköisesti osoitteesta <https://www.turkuamk.fi/fi/tutkimus-kehitys-ja-innovaatiot/hae-projekteja/tekstiilivirrat-suomessa/>

Euroopan komissio. 2022. Annettu 30.3.2022. Kestäviä ja kiertotalouteen perustuvia tekstiilejä koskeva EU:n strategia. Saatavilla osoitteesta https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12822-EUn-strategia-kestavia-tekstiileja-varten_fi

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2018/851. Annettu 30.5.2018. Saatavilla sähköisesti osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>

Euroopan parlamentti. 2020. Tekstiilituotannon ja -jätteen vaikutus ympäristöön (infografiikka). Viitattu 27.4.2022.
<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20201208STO93327/tekstiilituotannon-ja-jatteen-vaikutus-ymparistoon-infografiikka>

European Textile Services Association 2015. Assessment of global warming potential of two textile services Viitattu 19.5.2022. Saatavilla osoitteesta https://www.textile-services.eu/be_aware_of_your_footprint/index.cfm

Gould, H. 2018. Waste is so last season: recycling clothes in the fashion industry. The Guardian 2015. Viitattu 28.4.2022.
<https://www.theguardian.com/sustainable-business/sustainable-fashion-blog/2015/feb/26/waste-recycling-textiles-fashion-industry>

Higgs, R. 2018. ALPLA recyclers report improved rPET global footprint using renewable energy. Viitattu 15.5.2022.

<https://www.sustainableplastics.com/article/20180405/PNE/180409955/alpla-recyclers-report-improved-rpet-global-footprint-using-renewable-energy>

HSY 2022. Avoin data. Viitattu 20.5.2022. Saatavilla osoitteesta

<https://www.openco2.net/fi/paastokertoimet/tuote/veden-tuotanto/1722>

Jätelaki 2011. Annettu 17.6.2011. Saatavilla sähköisesti osoitteesta

<https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646>

JCR 2014. Joint research centre (JRC) / European union. 2014. WELL-TO-TANK Report version 4.a: JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSI

Knuutila, H. 2022. Haastattelu Rester Oy:n tehtaalla 28.4.2022. Haastattelijana Ona Vassallo.

Lumme Energia 2019. Mikä on aluperätaakua? Viitattu 20.5.2022.

https://www.lumme-energia.fi/blogi/mika-on-alkuperataakua?hs_amp=true

Lumme Energia 2020. Mistä sähkömme tulee? Lumme Energian tuoteseloste 2020. Viitattu 20.5.2022. Saatavilla osoitteesta [https://www.lumme-energia.fi/sahkon-](https://www.lumme-energia.fi/sahkon-alkupera?utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_campaign=%5BS%5D+-+Br%C3%A4ndi&utm_term=lumme%20energia&hsa_src=g&hsa_grp=132340618733&hsa_tgt=kwd-403339863967&hsa_kw=lumme%20energia&hsa_net=adwords&hsa_mt=b&hsa_cam=953145586&hsa_ad=576876099353&hsa_ver=3&hsa_acc=5390301503&gclid=Cj0KCQjw1ZeUBhDyARIsAOzAqQIMGuN_fwzktNUxgglpf9fRdWTTi76pWANPVAcS_a7xS4OOGCVHfWsaAuDVEALw_wcB)

[alkupera?utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_campaign=%5BS%5D+-](https://www.lumme-energia.fi/sahkon-alkupera?utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_campaign=%5BS%5D+-+Br%C3%A4ndi&utm_term=lumme%20energia&hsa_src=g&hsa_grp=132340618733&hsa_tgt=kwd-403339863967&hsa_kw=lumme%20energia&hsa_net=adwords&hsa_mt=b&hsa_cam=953145586&hsa_ad=576876099353&hsa_ver=3&hsa_acc=5390301503&gclid=Cj0KCQjw1ZeUBhDyARIsAOzAqQIMGuN_fwzktNUxgglpf9fRdWTTi76pWANPVAcS_a7xS4OOGCVHfWsaAuDVEALw_wcB)

[+Br%C3%A4ndi&utm_term=lumme%20energia&hsa_src=g&hsa_grp=132340618733&hsa_tgt=kwd-](https://www.lumme-energia.fi/sahkon-alkupera?utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_campaign=%5BS%5D+-+Br%C3%A4ndi&utm_term=lumme%20energia&hsa_src=g&hsa_grp=132340618733&hsa_tgt=kwd-403339863967&hsa_kw=lumme%20energia&hsa_net=adwords&hsa_mt=b&hsa_cam=953145586&hsa_ad=576876099353&hsa_ver=3&hsa_acc=5390301503&gclid=Cj0KCQjw1ZeUBhDyARIsAOzAqQIMGuN_fwzktNUxgglpf9fRdWTTi76pWANPVAcS_a7xS4OOGCVHfWsaAuDVEALw_wcB)

