



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Kierrätettyjen tekstiilikuitujen pituusjakauma ja sen vaikutus prosessoitavuuteen

Roosa Luimula

PROSESSITEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

2022

TIIVISTELMÄ

Kierrätettyjen tekstiilikuitujen pituusjakauma ja sen vaikutus prosessoitavuuteen

Roosa Luimula

Oulun yliopisto, Prosessitekniiikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022

Työn ohjaaja yliopistolla: Elisa Koivuranta

Tässä kandidaatintyössä käsitellään tekstiilien mekaanista kierrätystä. Työn tavoitteena on selvittää, miten tekstiilikuidun ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa mekaanisen avausprosessin aikana. Avatun tekstiilikuidun loppukäyttökohteeksi on valittu langanvalmistus, johon tärkeimpänä kuidun ominaisuutena on pituusjakauma. Pituusjakauman tiedetään lyhenevän mekaanisessa kuidun avauksessa kitkan vaikutuksesta. Työn päätavoitteena on selvittää alan tutkimustulosten avulla, miten tekstiilikuidun pituusjakauma voidaan säilyttää mahdollisimman korkeana.

Työn alussa käydään läpi tekstiilien kiertotalouden nykytilanne ja lainsäädännön muutokset. Kandidaatintyöni on rajattu käsittelemään tekstiilimateriaaleista yleisimpiä puuvillaa ja polyesteriä sekä näiden sekoitteita. Materiaaleja käydään läpi kemiallisen koostumuksen perusteella, jotta ymmärretään niiden käyttäytymistä mekaanisessa rasituksessa.

Merkittävimpiä tuloksia työssäni ovat erilaisilla voitelukemikaaleilla saatavat hyödyt kuidun pituusjakaumaan. Tarkastelemani kemikaalit ovat toimivuutensa lisäksi ympäristöystävällisiä. Tulosten perusteella mekaanisesti avattua tekstiilikuitua voidaan käyttää langanvalmistukseen kehräysmenetelmästä riippuen. Lisäksi kierrätyskuidun pituusjakaumaa voidaan korjata myös sekoittamalla joukkoon ensiökuitua. Tutkimustuloksien luotettavuutta ja yleistettävyyttä olen pyrkinyt edistämään vertailemalla eri lähteissä saatuja tuloksia keskenään. Tieteellisten lähteiden lisäksi olen haastatellut Rester Oy:ltä Henna Knuutilaa Resterin mekaaniseen avausprosessiin liittyen.

ALKUSANAT

Kandidaatintyöni on toteutettu Paimiossa sijaitsevalle Rester Oy:lle, joka on erikoistunut tekstiilikuitujen mekaaniseen kierrätykseen. Mekaaninen kierrätyslaitos käynnistyi syksyllä 2021. Mahdollisuuden toteuttaa kandidaatintyöni Rester Oy:lle sain syyslukukauden alussa, jolloin toiminta Paimiossa oli alkamassa. Olikin etuoikeus päästä tutustumaan kierrätyslaitoksen toimintaan jo loppuvuodesta pian linjaston käyttöönoton jälkeen. Aiheesta Rester Oy:n puolesta vastasi Henna Knuutila. Haluankin osoittaa kiitokseni mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta tehdä kandidaatintyö ajankohtaiseen kiertotaloushankkeeseen liittyen.

Yliopiston puolelta kandidaatintyön ohjaajanani toimi Elisa Koivuranta Kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksiköstä. Haluan kiittää häntä aiheen mahdollistamisesta yliopiston puolelta ja hyödyllisistä neuvoista työhöni liittyen.

Rauma, 17.5.2022

Roosa Luimula
Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	7
2 Tekstiilien kiertotalous.....	8
2.1 Eri tekstiilimateriaalit.....	9
2.2 Tekstiilien keräys	11
2.3 Tekstiilien lajittelu	11
2.4 Tekstiilien mekaaninen kierrätys	12
2.5 Rester Oy:n mekaaninen avausprosessi	13
3 Mekaanisen avausprosessin vaikutukset tekstiilikuituihin.....	15
3.1 Vaikutus kuidun pituusjakaumaan	15
3.2 Aukeamattomat kuidut ja materiaalin sulaminen.....	17
4 Tekstiilikuidun loppukäyttö	19
4.1 Soveltuvuus langanvalmistukseen	19
4.2 Komposiittimateriaalit.....	19

YHTEENVETO

LÄHDELUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

CO	puuvilla
CO/PES	puuvilla-polyesterisekoite
glyseroli	kitkan vähentämiseen käytettävä kemikaali
NIR	lähi-infrapunaspektroskopia
PEG 4000	polyeteeniglykoli 4000
PES	polyesteri
PET	polyetyleniterftalaatti joka on yhdenlainen polyesteri

1 JOHDANTO

Suomessa on tällä hetkellä kehitteillä monia innovaatioita ja jo toimintansa aloittaneita yrityksiä alanaan tekstiilien kiertotalous. Toimijoita varten on olemassa Telaketju-verkosto tuomaan alan yrityksiä ja tutkimusta yhteen. Telaketju-projektilla pyritään monialaisuuteen ja uuden liiketoiminnan luomiseen. (VTT et al., 2019) Tämä kandidaatintyö keskittyy tekstiilikuidun mekaaniseen kierrätykseen. Telaketju-verkoston kuuluvalla Rester Oy:llä on oma linjastonsa tekstiilien käsittelylaitoksella Paimiossa. Samassa paikassa toimii myös uusi Lounais-Suomen jätehuollon kuluttajatekstiilejä prosessoiva linjasto.

Tämän työn tarkoituksena on koota yhteen tietoa mekaanisen avausprosessin vaikutuksista tekstiilikuituihin. Tieto kerätään alan tutkimuksista kirjallisuuskatsauksena. Kandidaatintyön näkökulmana on Rester Oy:n mekaaninen tekstiilin avausprosessi ja siitä saadun tuotteen ominaisuuksien kehittäminen langanvalmistukseen sopivaksi. Lähtökohtana on, että mekaanisesti avattu tekstiilikuitu on lyhyempää kuin neitseellinen kuitu. Tekstiilikuidun lyhentymisen halutaan minimoida.

