

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2024

Teri Niekka

Tekstiilikuitujen kuluminen ja kuiduntunnistus

– tekstiilin elinkaaren vaikutukset kuitusisältöön



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2024 | 58 sivua

Teri Niekka

Tekstiilikuitujen kuluminen ja kuiduntunnistus

- tekstiilin elinkaaren seuraukset kuitusisältöön

Maailmanlaajuisesti alle 1 % kaikista markkinoilla olleista tekstiilikuiduista oli valmistettu kierrätystekstiileistä vuonna 2021. Poistotekstiilien uusiokäyttö on ajankohtaista ja uusiokuidun käyttö vaatii suunnittelua. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin tekstiilikuitusuhteiden muutoksia polyesteri-puuvillasekoitevaatteissa. Opinnäytetyössä perehdyttiin tekstiilien tunnistusmenetelmiin sekä konenäön mahdollisuuksiin tekstiilien tunnistamisessa. Tutkimusta aiheesta on aiemmin tehty niukasti, joten tutkimus on ajankohtaista ja tarpeellista. Tutkimusmenetelmänä käytettiin empiiristä tutkimusta.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten identtiset tekstiilit kuluvat elinkaarensa aikana ja miten mekaaninen kuidunavaus vaikuttaa tekstiilien kuitusuhteisiin. Kulumaa tutkittiin hyperspektrikuvantamisen ja kemiallisen analyysin avulla.

Hyperspektrikuvantamisella tuotettu algoritmi ennusti lupaavasti pesukertoja ± 3 :n pesun tarkkuudella. Kemiallinen analyysi puolestaan osoitti, että tekstiilin käyttö ja pesut aiheuttavat kulumaa. Kuluma ei ole lineaarista eli suoraan verrannollista pesukertoihin. Mekaanisen kuidunavauksen vaikutuksia puolestaan on vaikeaa todentaa, koska näytteiden kuitusuhte-ero oli yhden prosentin luokkaa, joka menee analyysin virherajojen sisään.

Asiasanat:

Kuitusuhte, tunnistusmenetelmät, polyesteri-puuvillasekoite, hyperspektrikuvantaminen, kemiallinen analyysi

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environmental engineering

2024 | 58 pages

Teri Niekka

Textile fiber wear and fiber identification

- Consequences of textile lifecycle on fiber content

Less than 1-% of all textile fibers on market were made by recycled textiles on 2021. The reuse of textile waste is a current issue and the usage of recycled fiber requires planning. This thesis investigates changes in textile identification methods and the possibilities of machine vision in textile identification. Previous research on the topic has been scarce, making this study relevant and necessary. Empirical research was used as the research method.

The aim of the thesis was to determine how identical textiles wear during their lifecycle and how mechanical fiber opening affects textile fiber rotations. Wear was examined through hyperspectral imaging and chemical analysis.

The algorithm produced by hyperspectral imaging predicted wash cycles promisingly with an accuracy of ± 3 washes. Chemical analysis, on the other hand, showed that textile use and washes cause wear. Wear is not linear or directly proportional to wash cycles. The effects of mechanical fiber opening are difficult to confirm because the difference in fiber ratios between samples was within one percent, which falls within the error margins of the analysis.

Keywords:

Fiber ratio, identification methods, polyester-cotton blend, hyperspectral imaging, chemical analysis

Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Tekstiilikuitujen ominaisuuksia	12
2.1 Puuvilla	12
2.2 Polyesteri	13
2.3 Polyesteri-puuvillasekoite	14
2.4 Kuidun ominaisuuksien vaikutus tekstiilien kulumiseen	14
3 Mekaaninen kuidunavaus	17
4 Tekstiilikuitujen tunnistustavat	20
4.1 Infrapunaspektroskopiaan perustuvat tunnistusmenetelmät	21
4.1.1 NIR-analyysimenetelmä	21
4.1.2 FTIR-analyysimenetelmä	22
4.2 Hyperspektrikuvantaminen	23
4.3 Tekoäly	25
4.3.1 Konenäkö	25
4.3.2 2D- ja 3D-hahmontunnistus	26
4.4 Erillisiin tunnistuksiin perustuvat menetelmät	27
4.4.1 RFID	27
4.4.2 Viivakoodit	28
4.5 Muut tunnistusmenetelmät	29
4.5.1 Mikroskopointi	29
4.5.2 Kemiallinen analyysi	29
4.5.3 Polttokoe	31
4.5.4 Värjäystestit	31
4.5.5 Tiheystestit	32
5 Tutkimuksen toteutus	33
5.1 Hyperspektrinen kuvantaminen	34

5.2 Mekaaninen kuidunavaus	40
5.3 Kemiallinen analyysi	41
6 Mittaustulokset	43
6.1 Hyperspektrikuvantamisen tulokset	43
6.2 Kemiallisen analyysin tulokset	44
6.3 Tulosten yhteenveto	46
7 Pohdinta	49
Lähteet	52

Liitteet

Liite 1. Taulukko 2. Hyperspektrikuvannettavien näytteiden tiedot.

Kuvat

Kuva 1. Paimion kuidunavauslinjaston havainnekuva (Kuva: Rester Oy 2024).	17
Kuva 2. Polyesterikuitu mekaanisen kuidunavauksen jälkeen (Kuva: Kirsi Jaakkola).	18
Kuva 3. Vasemmalla hyperspektrikameran väärävärikuva näytteestä ja oikealla näytteen raakaspektri (Kuva: Tuomas Sormunen).	24
Kuva 4. Näyte laitetaan kuvassa näkyvälle vihreälle liukuhihnalle mustaa taustaa vasten (Kuva: Tuomas Sormunen).	36
Kuva 5. Tarkempi kuva kamerasta. Sivulla näkyvät halogeenilamput, joita on yhteensä kuusi kappaletta (Kuva: Tuomas Sormunen).	36
Kuva 6. Hyperspektrikuvantamisen raakaspektrit (Kuva: Tuomas Sormunen).	37
Kuva 7. Spektrit suodatuksen jälkeen (Kuva: Tuomas Sormunen).	38
Kuva 8. Spektrisen standardoinnin jälkeen spektrit näyttävät tältä (Kuva: Tuomas Sormunen).	39
Kuva 9. Kuitu giljotiinileikkuun jälkeen (Kuva: Teri Niekka).	40

Kuva 10. Mekaanisessa kuidunavausprosessissa avattua kuitua (Kuva: Teri Niekka).	41
Kuva 11. Algoritmin tulokset (Kuva: Tuomas Sormunen).	43
Kuva 12. Pesukertojen vaikutus polyesterin osuuteen (Kuva: Teri Niekka).	47
Kuva 13. Kemiällisen analyysin tulokset esitettynä pylväsdiagrammina (Kuva: Teri Niekka).	47

Taulukot

Taulukko 1. Kemiällisen analyysin tulokset.	44
Taulukko 2. Hyperspektrikuvannettavien näytteiden tiedot.	57

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

Hankauslujuus	Kyky, jolla tekstiilin pinta vastustaa hankausta (Räisänen ym. 2017, 15).
PES/CO	Lyhenne polyesteri-puuvilla sekoitteelle (Boncamper 2011b, 112, 310).
Poistotekstiili	Omistajalleen tarpeetonta tekstiiliä. Kattaa sekä tekstiilijätteen että käytetyn ehjän tekstiilin. (Lounais-Suomen Jätehuolto n.d.)
Vetolujuus	Kuidun kuormitusta vastaava voima venyttämättömän kuidun hienouden yksikköä kohti (cN/Dtex) (Räisänen ym. 2017, 14).