[403339863967&hsa_kw=lumme%20energia&hsa_net=adwords&hsa_mt=b&hsa_cam=953145586&hsa_ad=576876099353&hsa_ver=3&hsa_acc=5390301503&gclid=Cj0KCQjw1ZeUBhDyARIsAOzAqQIMGuN_fwzktNUxgglpf9fRdWTTi76pWANPVAcS_a7xS4OOGCVHfWsaAuDVEALw_wcB](https://www.lumme-energia.fi/sahkon-alkupera?utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_campaign=%5BS%5D+-+Br%C3%A4ndi&utm_term=lumme%20energia&hsa_src=g&hsa_grp=132340618733&hsa_tgt=kwd-403339863967&hsa_kw=lumme%20energia&hsa_net=adwords&hsa_mt=b&hsa_cam=953145586&hsa_ad=576876099353&hsa_ver=3&hsa_acc=5390301503&gclid=Cj0KCQjw1ZeUBhDyARIsAOzAqQIMGuN_fwzktNUxgglpf9fRdWTTi76pWANPVAcS_a7xS4OOGCVHfWsaAuDVEALw_wcB)

Motiva 2018. Tekstiilit. Viitattu 19.5.2022.

https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/tekstiilit

Packaging Europe 2017. Study Confirms the Excellent Carbon Footprint of Recycled PET. Viitattu 29.4.2022. <https://packagingeurope.com/study-confirms-the-excellent-carbon-footprint-of-recycled-pet/1923.article>

Packaging Europe 2020. ALPLA reveals carbon-neutral rPET. Viitattu 15.5.2022. <https://packagingeurope.com/alpla-reveals-carbon-neutral-rpet/4240.article>

Phelps 2022. Material for Sound Proofing and Sound Dampening. Viitattu 1.5.2022. <https://www.phelpsgaskets.com/blog/material-for-sound-proofing-and-sound-dampening>

Roos S.; Sandin G.; Zamani B. & Peters G. 2015. Environmental assessment of Swedish fashion consumption. Viitattu 27.4.2022. Saatavilla osoitteesta [Environmental-assessment-of-Swedish-fashion-consumption-LCA.pdf](#) (mistrafuturefashion.com)

Salmenperä, H. 2017. Poistotekstiileihin kytkeytyvät juridiset ja hallinnolliset tulkinnat sekä menettelyt. Viitattu 27.4.2022. https://storage.googleapis.com/turku-amk/2018/02/termit-ja-lainsaadanto_syke.hannasalmenpera.2017.pdf

Sandin, G.; Roos, S. & Johansson M. 2019. Environmental impact of textile fibers – what we know and what we don't know. Viitattu 27.4.2022. [Mistra_Env.impact_textileFibers.pdf](#)

SFS-EN ISO 14044, 2006. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.

SFS-EN ISO 14067, 2018. Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification.

Shena, L.; Worrell, E. & Patel, M. 2010. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. Resources, Conservation and Recycling Vol. 55, No 1, November 2010, Pages 34-52.

Suomen hallitus 40/2021. Annettu 2021. Saatavilla sähköisesti osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2021/20210040>

Suomen tekstiili ja muoti 2021. Tekstiilijätteen erilliskeräys alkaa Suomessa 1.1.2023 – velvollisuudet koskevat myös yrityksiä. Suomen tekstiili ja muoti Ry. Viitattu 28.4.2022. <https://www.stjm.fi/uutiset/tekstiilijatteen-erilliskerays-alkaa-suomessa-1-1-2023-velvollisuudet-koskevat-myo-yrityksia/>

Suomen tekstiili ja muoti 2021. Tekstiilikuituopas. Viitattu 28.4.2022. Saatavilla osoitteesta <https://www.stjm.fi/palvelut-ja-tietoa-yrityksille/tekstiilikuituopas/>

SYKE 2021. Suomen tekstiilivirtaselvitys: Tekstiilien kulutus Suomessa tasaista, poistotekstiilien määrät kasvussa. Viitattu 2.5.2022. Saatavilla sähköisesti osoitteesta [https://www.ymparisto.fi/fi-](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Suomen_tekstiilivirtaselvitys_Tekstiilie(60999))

[FI/Kulutus_ja_tuotanto/Suomen_tekstiilivirtaselvitys_Tekstiilie\(60999\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Suomen_tekstiilivirtaselvitys_Tekstiilie(60999))

The Fiber Year 2021. WORLD SURVEY ON TEXTILES & NONWOVENS.

Viitattu 28.4.2022. The Fiber Year Consulting. https://thefiberyear.com/wp-content/uploads/2021/11/TFY2021_TOC.pdf

Tilastokeskus 2020. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. Viitattu 24.5.2022.

Saatavilla osoitteesta https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-12-16_kat_001_fi.html

VTT Lipasto 2019. Viitattu 22.5.2022. Saatavilla osoitteesta <http://lipasto.vtt.fi/>