Tekstiilien kiertotalous ja mekaaninen kuidun avaus ovat ajankohtaisia aiheita ja kehittyvät jatkuvasti. Tekstiilejä on jo kauan mekaanisesti revitty auki ja hyödynnetty kuituna esimerkiksi erilaisina täytemateriaalina. Suuremmissa mittakaavassa mekaanisia kuidunavauslinjastoja hyödyntäen toiminta on kuitenkin suhteellisen uutta. Kun jo käytössä ollut tekstiili hyödynnetään uuden tuotteen raaka-aineena, säästävät esimerkiksi puuvillan tuotannon osalta tarvittavat suuri vesimäärä sekä peltopinta-ala.

2 TEKSTIILIEN KIERTOTALOUS

Tekstiiliteollisuus on nykytilanteessaan monella tapaa kestävässä tilassa. Ympäristö- ja sosiaalisia vaikutuksia syntyy kuidun tuottamisesta, käytöstä ja hävittämisestä. Vuonna 2016 Euroopassa syntyneestä tekstiilijätteestä kierrätettiin uudelleenkäyttöön 15–20 % ja vain 1 %:sta poistotekstiilistä kierrätettiin suljettuna kiertona uudeksi kuiduksi. Muutosta tilanteeseen halutaan ajaa kiertotalouden kautta, jossa pyritään materiaalivirtojen suljettuun systeemiin. Tekstiilien kannalta tämä tarkoittaa käyttökelpottomien tekstiilien kierräystä tekstiilikuiduksi. (Ribul et al., 2021)

Kierrätystekstiilejä voidaan tällä hetkellä prosessoida esimerkiksi mekaanisesti tai kemiallisesti sekä termisesti sulattamalla, ja näillä menetelmillä materiaali saadaan käytettyä uudelleen. (Wang, 2006)

Yhteiskunta on alkanut tukea yritysten siirtymistä kohti kiertotaloutta. Euroopan komissio julkaisi vuoden 2020 alussa kiertotalouden toimintaohjelman, jolla halutaan saada muutosta nykyisiin toimintamalleihin. Kiertotalouden toimintaohjelma sisältää tekstiilistrategian, jossa on merkittäviä toimia tekstiilialalle. Tekstiiliteollisuuteen liittyvissä muutoksissa halutaan esimerkiksi vaikuttaa tuotteiden suunnitteluun ja osoittaa taloudellista tukea kestävää liiketoimintaa harjoittaville yrityksille. Tuotteiden suunnittelulla halutaan vaikuttaa kestävyteen ja kierrätettävyyteen. (Heino et al., 2020)

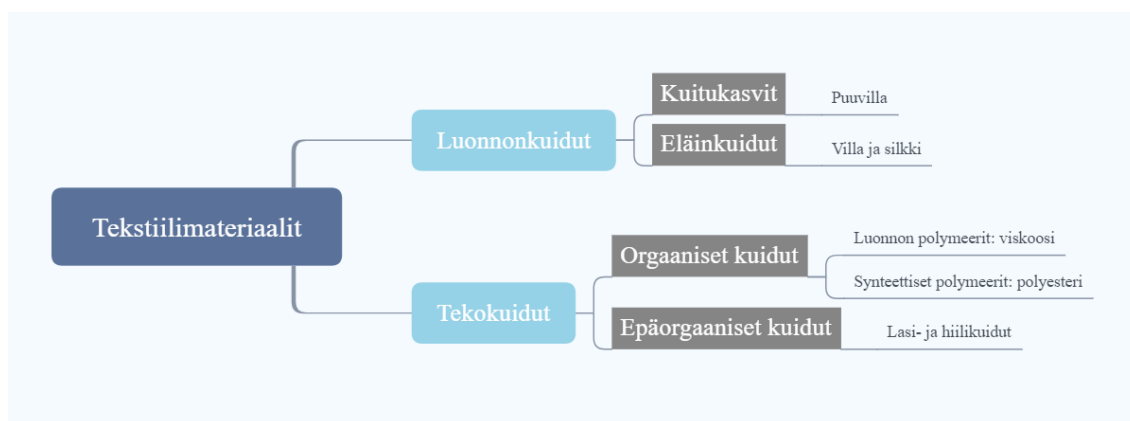
Tekstiilien kierrätysprosessia suunnitellessa on huomioitava esimerkiksi raaka-aineen eli käytetyn tekstiilin tasainen saatavuus, prosessin energiankulutus, päästöt ja tuotteen kilpailukyky, johon lainsäädännön muutoksilla on merkitystä. (Wang, 2006) Erilaisilla tukitoimilla halutaan nostaa kestävää liiketoimintaa yhä kilpailukykyisemmäksi lineaariseen talouteen nähden. Yksi tukitoimista on European Green Deal ilmasto- ja ympäristöohjelma. Ohjelman tavoitteena on irrottaa talouskasvun riippuvuus kestävästä luonnonvarojen käytöstä. (Heino et al., 2020)

Kestävän tekstiiliteollisuuden aikaansaamiseksi tärkeää on myös ymmärrys eri tekstiilimateriaalien ominaisuuksista ja tuotannosta. (Harmsen et al., 2021) Jo valmistusvaiheessa voidaan huomioida, miten materiaali saadaan kierrätettyä. Kierrätettävyyden lisäksi kestävä tekstiilin tärkeitä ominaisuuksia ovat pitkäikäisyys, monikäyttöisyys ja ajattomuus. Kulutustottumusten muuttaminen, pikamuoti-

kulttuurista eroon pääseminen ja tekstiilien elinkaaren pidentäminen ovat ratkaisevassa roolissa tekstiilien kiertotaloudessa. (Heino et al., 2020)