1 Johdanto

Tekstiilien tuotantomäärät ovat kasvaneet räjähdysmäisesti 2000-luvun aikana: Tuotantomäärät ovat tuplaantuneet samalla kun tuotteiden käyttömäärät ovat vähentyneet lähes 25 % vuosituhanen alkuun verrattuna. Tuotantomäärän kasvua selittää esimerkiksi pikamuodin yleistymisen sekä keskiluokkaisen väestön määrän kasvu maailmassa. Monissa matalan tulotason maissa vaatteiden käyttöaste on suhteellisen korkea mutta esimerkiksi vuosituhanen alkuun verrattuna vaatteiden käyttöaste on koko maailmassa laskenut 36 %. (Ellen MacArthur Foundation 2017, 18–19.)

Vuonna 2019 Suomeen toimitettiin uusia tekstiilejä yhteensä 62 342 tonnia. Tästä määrästä 79 % oli vaatteita ja 21 % kodin tekstiilejä. Samana vuonna Suomessa arvioitiin, että noin 40 000 tonnia kotitalouksilta tullutta tekstiiliä päätyi sekajätteeseen ja yhteensä noin 44 % hankituista tekstiileistä päätyi erilliskeräykseen. (Dahlbo ym. 2019, 5–6.)

Valtioneuvoston asetuksessa (Valtioneuvoston asetus jätteistä 2021/978) on määritetty tekstiilien erilliskeräysvelvoite, joka on astunut Suomessa voimaan alkuvuodesta 2023. Tämä velvoittaa kuntia mahdollistamaan poistotekstiilin erilliskeräyksen. EU:n alueella keräys tulee pakolliseksi vuonna 2025 (Euroopan komissio 2022, 7). Dahlbon ym. (2019, 23) mukaan vuonna 2019 Suomessa syntyi yhteensä (kotitaloudet + muut toimialat) 85 773 tonnia poistotekstiilejä. Tästä määrästä

- 61 % päätyi energiaksi
- 18 % hyödynnettiin materiaalina
- 16 % päätyi vientiin
- 4 % päätyi uudelleenkäyttöön.

Vuonna 2021 maailmanlaajuisesti kaikista markkinoilla olleesta tekstiilikuidusta vain alle 1 % oli kierrätystekstiileistä valmistettua kuitua (Textile Exchange 2022, 5). Poistotekstiilien määrän kasvun seurauksena poistotekstiilien uusiokäyttökohteiden vaatimusten tarkastelu on tärkeää. Poistotekstiilistä

voidaan valmistaa uusia tuotteita, esimerkiksi lankaa tai kuitukankaita (Rester n.d.). Aurasen (2018, 27–30) mukaan (ks. Kamppuri ym. 2019b, 15–17) eri lopputuotteilla on eri vaatimukset kuitusuhteen osalta. Esimerkiksi kuidun tulee olla vähintään 10 mm pitkää, jotta sitä on mahdollista kehrätä langaksi. (Boncamper 2011b, 27). Materiaalisuhdanteiden tarkka tuntemus poistotekstiileissä on tarpeellista, jotta uuden raaka-aineen hyödyntäminen oikeassa käyttökohteessa on mahdollista.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia neitseellisten tekstiilikuitujen kulumaa käytön, pesujen sekä kuidunavausprosessin seurauksena. Tutkimus keskittyy puuvillan ja polyesterin kuitupitoisuuksien muutosten seurantaan tietyissä työvaatteissa.

Tässä opinnäytetyössä haetaan vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Muuttuuko tekstiilien kuitusuhde vaateen elinkaaren aikana? Jos muuttuu, kuinka suuresta muutoksesta on kyse?
2. Aiheuttaako mekaaninen kuidunavaus kuitusuhdemuutoksia materiaalissa?

Lisäksi tutustutaan tekstiilimateriaalien tunnistusmenetelmiin ja pohditaan menetelmien mahdollisuuksia tekstiilentunnistuksessa. Opinnäytetyössä havainnoidaan myös, voidaanko hyperspektrikuvantamisen ja konenäön avulla löytää pieniä muutoksia kuitusuhteissa.

Tekstiilien kulumisesta käytössä ja pesuissa on saatavilla niukasti tietoa, joten tutkimus aiheesta on tarpeen. Puuvillan fyysisten ominaisuuksien muutoksista pesujen seurauksena on tehty tutkimusta, jossa tutkimuksen kohteena oli neljä puuvillalakanaa. Lakanoiden pesukerrat olivat 0, 2–4, n. 50 ja yli 50.

Tutkimuksessa keskityttiin puuvillalakanoiden fyysisten ominaisuuksien, esimerkiksi ominaispinta-alan sekä puuvillan reaktiivisuuden, tutkimiseen. Tutkimuksen tuloksena on todettu, että lisätutkimuksia tarvitaan selvittämään muun muassa puuvillan reaktiivisuutta sekä liukenemiskäyttäytymistä pitkän käyttöiän jälkeen. (Palme ym. 2014, 1–9.)

Polyesterin kulumisesta pesuissa ei ole tehty tutkimusta käytännössä ollenkaan. Palmen (2017, 18) mukaan pesu saattaa aiheuttaa polyesterikuitujen ominaisuuksiin muutoksia. Palmen (2017, International Fabricare Institute 1995) mukaan esterisidokset, joita polyesteri sisältää, ovat herkkiä alkalille. On siis todennäköistä, että pesut aiheuttavat polymeerin molekyyli­massan pienenemistä.

Puuvillan tai polyesterin, tai niiden sekoitteista, ei ole tehty Suomessa tutkimusta. Myöskään tutkimusta mekaanisen kuidunavauksen aiheuttamasta kulumasta kuitusuhteiden osalta ei löytynyt. Tutkimus tekstiilin elinkaaren aiheuttamista kuitusuhteiden muutoksista on siis tarpeen.