2.1 Eri tekstiilimateriaalit

Kuvassa 1 on esitettyä tekstiilimateriaalien luokittelu alkuperän ja kemiallisen rakenteen perusteella. Tekstiilikuidut voidaan jakaa kahteen pääluokkaan luonnonkuituihin ja tekokuituihin. Luonnonkuidut käsittävät kuitukasvit, kuten puuvillan sekä eläinkuidut, joihin kuuluvat esimerkiksi villa ja silkki. Tekokuidut voidaan jakaa niiden kemiallisen rakenteen mukaan; ovatko ne rakenteeltaan orgaanisia vai epäorgaanisia. Orgaaniset tekstiilimateriaalit voivat olla joko luonnollisia tai synteettisiä polymeerejä. Polyesteri on esimerkki synteettisestä polymeeristä. (Piribauer & Bartl, 2019)



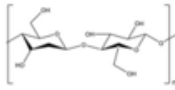
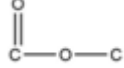
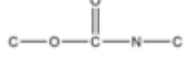
Kuva 1. Tekstiilimateriaalien luokittelu (Piribauer & Bartl, 2019).

Synteettisten polymeerien valmistuksen etuna on suhteellisen vähäinen vedenkäyttö, eikä niiden valmistus vie peltopinta-alaa. Synteettiset polymeerit valmistetaan kuitenkin yleensä öljystä ja niistä irtoaa kulutuksessa mikromuovia. Yleisin kuitu on polyesteri, jonka etuina on edullisuus ja suhteellisen hyvä kestävyys. Kemikaalien käyttö on vähäisempää värjäysvaiheessa puuvillaan nähden, mutta tuotantovaiheessa tarvitaan raskasmetalleja katalyytteinä. Elastaani on myös synteettinen polymeeri ja sitä käytetään pieninä määrinä antamaan kankaalle joustavuutta. Elastaani kykenee venymään kuusinkertaiseksi ja palautumaan hyvin takaisin. (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

Puuvilla on selluloosapohjainen luonnollinen polymeeri. Selluloosapohjaiset kuidut ovat biohajoavia, mutta niistä esimerkiksi puuvillan tuotanto vaatii runsaasti vettä. Puuvilla on polyesterin jälkeen toiseksi käytetyin kuitu, sillä sen etuina on keveys ja vahva rakenne. (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

Synteettiset polymeerit jakautuvat edelleen additio- ja kondensaatiopolymeereihin. Polyesteri kuuluu näistä kondensaatiopolymeereihin, jotka muodostuvat polymerisaatioreaktiossa useammasta erilaisesta monomeeristä. Additiopolymeerit koostuvat yleensä vain yhdenlaisista monomeereistä, jotka liittyvät yhteen pitkiksi yhtenäisiksi ketjuiksi. Kemiallisiin sidoksiin ja rakenteeseen perustuva luokittelu on kiertotalouden näkökulmasta hyödyllistä, sillä kemialliset sidokset vaikuttavat tekstiilin fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin sekä kierrätettävyyteen. (Harmsen et al., 2021)

Taulukko 1. Eri tekstiilimateriaaleja ja niiden sisältämiä kemiallisia sidosryhmiä (Harmsen et al., 2021)

Polymeeri	Polysakkaridit: Selluloosa	Polyesteri	Polyuretaani
Pääasiallinen sidosryhmä	β -glykosidisisidos 	esteri 	uretaani 
Esimerkkikuidut	puuvilla	PET	elastaani

Osa tekstiileistä on sekoitemateriaaleja eli ne koostuvat useammasta kuin yhdestä materiaalista. Esimerkiksi puuvilla sekoitettuna muutama prosenttiin elastaania on todella yleinen sekoite. Kierrätettävyyden kannalta sekoitemateriaalien materiaalituntemus on tärkeää. Mikäli sekoitemateriaalin materiaaliyhdistelmät vaihtelevat voi kierrätykseen aiheutua ongelmia. (Harmsen et al., 2021) Suuri osa sekoitemateriaaleista koostuu puuvillasta ja polyesteristä. Puuvilla-polyesteri suhde voi vaihdella, jolloin luotettavan lajittelun merkitys kasvaa. (VTT et al., 2019)

2.2 Tekstiilien keräys

Kuluttajatekstiileille on olemassa erilliskeräyspisteitä, joita ylläpitävät pääasiassa hyväntekeväisyysjärjestöt, kuten Pelastusarmeija ja UFF. Hyväntekeväisyysjärjestöjen keräyspisteet on kuitenkin tarkoitettu ehjille ja puhtaille tekstiileille, jotta ne kelpaavat sellaisenaan myyntiin ja uudelleenkäytettäväksi. Kaikki kuluttajilta kerätty tekstiili ei jää Suomeen, vaan sitä päätyy aina Afrikkaan saakka. (Dahlbo et al., 2015)

Rikkinäisille tekstiileille ei ole yhtä laajaa keräystä, vaan nämä päätyvät pääasiassa sekajätteen kautta poltettaviksi ja hyödynnettäväksi energiana. Halukkuutta rikkinäisten tekstiilien keräykseen löytyy niin kuluttajilta kuin yrityksiltäkin. (Dahlbo et al., 2015) Muutosta parempaan tekstiilien erilliskeräykseen edistää esimerkiksi Euroopan unionin jätedirektiivi, joka astuu voimaan vuonna 2025. Jätedirektiivi velvoittaa jäsenmaat tekstiilien erilliskeräykseen myös rikkinäisten tekstiilien osalta. (VTT et al., 2019)

2.3 Tekstiilien lajittelu

Ennen prosessointia tekstiilikuiduiksi kerätyt tekstiilit lajitellaan kunnan ja materiaalin perusteella. Tekstiilejä voidaan lajitella sekä käsin että koneen avulla, jolloin yleisimmin käytetään automatisoitua lajittelulinjastoa. Käsinlajittelussa pystytään ensisijaisesti tunnistamaan uudelleenkäytettävät tekstiilit, ja kokenut lajittelija voi tunnistaa myös materiaaleja toisistaan. Apuna käsinlajittelussa voidaan hyödyntää tekstiilien pesulappujen materiaalitietoja, mikä kuitenkin hidastaa lajittelua. Ongelmana on, ettei pesulappua välttämättä löydy jokaisesta tekstiilistä. (VTT et al., 2019)