Opinnäytetyö etenee aiheeseen liittyvästä taustakartoituksesta työssä tehtyyn tutkimukseen, jonka jälkeen esitellään tutkimustulokset ja edetään loppuyhteenvetoon.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Rester Oy. Rester on kotimainen kiertotalousalan yritys, joka tarjoaa tekstiilien kierrätysratkaisuja vastaanottamalla ja käsittelemällä mekaanisessa kuidunavausprosessissaan yritystekstiiliä luoden siitä uutta raaka-ainetta. Resterin kierrätyskuiduista voidaan valmistaa muun muassa lankaa sekä erilaisia kuitukangasmateriaaleja, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi eristeenä tai akustiikkapaneeleissa. (Rester Oy n.d.)

Tässä opinnäytetyössä tekstiilien kulumaa tutkittiin hyperspektrikuvantamisella. Hyperspektrikuvantamisen toteutti Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. VTT on suomalainen teknologian tutkimuskeskus, jonka tehtävänä on tutkimuksen ja teknologian edistämisen hyödyntäminen ja kaupallistaminen laaja-alaisesti. (VTT Oy n.d.)

Opinnäytetyön kuitusisällön mittaus toteutettiin kemiallisessa analyysissä. Kemiallisen analyysin toteutti SGS Finland Oy. SGS on maailmanlaajuinen yritys, jonka erityisosaamista ovat testaus-, tarkastus- sekä sertifiointialan asiantuntijuus. (SGS Finland Oy n.d.)

Opinnäytetyö on toteutettu osana eurooppalaista tExtended-hanketta. TExtended-hanke pyrkii esittelemään innovatiivisen lähestymistavan käytöstä poistettujen tekstiilien kierrättämiseen. Tätä missiota varten on kehitetty suunnitelma, jossa optimoidaan kierrätettävyyttä eri tekstiilivirroille. Hankkeen tavoitteena on kehittää ja tehostaa tekstiilien talteenotto-, jätteiden arvostus- ja kierrätysprosessia digitaalisten työkalujen, tunnistusjärjestelmien sekä tietopohjaisten ratkaisujen avulla. Projektin tavoitteena on edistää tekstiilien kestävää kiertoa. TExtended-hanke on saanut rahoitusta Euroopan unionin Horizon Europe -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta. (tExtended-hanke n.d.)



Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or HADEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

2 Tekstiilikuitujen ominaisuuksia

Tässä luvussa perehdytään puuvillaan ja polyesteriin kuituina, tutustutaan kuitujen ominaisuuksiin sekä ominaisuuksien vaikutuksiin tekstiilin kulumisessa. Luvussa tarkastellaan myös polyesterin ja puuvillan käyttöä sekoitteena.

2.1 Puuvilla

Puuvilla (lyhenne CO) on luonnonkuitu, tarkemmin siemenkuitu. Puuvillakasvin elinkaari on pituudeltaan noin 5–7 kuukautta, ja kasvin tuottama sato korjataan puuvillan siemenkotien auettua. Puuvillan siemenkodassa on keskimäärin kolmesta viiteen lohkoa, joissa kussakin on 7–9 siementä. Yhdestä puuvillan siemenestä saadaan jopa 10 000–20 000 kuitua. Puuvilla kerätään kasvin siemenkodista joko koneella tai käsin. Kuivattu, yhä siemenkodissa kiinni oleva puuvilla puhdistetaan, minkä jälkeen siemenet loukutetaan eli kuidusta erotellaan siemenet. (Boncamper 2011a, 25, 55–56.) Tämän jälkeen puuvilla paalataan ja lähetetään jatkokäsiteltäväksi, jossa puuvilla puhdistetaan ja karstataan. Tämän jälkeen alkaa langan valmistus. Korjuutapa vaikuttaa puuvillan laatuun. (STJM ry 2022).

Puuvilla on maailman eniten tuotettu luonnonkuitu sen osuuden ollessa 81 % kaikista tuotetuista luonnonkuiduista. Puuvillaa viljellään erityisesti Amerikassa, Afrikassa sekä Aasian maissa mutta näiden lisäksi myös muualla maailmassa, esimerkiksi Etelä-Euroopassa. Kuidun suurimpia tuottajamaita ovat Kiina, Intia, Yhdysvallat ja Pakistan. (STJM ry 2022.)

Kuituna puuvilla on lujaa ja taipuisaa. Kuitu on myös kevyttä ja pehmeää ja sillä on hyvä kosteudenimukyky. Puuvillan etuna on sen sähköistymättömyys. Puuvillakuitu on myös hengittävää, mutta kuitu rypistyy helposti ja joustaa vain vähän. (Boncamper 2011a, 66.) Puuvilla kellastuu auringonvalossa, koska sen sään- ja valonkesto ovat vain kohtalaisia. (STJM ry 2022). Puuvillakasvista saatavan kuidun pituus vaihtelee 9–65 mm välillä (Räisänen ym. 2017, 31).

Puuvillan tuotannossa on paljon haasteita. Puuvillaa voidaan viljellä vain tietyillä leveysasteilla, koska puuvillakasvin elinympäristöllä tulee olla sille optimaaliset olosuhteet. Esimerkiksi päivän ja yön väliset lämpötilaerot eivät saa olla suuria. (Boncamper 2011b, 103.) Puuvillan viljely kuluttaa paljon vettä ja vaatii paljon kemikaaleja, esimerkiksi tuhohyönteisten torjumiseksi. Lisäksi kasvia uhkaa erilaiset kasvisairaudet sekä home, joilta kasvia on suojeltava erilaisilla suoja-aineilla. (Boncamper 2011a, 59.) Kemikaalien runsas käyttö vaikuttaa puolestaan maaperään negatiivisesti. Puuvillan viljely vaatii myös paljon maapinta-alaa. (STJM ry 2022.)

2.2 Polyesteri

Polyesteri (lyhenne PES) on synteettinen tekokuitu. Tässä opinnäytetyössä käytetään termejä polyesteri, PES, synteettinen kuitu sekä tekokuitu puhuttaessa polyesteristä. Tekstiileissä hyödynnettävää polyesteriä valmistetaan kemiallisesti useimmiten polyetyleenitereftalaatista (PET). Polyesteri on maailman eniten tuotettu tekstiilikuitu ja vuonna 2020 sen osuus olikin noin 56 prosenttia koko maailman kuitumarkkinoista. Polyesteriä tuotetaan eniten Kiinassa. Muita tuottajamaita ovat Intia, Taiwan, Etelä-Korea ja Yhdysvallat. (STJM ry 2022.)

Polyesteriä valmistetaan niin kutsutulla sulakehruulla, jossa raaka-aine ensin sulatetaan, jonka jälkeen sulanut raaka-aine puristetaan kehrusuulakkeen läpi. Tämän jälkeen prosessissa sulanut raaka-aine jäähdytetään kiinteäksi ilman avulla, jonka jälkeen syntyneet säikeet lämpökäsitellään venyttäen ja stabiloiden. Tässä kohtaa prosessia kuitua voidaan vielä teksturoida tai leikata se katkokuiduiksi. (Heikkilä 2019, 11.) Teksturoinnilla voidaan parantaa joitakin kuidun ominaisuuksia, esimerkiksi sen joustavuutta. Tämän jälkeen kuitu vielä viimeistellään. (Boncamper 2011a, 190.)

Ominaisuuksiltaan polyesteri on joustavaa, kimmoisaa ja vahvaa. Kuidulla on lisäksi hyvä hankauksenkestokyky eikä polyesterikuitu rypisty. Polyesteri soveltuu esimerkiksi urheilutekstiileihin, koska siinä oleva kuitu on hydrofobista

(vettähylykivää) ja nopeasti kuivuvaa. (STJM ry 2022.) Synteettisille kuiduille ominaista kuitenkin on, että kuidut ovat hengittämättömiä ja erityisesti polyesterille on ominaista sähköistyminen. Polyesterikuitu ei myöskään lyhene eli tekstiili ei kutistu pesuissa. Synteettisiä kuituja on helppoa myös uudelleenmuotoilla kuumentamalla. (Boncamper 2011a, 36.)

Polyesterin tuottaminen on halpaa ja paljon nopeampaa kuin puuvillan (vrt. puuvilla 5–7 kuukautta ja polyesterin sulakehruu 6 000–8 000 metriä minuutissa). Useimmiten kuitenkin polyesterin raaka-aineena käytetään uusiutumattomia luonnonvaroja, joita ovat esimerkiksi raakaöljyn tislauustuotteet. Lisäksi polyesterin tuotanto vaatii paljon energiaa. Polyesterikuidusta irtoaa myös mikromuoveja, jotka ovat ongelmallisia erityisesti vesistöihin joutuessaan. (STJM ry 2022.)

2.3 Polyesteri-puuvillasekoite

Tekstiileissä käytetään sekoitteita usein hinnan vuoksi sekä siksi, että materiaalien ominaisuuksia yhdistellään keskenään. Polyesteriä sekoitetaan usein luonnonkuitujen kanssa, jolloin luonnonkuiduille tyypillisiin ominaisuuksiin (esim. helposti rypistyvä) voidaan vaikuttaa. Polyesteri-puuvillasekoitteissa saadaan yhdisteltyä esimerkiksi puuvillan miellyttävä tuntu polyesterin rypistymättömyyteen ja keveyteen. (Boncamper 2011b, 112.)

Tavallisin sekoitussuhde polyesteri-puuvillalle (PES/CO) on 67 % polyesteriä ja 33 % puuvillaa. Muita yleisiä sekoitesuhteita ovat 75/25 % PES/CO, 65/35 % PES/CO sekä 50/50 % PES/CO. (Boncamper 2011b, 112, 310.)

2.4 Kuidun ominaisuuksien vaikutus tekstiilien kulumiseen

Tekstiilien ominaisuudet vaikuttavat niiden kulumiseen ja kulutuksenkestoon. Tekstiilien ominaisuuksiin vaikuttavat käytetty kuitu, kangas- ja lankarakenne sekä kuidun kemialliset, fysikaaliset ja termiset ominaisuudet. Myös

kankaaseen tehdyt viimeistelyt vaikuttavat siihen, miten kangas kuluu. (Räisänen ym. 2017, 9.)

Tekstiilikuidut jaotellaan pituuden mukaan joko katko- tai filamenttikuiduksi. Luonnonkuiduksi luettava puuvilla on katkokuitu mutta tekokuidut voivat olla kumpia tahansa. Katkokuiduilla pituus on rajallista ja filamenttikuiduilla käytännössä rajatonta. Tekokuiduilla kuidun pituus määrätään valmistusvaiheessa ja tähän pituuteen vaikuttaa olennaisesti kuidun tuleva käyttötarkoitus: jos kuitua tullaan käyttämään esimerkiksi puuvillan kanssa sekoitteena, kuitu leikataan vastaamaan puuvillan kuitupituutta. Kuitupituus vaikuttaa muun muassa langanvalmistuksessa kuidun kehrättävyyteen ja valmiissa tuotteessa tuotteen siliävyyteen, laskeutuvuuteen, nyppyyntymiseen sekä tekstiilin kulutuksenkestoon. (Räisänen ym. 2017, 9.)

Polyesterikuituja voidaan muovata monipuolisesti omaamaan erilaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi sähköistyvyyttä voidaan estää antistaattisilla polyesterikuiduilla ja palonkestoa lisätä palonsuojakuiduilla. Lisäksi polyesteristä voidaan valmistaa mikrokuituja, joita hyödynnetään muun muassa mikrokuituliinoissa. (Boncamper 2011a, 198.) Yleisesti tekokuiduille on yhteistä, että raaka-aineen lisäksi kuidun valmistustavalla on suuri merkitys kuidun ominaisuuksiin (Heikkilä 2019, 8).

Kankaan lujuutta voidaan selvittää eri tavoin. Tapoja ovat esimerkiksi hankaus- ja vetolujuuden määrittäminen. Kuidun vetolujuus vaikuttaa tekstiilin kulutuksenkestoon niin, että mitä lujempi kuitu on kyseessä, sitä paremmin siitä tehty kangas kestää hankausta. Jos tekstiilin hankauslujuus on alhainen, tekstiiliin tulee nopeammin reikä. Esimerkiksi monissa tekstiiliprosesseissa kuitu joutuu vedon tyypisen voiman kohteeksi. Näitä prosessivaiheita ovat esimerkiksi kehruu ja kudonta. Puuvillalle on tyypillistä, että kuidun lujuus lisääntyy sen ollessa kosteaa. (Räisänen ym. 2017, 13–15.)

Eri kuitutyypeillä on myös erilaiset kemialliset ominaisuudet. Vaatteet joutuvat elinkaarensa aikana alttiiksi monelle eri kemikaalille. Tekstiilit altistuvat esimerkiksi ilmansaasteille, erilaisille tahroille ja hikoilulle. Tekstiilien pesu

tapahtuu usein emäksisillä aineilla ja mahdollinen valkaisu hapettavalla aineella. Jokaisella kuitutyypillä on myös omat esikäsittely-, värjäys- ja viimeistelytekniikat ja -olosuhteet. Kemikaalien vaikutus tekstiiliin riippuu käytetystä kemikaalista, sen vaikutusajasta ja vallitsevasta lämpötilasta. Käytetyt kemikaalit pureutuvat ensin tekstiilissä oleviin epäpuhtauksiin, minkä jälkeen ne vaikuttavat myös kuitupolymeeriin. Jos kemikaalin vaikutusaika on liian pitkä, tekstiilin kuitupolymeeri alkaa hajoamaan käytettyjen kemikaalien vaikutuksesta. Tällöin kuitu heikkenee ja esimerkiksi kuidun väri muuttuu. Jos kemikaali vaikuttaa voimakkaasti polymeeriin, polymeeri hajoaa. Kyseistä taktiikkaa hyödynnetään kemiallisessa käsittelyssä. (Räisänen ym. 2017, 17.)