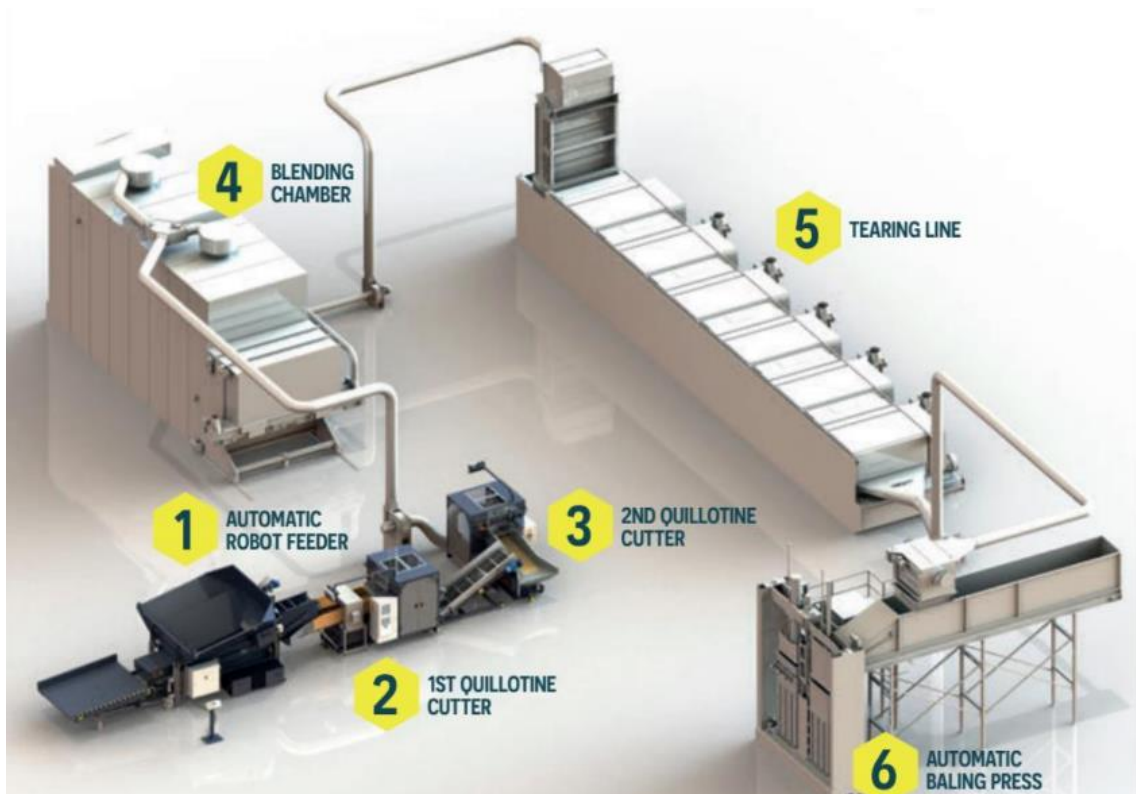
Koneellisessa tekstiilien lajittelussa hyödynnetään usein NIR-teknologiaa, joka perustuu lyhytaaltoisen infrapunasäteilyn ja sähkömagneettisen spektrin käyttöön. NIR-teknologian avulla tekstiilit voidaan lajitella värin ja materiaalien perusteella, mutta tekniikka vaatii käsin tehdyn esilajitteluvaiheen uudelleenkäytettävien tekstiilien tunnistamiseksi. (Dahlbo et al., 2015)

Automatisoidussa NIR-lajittelussakin tapahtuu ajoittain virhetunnistuksia, joista huomattava osa johtuu elastaanista. Elastaania käytetään pieninä määrinä muun materiaalin joukossa, jotta tekstiilistä saadaan joustavampaa. NIR-teknologia tunnistaa tietyn materiaalin spektrin vaateen pinnasta ja elastaani on usein joko nurjalla puolella tai langan ytimessä, jolloin virhetunnistuksia tapahtuu. Virhetunnistusten johdosta

elastaania sisältävä tekstiili päättyy esimerkiksi mekaaniseen kierrätykseen, jossa se voi tulla laitteistoa. (VTT et al., 2019)

2.4 Tekstiilien mekaaninen kierrätys

Tekstiilit koostuvat kuiduista, jotka on kehrätty langaksi ja kudottu kankaaksi tai neulokseksi. Mekaaninen kierrätys perustuu tekstiilin avaamiseen takaisin kuiduksi. Kierrätysprosessin jälkeen kuidusta voidaan valmistaa esimerkiksi kuitukangasta tai se voidaan kehrätä uudelleen langaksi. Mekaanisen kierrätyksen alussa tekstiili leikataan pieniksi paloiksi. Palat revitään ajamalla ne nopeasti pyörivien sylintereiden läpi. Sylinterien pinnalla on piikkejä, jotka tarttuvat tekstiiliin ja repivät rakenteen auki. (Sjöblom, 2018) Pyöriviä sylintereitä on noin 3–6, ja niiden pinnalla olevien piikkien määrä kasvaa mitä edemmäs prosessissa siirrytään. (Aronsson & Persson, 2020)



Kuva 2. Mekaaninen kuidunavauslinjasto (Rester, 2022)

Kuvassa 2 on esitettyä mekaaninen avausprosessi yksikköprosessittain. Linjaston alussa on automaattinen syöttö, jolla voidaan säädellä tekstiilin määrää prosessissa. Syötön jälkeen on kaksi erillistä giljotiinileikkuria, joiden välissä tekstiili kääntyy

ilmavirran seurauksena 90 astetta, jotta paloista saadaan neliskanttisia. Sekoitussäilöillä voidaan esimerkiksi silputun puuvillan joukkoon lisätä haluttu määrä polyesteriä. Repimisvaiheessa tekstiilipalat avataan pyörivillä sylintereillä kuiduksi. Prosessin lopussa avattu kuitu paalataan.

Mekaanisen avausprosessin etuina on sen edullisuus ja vähäisempi energiankäyttö verrattuna muihin kuidun kierrätystapoihin, kuten kemialliseen kierrätykseen. Tekstiilikuidun pituus lyhenee mekaanisessa kierrätyksessä, joten samaa kuitua ei voida avata useaan kertaan. Mekaanista kuidun avausta hankaloittaa materiaalien kehittyminen erilaisiksi sekoitemateriaaleiksi, johon ratkaisuna on hyvä lajittelu ennen kuidun avaamista. (Dahlbo et al., 2015) Vaikka kuitu lyheneekin mekaanisesti avattaessa, on alkuperäisen tekstiilin ominaisuuksilla suuri riippuvuus avatun kuidun laatuun. (Ütebay et al., 2019)

2.5 Rester Oy:n mekaaninen avausprosessi

Rester Oy on yritystekstiilien mekaaniseen kierrätykseen erikoistunut kierrätyslaitos Paimiossa. Resterin avausprosessilla voidaan kierrättää sekä luonnonkuituja, joista pääasiassa puuvillaa ja villaa, että tekokuituja, kuten polyesteriä ja polypropeenaa. Tekstiili voi myös olla puuvillan ja polyesterin sekoitetta. (Rester Oy, 2022) Polyesteri-puuvillasekoitteet ovatkin yleisiä työvaatteissa ja kyseisen sekoitteen tuotantomäärät suuria. (Harmsen et al., 2021)



Kuva 3. Resterin prosessikaavio (Rester, 2022)

Kuvassa 3 on kerrottu prosessin vaiheista. Erityistä prosessissa on raaka-aineen tasalaatuisuus, sillä Rester Oy vastaanottaa kuivaa ja puhdasta yritystekstiiliä. Kierrätettäväksi saadaan suuria määriä tietynlaista tekstiiliä kerrallaan. Tällöin lajitteluun ei tarvitse käyttää paljoa aikaa itse laitoksella ja avatusta kuidusta saadaan tasalaatuista, kun erä koostuu samanlaisista vaatteista. Vastaanotetuista yritystekstiileistä Rester Oy tuottaa jatkojalostettavaa tekstiilikuitua. Yrityksestä riippuen tekstiilikuidusta voidaan valmistaa esimerkiksi akustiikkalevyjä tai lankaa. (Rester Oy, 2022) Resterin avausprosessissa on myös kostutusallas langanvalmistukseen käytettävää kuitua varten: ”Kun prosessoidaan kuitua langanvalmistukseen, niin veden lisäksi kostutusaltaassa syötetään pehmenintä, jotta kuidun pituus säilyy mahdollisimman pitkänä”, toteaa Henna Knuutila Rester Oy:ltä. (Knuutila, 2022)

3 MEKAANISEN AVAUSPROSESSIN VAIKUTUKSET TEKSTIILIKUITUIHIN

3.1 Vaikutus kuidun pituusjakaumaan

Eri materiaalista valmistetut tekstiilikuidut soveltuvat mekaaniseen kierrätykseen eri tavoin. Puuvilla on luonnonkuitu ja sen kuitujakauma vaihtelee 22–32 mm välillä. (Palme, 2017) Kun kuitu avataan mekaanisesti, pituusjakauma lyhenee alkuperäisestä, mikä johtuu esimerkiksi kuitujen välisestä kitkasta. Kuitujen välistä kitkaa on mahdollista vähentää eri tavoin. Yksi vaihtoehdoista on esikäsitellä tekstiili kitkaa vähentävällä kemikaalilla, kuten PEG 4000:lla eli polyeteeniglykolilla tai glyserolilla. Molemmat näistä ovat ympäristöystävällisiä kemikaaleja. (Sjöblom, 2018)

Boråsin yliopistossa on tutkittu eri tutkimuksissa PEG 4000 vaikutusta pituusjakauman parantamiseen. Kyseisen kemikaalin käyttö vähentää mekaanisen avaamisen aikaista kuitujen välistä koheesiota. Tutkimuksessa materiaaleina olivat 100 % puuvilla- ja 100 % polyesterikankaat sekä puuvillapolyesterisekoite, jossa oli 50 % kumpaakin materiaalia. Kankaista leikattiin 1 dm²:n kokoisia paloja ja ne pestiin kankaiden sisältämien muiden kemikaalien vaikutusten poistamiseksi. Polyeteeniglykolin ansiosta pituusjakaumat paranivat huomattavasti. (Lindström et al., 2020)

Taulukko 2. Polyeteeniglykolin vaikutus kuitujen keskipituuksiin (Lindström et al., 2020)

Materiaali	Esikäsitteleminen	Kuidun keskipituus (mm)
CO	Vertailuarvo	20,6/27,6
	0,0 wt. % PEG	9,1
	0,1 wt. % PEG	11,9
	0,3 wt. % PEG	13,4
PES	Vertailuarvo	-/28,0
	0,0 wt. % PEG	7,8
	0,2 wt. % PEG	15,1
	0,7 wt. % PEG	17,2
CO/PES	Vertailuarvo	25,4/28,8
	0,0 wt. % PEG	9,4
	0,1 wt. % PEG	12,9
	0,5 wt. % PEG	13,1

Tutkimuksessa kuidunpituudet mitattiin kuva-analyysin avulla ja saatujen tulosten pohjalta jokaiselle tutkitulle materiaalille laskettiin kuitujen keskipituudet, jotka on esitetty yllä olevassa taulukossa 2. Taulukossa materiaalien lyhenteistä CO on puuvillan lyhenne, PES polyesterin ja CO/PES on kummastakin koostuva sekoite. Kuten taulukosta 2 voidaan lukea, polyetyleeniglykoli vaikuttaa parhaiten polyesteriin. Polyesterikuitujen keskipituus alkutilanteessa ennen mekaanista avaamista on 28,0 mm ja ilman esikäsitteilyä keskipituus tippuu 7,8 millimetriin. Kun tämä esikäsitellään 0,7 painoprosentilla polyetyleeniglykolia, polyesterikuitujen pituus yli kaksinkertaistuu. (Lindström et al., 2020)