Myös lämpötila vaikuttaa kuidun rakenteeseen: jos lämpötila nousee tarpeeksi korkealle, kuidun sisäiset sidokset alkavat heikentyä. Jos lämpötila nousee vieläkin tätä korkeammalle, kuidun sidokset katkeavat. Tämä näkyy kuidussa esimerkiksi kutistumisena tai kuidun hajoamisena. Myös valo, erityisesti auringonvalo, sekä sää saattavat vaikuttaa kuitujen rakenteeseen. UV-säteily on haitallista kuiduille aiheuttaen kuituun muutoksia ja jopa kuitupolymeerin katkeamisen. Polyesterillä valon- ja säänkesto ovat kuitenkin erinomaisia ja puuvillalla keskinkertaisia. (Räisänen ym. 2017, 18–19.)

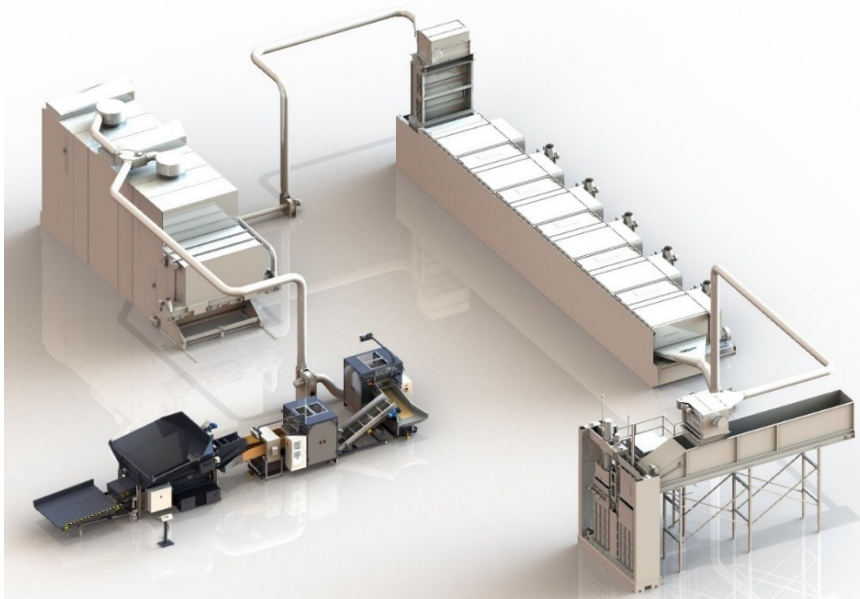
Tekstiilit voivat joutua alttiiksi myös erilaisille hyönteisille ja mikro-organismeille, esimerkiksi homeille tai bakteereille. Polyesterin kesto näitä vastaan on erittäin hyvä, kun puolestaan puuvillalla kestävyys on vain keskinkertainen. Tämä tarkoittaa sitä, että puuvilla on alttiimpi siihen kohdistuville homeille ja bakteereille, erityisesti kosteissa olosuhteissa. Tuhohyönteisiä puuvilla puolestaan kestävä erittäin hyvin. (Räisänen ym. 2017, 16, 20.)

Derycke (2024) arvioi, etteivät tekstiilien käyttö ja pesu huomattavasti vaikuttaisi tekstiilien kuitusisältöön muutoksiin mutta mekaanisella kuidunavausprosessilla puolestaan olisi suurikin merkitys kuitusuhteisiin. Esimerkkinä hän käyttää alun perin 67/33 % polyesteri-puuvilla (PES/CO) -vaatetta, jonka kuitusisällön hän arvelee olevan mekaanisen avauksen ja karstauksen jälkeen enää 90/10 % PES/CO.

3 Mekaaninen kuidunavaus

Aurasen (2018, 21-23) mukaan (ks. Kamppuri 2019b, 14) tekstiilien kierrätys alkaa yleensä lajittelulla, jossa tekstiilit lajitellaan erikseen esimerkiksi materiaalin, tekstiilin rakenteen ja värin perusteella. Mahdollisen lajittelun jälkeen tekstiilien matka jatkuu kohti niille soveltuvaa kierrätysmenetelmää (Palm ym. 2014, 140). Kamppurin ym. (2019a, 4) mukaan tekstiilejä voidaan kierrättää materiaalista riippuen eri tavoin. Tekstiilejä voidaan kierrättää mekaanisesti, kemiallisesti ja termisesti eli sulattamalla. Tässä opinnäytetyössä keskitytään vain mekaaniseen kierrätykseen.

Mekaaninen kierrätys keskittyy kuitutasolla kuidun kierrätykseen. Mekaanisen kuidunavausprosessin aikana avauslinjastolle johdettavasta tekstiilistä saadaan aikaan uusiokäyttöön soveltuvaa kuitua. (Kamppuri ym. 2019a, 4).



Kuva 1. Paimion kuidunavauslinjaston havainnekuva (Kuva: Rester Oy 2024).

Kuva 1 havainnollistaa Resterin Paimiossa sijaitsevaa mekaanista kuidunavauslinjastoa. Mekaanisessa kierrätysprosessissa poistotekstiilit leikellään tilkuiksi, jotka avataan avauslinjastolla kuiduksi (Kamppuri ym. 2019a, 4). Tavallisesti mekaanisessa prosessissa käytetään giljotiinileikkuria, joka

leikkaa tekstiilit ensin tilkuiksi. Tämän jälkeen materiaali kuljetetaan repimisvaiheeseen, jossa tilkut avataan kuiduksi. Tässä kohtaa avauksen seurauksena materiaalista poistuu esimerkiksi roskaa sekä avautumattomia tekstiilitilkkuja. Prosessin jokaisessa vaiheessa tekstiileistä poistetaan kovat osat (vetoketjut, napit ym.) esimerkiksi painovoimaa ja monenlaisia puhaltimia apuna käyttäen. Prosessi voidaan toistaa tarvittaessa kuiduille mutta jokainen toistokerta lyhentää kuitua entisestään. (Auranen 2018 Kamppurin ym. 2019b, 14. mukaan.)

Mekaanisen kuidunavausprosessin seurauksena syntynyt kuitu paalataan ja toimitetaan jatkojalostukseen uusioraaka-aineeksi. Kuiduista voidaan prosessin jälkeen valmistaa esimerkiksi lankaa tai kuitukangasta. Uusiokuitu soveltuu muun muassa akustiikkapaneelisiin, eristeeksi tai osaksi komposiittia. (Rester Oy 2021.) Kuva 2 havainnollistaa, miltä mekaanisesti avattu kuitu näyttää.



Kuva 2. Polyesterikuitu mekaanisen kuidunavauksen jälkeen (Kuva: Kirsi Jaakkola).

Duhouxin ym. (2021, 26) mukaan mekaaniseen kierrätykseen soveltuu käytännössä mikä tahansa tekstiili riippumatta käytetystä materiaalista tai kuidun rakenteesta. Todellisuudessa materiaalilla ja rakenteella on kuitenkin merkitystä kuidun avautumisen ja avauslinjaston kannalta. Tekstiilin materiaalin ja rakenteen vaikutus yhdessä määrittelevät avauslinjastoon tarvittavat koneet sekä komponentit ja näin ollen prosessin sisältämät vaiheet. Esimerkiksi neulottu vaate avautuu repimällä helpommin kuin kudottu vaate, koska kudottu kangas on rakenteeltaan tiukempaa. Usein siis kudotun kankaan avaaminen repimällä on vaikeampaa ja sen repiminen johtaa lyhyempiin kuituihin.

Mekaanisessa kuidunavausprosessissa ei ole mahdollista erotella sekoitteista eri kuitujakeita erikseen. Erottelun on tapahduttava aiemmassa vaiheessa eli jo tekstiilien lajittelussa. Sekoitteista, esimerkiksi tässä työssä tutkittavasta sekoitteesta 65/35 % polyesteri-puuvilla, ei siis ole mahdollista saada erikseen puuvilla- ja polyesterikuitupaaleja pelkästään mekaanisella kuidunavausprosessilla. (Rester Oy 2024.)

4 Tekstiilikuitujen tunnistustavat

Tässä luvussa tutustutaan tekstiilien eri tunnistusmenetelmiin ja tunnistuslaitteistojen toimintaperiaatteisiin. Lisäksi perehdytään menetelmien hyötyihin ja haasteisiin osana tekstiilien tunnistusta. Hu (2008, 51–52) kiteyttää, että varmimpia tuloksia saadaan, kun hyödynnetään useampaa eri tunnistustapaa yhdessä.

Tekstiilimateriaalien tunnistukseen käytetään erilaisia menetelmiä ja mittalaitteita. Koneellisessa tekstiilentunnistuksessa avainasemassa on mittalaitteen kyky mitata materiaalien kuitusuhteet nopeasti ilman näytteen valmistelua tai näytteeseen koskemista. Sensorin tulee lisäksi pystyä toimimaan prosessiolosuhteissa, ja sen on oltava tarpeeksi vakaa. Sensorit, joilla on kyseisiä ominaisuuksia, perustuvat usein spektroskopiaan. Sensoreille tulee luoda näytekirjasto, jossa on mallituloksia eri materiaaleista ja niiden kuitusisällöistä. Tähän kirjastoon voidaan verrata uusia tunnistettavien näytteiden tuloksia. (Kamppuri ym. 2019a, 6).

Yleisesti haastetta poistotekstiilien tunnistukseen tuovat sekoitteet sekä tekstiileissä käytettävät kemikaalit. Tekstiileissä käytetään esimerkiksi erilaisia viimeistelyaineita, esimerkiksi rypistymisenestoon tai veden hylkivyyteen liittyen, sekä suoja-aineita, esimerkiksi palonestoaineita. Näiden kemikaalien tunnistaminen vaatii usein useamman eri menetelmän käyttöä rinnatusten ja usein jopa analyysiä edeltävää esikäsitelyä. (Kamppuri ym. 2019a, 4, 21.)

Tekstiilien tunnistusmenetelmät voidaan jakaa niin kutsuttuihin klassisiin menetelmiin sekä koneellisiin menetelmiin. Klassisia menetelmiä ovat mikroskopointi, kemiallinen analyysi, polttokokeet sekä esimerkiksi värjäys- ja tiheystestit. (Hu 2008, 51–52.) Koneelliset, tunnistusmenetelmät voidaan jakaa sen mukaan, mihin tunnistusmenetelmä perustuu. Näitä ovat infrapunaspektroskopiaan, muihin spektroskooppisiin menetelmiin, tekoälyyn sekä erilaisiin tunnisteisiin perustuvat menetelmät. (Kamppuri ym. 2019a, 6–10). Tässä opinnäytetyössä hyperspektrikuvantaminen edustaa muihin spektroskooppisiin menetelmiin perustuvia menetelmiä.

4.1 Infrapunaspektroskopiaan perustuvat tunnistusmenetelmät

Infrapunaspektroskopiaan perustuvia menetelmiä ovat NIR- ja FTIR-analyysimenetelmät (Jaarinen ja Niiranen 2005, 90–96). Tässä aluvuossa perehdytään näihin menetelmiin, niiden ominaisuuksiin ja mahdollisuuksiin tekstiilien tunnistuksessa.

4.1.1 NIR-analyysimenetelmä

NIR (near infrared) -analyysimenetelmä tunnistaa orgaanisia yhdisteitä niiden infrapuna-absorption perusteella. Menetelmässä samassa vaiheessa infrapuna-alueen aallonpituuksien kanssa värähtelevät atomisidokset, jonka seurauksena tätä sidosenergiaa vastaava aallonpituusalue absorboituu. Eri materiaalien tunnistaminen on mahdollista mittaamalla näiden eri aallonpituusalueiden absorptioita. (Kamppuri ym. 2019a, 6.) Menetelmä perustuu siis molekyylien ja IR-alueen valon väliseen vuorovaikutukseen (Sinikallio, Salminen & Kämppi, 2021). Aallonpituudeltaan infrapunaspektri kattaa elektromagneettisen spektrin aallonpituudet välillä 780–40 000 nm. Tästä spektristä NIR-alue sijaitsee aallonpituusalueella 780–2 500 nm. Jokaisella näytteellä on kullekin ominainen IR-spektri, joka sisältää runsaasti näytteelle ominaisia yksityiskohtia. NIR-spektrien muodontunnistus siis mahdollistaa tunnistuskirjaston luomisen. Uusi näyte voidaan analysoida NIR-laitteistolla, saatua tulosta verrata kirjastoon ja näin tunnistaa vaateen sisältämät tekstiilimateriaalit ja niiden kuitusuhteet. (Jaarinen & Niiranen, 2005, 90–93.)

NIR-teknologiaa hyödynnetään tekstiilien tunnistamisessa. NIR-analyysilaitteiston etuna on, ettei se vaadi näytteiden valmistelua eikä kontaktia näytteeseen. NIR-tunnistusteknologiaa käytettäessä tulee siis huomioida kunkin vaateen tarkka kuitusisältö sekä kangasrakenteiden vaikutukset mitattavaan spektriin. (Kamppuri ym. 2019a, 7.)