Myös tekstiilin rakenteella on merkitystä pituusjakauman syntyyn. Egen yliopiston tuottamassa tutkimuksessa haluttiin selvittää, miten pituusjakauman syntyyn vaikuttaa se, millä tavoin ja kuinka tiiviisti kangas on kudottu sekä minkä kokoisiksi paloiksi tekstiili on leikattu ennen avaamista. Tutkimuksessa tutkittiin käyttämättömiä puuvillaisia tekstiilikuituja. Kankaat olivat kudottu eri tavoin joko lomittain tai joustavana jerseyinä. Tutkimuksessa haluttiinkin tietää myös, miten puuvillasta koostuvien lomittaisen rakenteen omaavan kankaan ja joustavan single jersey-kankaan avaaminen eroavat pituusjakaumaltaan. Lisäksi tutkimuksella selvitettiin värjäämisen vaikutusta pituusjakaumaan. (Ütebay et al., 2019)

Toisena vaikuttavana tekijänä tutkittiin värjäystä. Puuvillatekstiili värjätään usean vaiheen kautta, joihin kuuluu peseminen, valkaisu, itse värjäys sekä värjätyin kuidun pehmentäminen. Värjäamisprosessissa käytetyt kemikaalit heikentävät puuvillakuitua, minkä takia värjätyin tekstiilin pituusjakauma on pienempi kuidun avaamisen jälkeen kuin värjäämättömällä tekstiilillä. Näin osoittivat myös tutkimuksen tulokset, sillä käsittelemätön kuitu kesti mekaanisen avaamisen useamman kerran kuin värjätty. (Ütebay et al., 2019)

Parhaiten mekaanista avaamista kestävä värjäämättömät single jersey -kankaat, ja niiden murtolujuudet olivatkin suurimpia. Nämä kankaat voitiin syöttää avattavaksi noin kolme kertaa. Pituusjakaumaan kankaan neulontatyyppi vaikutti siten, että single jersey -kankailla kuitujen keskipituudet pysyivät korkeampina. Lisäksi single jersey -kankaalla lujuus ja venymäprosentit olivat suurempia kuin lomittain neulotulla kankaalla. (Ütebay et al., 2019)

Vaatteiden käyttöasteella on myös vaikutuksensa kuidun pituusjakaumaan, mikä todettiin Julia Aronssonin ja Anders Perssonin tutkimuksessa. Tutkittavat kankaat olivat single-jersey ja denim-kankaisia t-paitoja ja farkkuja ja materiaaliltaan ne olivat 100 % puuvillakankaita. Käyttöasteita oli useita, ja esimerkiksi korkeimman käyttöasteen vaatteet olivat rikkinäisiä sisältäen reikiä ja repeämiä, kun taas osa oli lähes käyttämättömiä. Näytetekstiileille tehtiin ennen prosessointia kuidun pituusanalyysi. (Aronsson & Persson, 2020)

Käyttö oli kuluttanut tekstiilejä ja tutkimuksessa havaittiin käytön lyhentävän pituusjakaumia, muttei merkittäväällä tasolla. Tutkimuksen tuloksena myös hyvin kuluneesta tekstiilistä peräisin olevat kuidut olivat arvokasta raaka-ainetta jatkoprosessointiin ja myös korkeaa laatua vaativaan langanvalmistukseen. (Aronsson & Persson, 2020)

3.2 Aukeamattomat kuidut ja materiaalin sulaminen

Mekaanisen avauksen ongelmana ovat kuidun sekaan jäävät aukeamattomat kuidunpätkät. PEG 4000:n tai glyserolin käytöllä voidaan vähentää aukeamattoman kuidun määrää. Polyesterin ja muiden synteettisten kuitujen ongelmana mekaanisessa avauksessa on myös kitkan aikaansaama lämpö, jonka takia materiaali saattaa sulaa. Polyeteeniglykolilla tehty esikäsitteily vähentää kitkaa, jolloin polyesteri ei pääse sulamaan. Glyseroli ei auttanut sulamisen vähenemiseen yhtä tehokkaasti. Polyeteeniglykoli ja glyseroli auttavat myös aukeamattoman kuidun määrään taulukon 3 mukaisesti. (Sjöblom, 2018)

Taulukko 3. Aukeamattoman kuidun ja solmukohtien määrä (Sjöblom, 2018) ja (Lindström et al., 2020)

Näyte	Näytteen paino (g)	Solmukohtien määrä	Aukeamattomien kuitujen määrä	Solmujen ja aukeamattomien kuitujen painoprosentit
CO käsittelemätön	0,25	91	194	23,2
CO 0,1 w% PEG	0,25	80	144	21,2
CO 0,29 w% PEG	0,25	59	116	-18,4

CO glyseroli	0,25	73	88	17,2
PET käsittelemätön	0,25	386	299	44,4
PET 0,2 w% PEG	0,25	234	269	41,2
PET 0,71 w% PEG	0,25	154	129	22,0
PET glyseroli	0,25	475	127	30,4
CO/PET käsittelemätön	0,25	450	137	22,4
CO/PET 0,1 w% PEG	0,25	268	197	22,4
CO/PET 0,5 w% PEG	0,25	372	153	18,4
CO/PET glyseroli	0,25	276	133	16,8

Polyetyleeniglykoli vaikuttaa aukeamattoman kuidun määrään samalla, kun myös pituusjakauma paranee kemikaalin vaikutuksesta. Samaa repivää voimaa käyttämällä saadaan laadukkaampaa kuitua useamman eri ominaisuuden osalta. (Lindström et al., 2020)