NIR-teknologian hyödyntäminen on kuitenkin osittain haasteellista tekstiilien tunnistamisessa. Haastavaa tunnistamisesta tekee tekstiilimateriaalien

heterogeenisuus eli samankaltaisuus sekä se, että suuressa osassa vaatteita käytetään useampaa kuin yhtä materiaalia. (Kamppuri ym. 2019a, 7.)

Haasteena ovat erityisesti monikerroksiset tekstiilit, esimerkiksi raskaammat työvaatteet sekä tekstiilit, joissa tiettyä materiaalia on vain tietyssä vaateen osassa. Tällöin tunnistimeen ei välttämättä osu se vaateen kohta ollenkaan, jossa eri materiaali sijaitsee. (Heikkilä ym. 2019, 12.)

4.1.2 FTIR-analyysimenetelmä

FTIR (Fourier Transform Infrared) -analyysimenetelmä perustuu NIR-menetelmän tapaan infrapunaspektroskopiaan. Käytettävä aallonpituusalue FTIR-menetelmässä sijaitsee elektromagneettisessa spektrissä alueella 2 500–25 000 nm. FTIR:n aallonpituusalue sijaitsee siis aivan NIR-menetelmässä käytettävän aallonpituusalueen vieressä. FTIR-menetelmän aallonpituusalue sijaitsee keski-infrapuna-alueella, joten menetelmä soveltuu yksittäisten sidosten ja funktionaalisten ryhmien tunnistamiseen. Näin ollen sillä on mahdollista tunnistaa eri tekstiilimateriaalit toisistaan. (Kamppuri ym. 2019a, 8.)

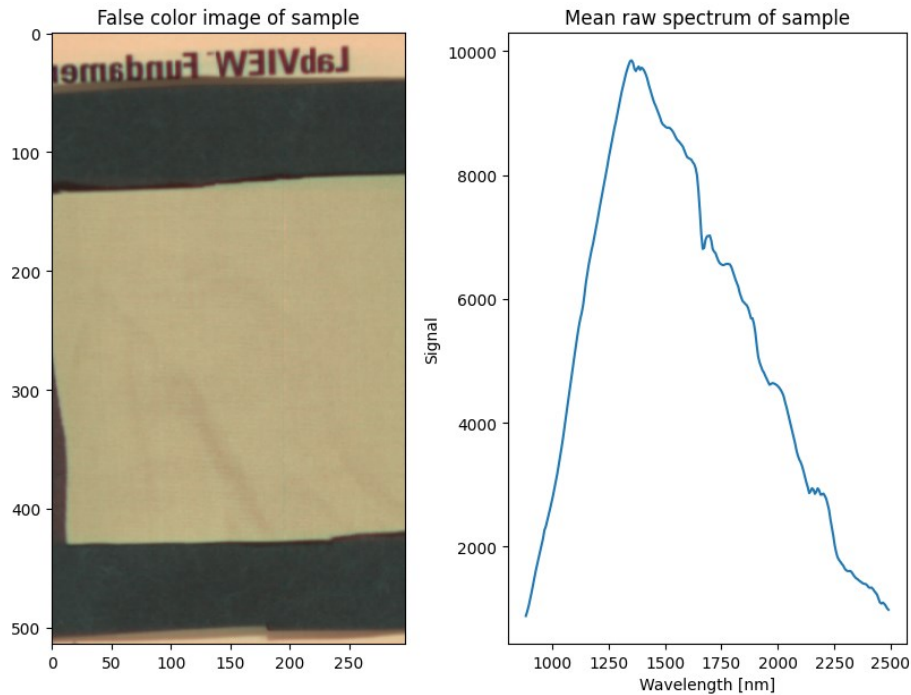
Tekstiilejä voidaan tunnistaa FTIR-analyysimenetelmällä niin, että IR-mittaus suoritetaan niin kutsutulla vaimennetulla kokonaisheijastustekniikalla. Tätä tekniikkaa kutsutaan ATR (Attenuated Total Reflection) -tekniikaksi. ATR-tekniikassa kiteen läpi suunnataan infrapunavalon säde, joka heijastuu näytteeseen ja näytteestä takaisin heijastuvat säteet kootaan ilmaisimelle. Takaisin heijastuvista säteistä syntyy interferenssikuvio, joka muutetaan Fourier-muunnoksella (Fourier Transformation) infrapunaspektriiksi. Menetelmää käytettäessä on oltava luotettava vertailukirjasto, johon näytteiden spektrejä verrataan. Vertailemalla mitattua ja kirjastoon luotua infrapunaspektrikirjastoa, tunnistettavana olevat tekstiilit voidaan tunnistaa. ATR-tekniikkaa käytettäessä tekstiilin tulee olla kosketuksissa tunnistuskiteeseen. (Kamppuri ym. 2019a, 8.)

FTIR-laitteistojen etuja ovat niiden nopeus ja tehokkuus mutta menetelmän haasteena on NIR-menetelmään verrattuna se, että laitteet vaativat kontaktin mitattavan näytteen kanssa. (Kamppuri ym. 2019a, 8.)

4.2 Hyperspektrikuvantaminen

Kamppuri ym. (2019a, 8–9) ovat tutkimusartikkelissaan käsitelleet muihin spektroskooppisiin menetelmiin kuuluvina menetelminä hyperspektrikuvantamisen sekä Raman-spektroskopian. Tutkimusartikkelissa on todettu, ettei Raman-spektroskopia ole soveltunut tekstiilien tunnistamiseen Telaketju-projektissa, joten tässä opinnäytetyössä käsitellään näistä menetelmistä vain hyperspektrikuvantamista.

Hyperspektrikuvantaminen perustuu kameran ja antureiden keräämään tietoon näytteestä (Advian, n.d.). Näytteeseen heijastetaan halogeenivaloa näytteen ollessa kameran alla kuvattavana. Skannauksen tuloksena syntyy kolmiulotteinen hyperspektrikuva eli ns. datakuutio. Tämä datakuutio sisältää kaksiulotteista spatiaalista dataa sekä spektriulottuvuuden, eli jokaisella pikselillä on oma spektrinsä. Useimmilla orgaanisilla materiaaleilla on yksilöllinen spektri, jonka avulla materiaaleja voidaan tunnistaa ja erottaa toisistaan. (Siikanen ym. 2021.) Verrattuna siis esimerkiksi tavalliseen kameraan, joka sisältää kolmea aaltokaistaa (vastaa noin punaista, sinistä ja vihreää) jokaisessa pikselissä, hyperspektrikuvantamisessa jokainen pikseli sisältää spektrin, jotka pitävät sisällään muutamia satoja aaltokaistoja (Sormunen 2024). Kuva 3 havainnollistaa, miltä hyperspektrikameran ottama kuva näyttää ja minkälainen on yhden näytteen raakaspektri. Kuvan vasemmassa reunassa on hyperspektrikameran ottama väärävärikuva ja oikeassa reunassa saman näytteen keskiarvoinen raakaspektri.