Painoprosentin laskemiseksi solmut ja aukeamattomat kuidun pätkät erotettiin muun kuidun joukosta ja punnittiin erillään, minkä jälkeen arvoa verrattiin kokonaispainoon. Taulukosta 3 on esitetty tutkimustulokset solmukohtien ja avaamattoman kuidun vähenemiseen. Aukeamattomien kuitujen ja solmujen painoprosentista nähdään suoraan kokonaisvaikutus eli millainen esikäsitely on kannattavin kummankin ominaisuuden rajoittamisen kannalta. (Lindström et al., 2020)

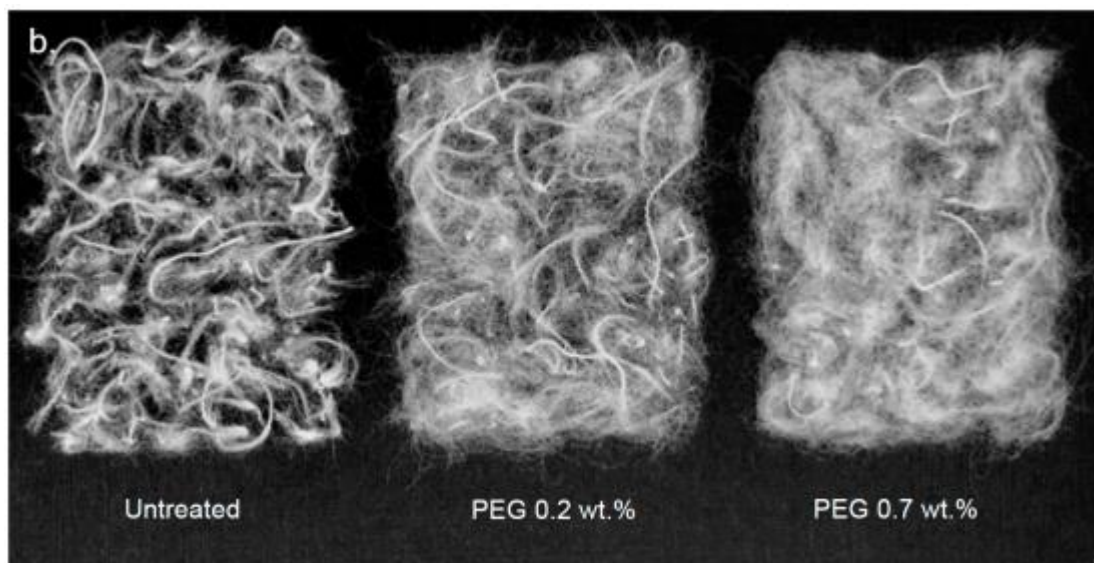
Polyesterillä 0,71 w-%:n esikäsitely on merkittävin, sillä aukeamattomien kuitujen ja solmujen osuus tippuu noin puoleen alkuperäisestä. Puuvillalla tulos on paras esikäsiteltäessä glyserolilla ja muutos 5 %-yksikköä. Huomioitava seikka on, että glyserolikäsittely ei tehoa solmukohtiin yhtä tehokkaasti kuin PEG 4000, ja polyesterillä tämä jopa lisää solmukohtia esikäsittelemättömään nähden. (Lindström et al., 2020)

4 TEKSTIILIKUIDUN LOPPUKÄYTTÖ

4.1 Soveltuvuus langanvalmistukseen

Mekaanisesti avattu hyvälaatuinen kuitu voidaan kehrätä sellaisenaan langaksi, mutta yleensä kierrätyskuidun joukkoon lisätään myös ensiökuitua takaamaan langalle tarvittava laatu. (Palme, 2017) Kuidun onkin oltava ominaisuuksiltaan kehruuprosessiin sopiva eli pituusjakaumaltaan pitkää ja se saisi sisältää mahdollisimman vähän aukeamatonta kuitua, joka tekee valmiista langasta karkeaa. (Ütebay et al., 2019) Kuidun pituusjakauma vaikuttaa langanvalmistuksessa kehrättävyyteen sekä siihen, kuinka vahvaa kehrätystä langasta saadaan. (Harmsen et al., 2021)

Taulukosta 3 havaitaan, kuinka paljon pituusjakauma lyhenee mekaanisessa kuidun avauksessa. Polyeteeniglykolin avulla pituusjakaumaa saatiin kasvatettua, mutta puuvillalla kyseisen kemikaalin käyttö pienensi vetolujuutta, mikä hankaloitti kehruuprosessia. Polyesterillä PEG 4000 käyttö kasvatti kuitujen vetolujuuksia, joten kemikaalista oli hyötyä monella tapaa. Avaamisen jälkeen vetolujuus kasvoi vielä lisää, kun polyeteeniglykoli pestiin pois. Puuvillapolyesterikankaasta saatu kuitu on hankalampaa käyttää langanvalmistukseen, sillä puuvilla- ja polyesterikuidut ovat mekaanisen avaamisen jälkeen eri pituisia keskenään. (Lindström et al., 2020)



Kuva 4. Polyeteeniglykolin käytön vaikutus polyesterikuitujen laatuun (Lindström et al., 2020)

Kuvasta 4 nähdään PEG 4000 hyödyt polyesterin mekaanisessa avauksessa. Taulukon 3 tuloksista havaittiin, että polyesterille on mahdollista saada merkittävät laadun muutokset aikaan PEG 4000 esikäsitellyllä. Kuvassa mitatut tulokset konkretisoituvat näkyvästi muutoksena. Laatu paranee myös puuvillalla sekä puuvilla-polyesterisekoitteella. (Lindström et al., 2020)

Mekaanisessa avausprosessissa linjaston säädöillä on vaikutusta kuidun pituuteen. Kehruumenetelmän valinnalla voidaan puolestaan vaikuttaa siihen, kuinka lyhyttä kuitua langanvalmistukseen voidaan hyödyntää. Kummankin prosessin optimoinnilla ja oikeanlaisilla valinnoilla voidaan vähentää neitseellisen kuidun käyttöä kierrätetyn kuidun joukossa. Mikäli mekaanisen avausprosessin kuitu on hieman haluttua lyhyempää, voidaan langanvalmistuksen onnistumiseen vaikuttaa myös itse kehruuprosessilla. (Spatofora, 2020)

4.2 Komposiittimateriaalit

Kierrätettyä tekstiilikuitua voidaan käyttää myös esimerkiksi erilaisissa komposiittimateriaaleissa, kuten eristemateriaaleissa ääni- ja lämmöneristykseen. Eristemateriaalin tärkeitä ominaisuuksia ovat veden- ja tulenpitävyys, johon vaikuttaa esimerkiksi materiaalin lämmönjohtavuus. Luonnonkuidut syttyvät herkästi, joten ominaisuuksien parantamiseksi joukkoon on lisättävä joko palonestokemikaaleja tai synteettistä kuitua. Kemikaalien käytön ongelmana on, että monet niistä ovat myrkyllisiä. Synteettisten kuitujen, kuten polyesterin etuna on, etteivät ne pala yhtä hyvin verrattuna luonnonkuituihin. Polyesteri kuitenkin sulaa, jolloin kuidut kutistuvat ja menettävät rakenteensa. (Islam & Bhat, 2019)

Ääni- ja lämmöneristeissä tekstiilikuidun pituuden vaikutuksia eristeominaisuuksiin tutkitaan jatkuvasti. Pituusjakaumalla on vaikutuksensa eristävytyteen, mutta ei yhtä merkittävästi kuin langanvalmistusta tarkasteltaessa. (Islam & Bhat, 2019)

YHTEENVETO

Kandidaatintyöni tavoitteena oli löytää ratkaisuja kuidun pituusjakauman parantamiseen. Ratkaisuksi haettiin apua erilaisista voitelukemikaaleista, kuten PEG 4000:sta. Johtopäätöksenä saadaan tieto, että ennen repimisvaihetta voitelukemikaalilla esikäsitelty tekstiili, aukeaa kuiduiksi paljon paremmin, mistä on hyötyä erityisesti langanvalmistukseen käytetyllä tekstiilikuidulla. Voitelukemikaalit auttoivat myös mekaanisessa avauksessa syntyvien solmukohtien vähentämiseen.

Myös itse linjastolla ja siihen tehdyillä säädöillä on suuri vaikutus. Raaka-aineen eli käytetyn tekstiilin osalta käyttöasteella ja värjäyksellä havaittiin olevan tekstiilikuitua heikentäviä vaikutuksia. Heikentyneet kuidut katkeavat helpommin ja aiheuttavat lyhyempää pituusjakaamaa. Värjätyssä tekstiilissä kuitua heikentävät värjäykseen käytetyt voimakkaat kemikaalit, joten värjäämättömällä kuidulla tulokset olivat tämän takia parempia.

Kierrätettyä tekstiilikuitua voidaan nykyisinkin hyödyntää langanvalmistuksessa, mutta joukkoon lisätään lähes aina ensiökuitua. Voitelukemikaaleilla ja huomioimalla tekstiilikuidun laatuun vaikuttavat tekijät raaka-aineesta lopputuotteeseen saakka saadaan aikaan yhä laadukkaampaa kierrätettyä tekstiilikuitua, jota voidaan hyödyntää sellaisenaan korkeaa laatua vaativissa tuotteissa.

LÄHDELUETTELO

- Aronsson, J., & Persson, A. (2020). Tearing of post-consumer cotton T-shirts and jeans of varying degree of wear. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15. <https://doi.org/10.1177/1558925020901322>
- Dahlbo, H., Aalto, K., Salmenperä, H., Eskelinen, H., Pennanen, J., Sippola, K., & Huopalaainen, M. (2015). *Tekstiilien uudelleenkäytön ja tekstiilijätteen kierrätyksen tehostaminen Suomessa*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A new textiles economy: redesigning fashion's future*.
- Harmsen, P., Scheffer, M., & Bos, H. (2021). Textiles for circular fashion: The logic behind recycling options. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179714>
- Heino, A., Markkula, A., Saario, M., Sihvonen, H., Ylimäki, L., Kamaja, M., Mikkonen, H., Mäki, S., Tekstiili, S., & Muoti, &. (2020). *Hiilineutraali tekstiiliala-tiekartta Loppuraportti*.
- Islam, S., & Bhat, G. (2019). Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 251). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109536>
- Knuutila, H. (2022). *Tapaaminen 14.4.2022*.
- Lindström, K., Sjöblom, T., Persson, A., & Kadi, N. (2020). Improving mechanical textile recycling by lubricant pre-treatment to mitigate length loss of fibers. *Sustainability (Switzerland)*, 12(20), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su12208706>
- Palme, A. (2017). *Recycling of cotton textiles : characterization, pretreatment, and purification*.
- Piribauer, B., & Bartl, A. (2019). Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. *Waste Management & Research : The Journal of the*

International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 37(2), 112–119. <https://doi.org/10.1177/0734242X18819277>

Rester. (2022). *Rester sisäinen materiaali*.

Rester Oy. (2022). <https://rester.fi/>.

Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni Pisapia, C., Purnell, P., McQueen-Mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>

Sjöblom, T. (2018). *FABRIC CONDITIONING FOR MORE GENTLE SHREDDING- Pre-treatment for mechanical recycling of cotton and polyester*.

Spatafora, J. (2020). *The Ideal Rotor Spinning Process for a High Short-Fiber Content*.

Ütebay, B., Çelik, P., & Çay, A. (2019). Effects of cotton textile waste properties on recycled fibre quality. *Journal of Cleaner Production*, 222, 29–35. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.033>

VTT, Kamppuri, T., Heikkilä, P., Pitkänen, M., Saarimäki, E., Cura, K., Zitting, J., Knuutila, H., & Mäkiö, I. (2019). *Tekstiilimateriaalien soveltuvuus kierrätykseen*.

Wang, Y. (2006). *Recycling in textiles - introduction*.