Kuva 3. Vasemmalla hyperspektrikameran väärävärikuva näytteestä ja oikealla näytteen raakaspektri (Kuva: Tuomas Sormunen).

Hyperspektrikuvantaminen on nopeaa, eikä mitattavia näytteitä tarvitse sen suuremmin valmistella. Lisäksi kuvantamisessa saadaan hyvin suuri määrä dataa, jota ei esimerkiksi paljaalla silmällä voi erottaa. (Mäkelä 2022.)

Hyperspektrikuvantamisen haasteena teollisuuskäytössä on sen rajoittuneisuus nopeuden, kompaktin koon sekä kustannustehokkuuden suhteen, samalla kun laitteistolta haluttaisiin riittäviä teknisiä tietoja (Blanch-Perez-del-Notario ym. 2019, 1).

Tekstiilien koneellisessa tunnistuksessa ja lajittelussa haasteellista on materiaalin tunnistuksen lisäksi tekstiilien värien tunnistus. SWIR (short-wave infrared) eli lyhytaaltoisella infrapuna-alueella tekstiilien värisävyjen vaikutus saatuihin spektreihin on alhainen, mutta esimerkiksi VNIR (visible-near infrared) eli näkyvällä lähi-infrapuna-alueella väreillä on suuri vaikutus piirtyviin spektreihin. Tutkimus on kuitenkin osoittanut, että tekstiilien materiaali- ja värilajittelu on mahdollista VNIR-laitteiston avulla.

Hyperspektrikuvantamislaitteistolle tulee muiden menetelmien tavoin luoda

vertailukirjasto, johon kuvannettavia spektrejä verrataan. (Blanch-Perez-del-Notario ym. 2019, 2, 9–11.)

4.3 Tekoäly

Tekoälyyn perustuvia menetelmiä ovat konenäkö sekä 2D- ja 3D-hahmontunnistusmenetelmät. Tässä alaluvussa perehdytään näihin menetelmiin osana tekstiilien tunnistusta.

4.3.1 Konenäkö

Konenäön avulla saadaan selville tutkittavien yhdisteiden spektrit, joita voidaan verrata näytekirjastosta löytyviin spektreihin. Tunnistaminen tapahtuu tutkimalla spektreistä absorptiopiikkejä, jotka kertovat, mitä funktionaalisia ryhmiä yhdiste sisältää. Funktionaalisia ryhmiä tulee puolestaan verrata materiaalien ominaisiin funktionaalsiin ryhmiin, minkä avulla voidaan eri tekstiilimateriaalit tunnistaa toisistaan. (Sell 2012, 7.) Puhelimen kasvojentunnistus sekä pullonpalautusautomaatit ovat arjesta tuttuja esimerkkejä konenäköön perustuvista menetelmistä (Kamppuri ym. 2019a, 10).

Konenäkölaitteisto koostuu optiikasta, kamerasta, kuvan kaappauskortista, käsittelyalgoritmeista sekä valaistuksesta. Laitteistosta kamera muodostaa kuvan, joka siirretään kaappauskortille. Käsittelyalgoritmit etsivät ja tekevät tunnistusta halutuista piirteistä. Valotuksella saadaan vakioitua olosuhteet, joissa kuvaus tapahtuu. Tekstiilentunnistusta voidaan tehdä pienemmillä käsikäyttöisillä laitteilla, joihin on integroitu kaikki tarvittavat komponentit tai vaihtoehtoisesti isommalla tietokonepohjaisella laitteistolla, joilla raskaampikin kuvankäsittely tai algoritmien kehittäminen onnistuu. (Kamppuri ym. 2019a, 10.)

Nykyiset konenäköön perustuvat laitteistot ovat oppivia, ja niitä voidaankin opettaa esimerkkien avulla. Laitteistoille on mahdollista opettaa esimerkiksi, miltä puuvillakuidun spektri näyttää, jolloin kuvantamisesta saatua spektriä voidaan verrata kirjaston spektreihin. Lisäksi konenäköön perustuvat laitteistot

ovat nopeita, joten tunnistaminen on suhteellisen reaaliaikaista. (Kamppuri ym. 2019a, 10.)

Kamppuri (2019a, 22) kiteyttää, että konenäkö osana tekstiilien lajittelua mahdollistaa tekstiilien lajittelun paitsi materiaalin niin myös värien sekä eri muotojen mukaan. Käsinlajittelu ja materiaalin tunnistaminen pesulapusta on hidasta ja voi olla harhaanjohtavaa. Konenäön hyödyntäminen mahdollistaisi myös materiaalin tunnistamisen tekstiileistä, joissa ei ole pesulappua. Konenäön hyödyntäminen tekstiilien lajittelussa nopeuttaa ja tehostaa prosessia.

4.3.2 2D- ja 3D-hahmontunnistus

Konenäkölaitteiden jaottelua voidaan tehdä myös tunnistustehtävien mukaan. Konenäkölaitteet voidaan jakaa Vision Sensor-, 2D Vision Systems- sekä 3D Laser Profilers -laitteisiin. (Kamppuri ym. 2019a, 10.)

Vision Sensor -laitteet pystyvät tunnistamaan lähinnä vain tuotteen läsnäolon sekä sille ominaisia peruspiirteitä. 2D Vision Systems -laitteilla voidaan puolestaan tunnistaa monipuolisesti tuotteen eri piirteitä sen läsnäolon havaitsemisen lisäksi. 2D-laitteilla on myös mahdollista esimerkiksi lukea koodeja sekä tuottaa paikkatietoa. (Kamppuri, 2019a, 10-11.)

3D-Laser Profilers -laitteilla on mahdollista tuottaa tuotteesta 3D-malli. Malli voidaan tuottaa yhden tai useamman laserin avulla. 3D-Laser Profilers -laitteilla ei ole mahdollista lukea esimerkiksi koodeja. (Kamppuri ym. 2019a, 11.)

Santaluodon (2012, 3) mukaan toiminta 3D-laserskannereissa perustuu valon kulkunopeuteen, vaihe-eroon tai kolmiomittaukseen. Kamera ja säteilylähde ovat 3D-skannereiden pääkomponentteja. Pääkomponenttien lisäksi on kuitenkin yleensä tarvetta myös tietokoneelle sekä ohjelmistolle. Skannereiden tuottama data mitattavasta tuotteesta voi olla joko koordinaattipisteitä, etäisyysmittoja tai niin sanottuja pistepilviä. Skannerit voidaan jakaa koskettaviin (contact) sekä ei-koskettaviin (no-contact) 3D-skannereihin, ja ei-koskettavat skannerit voidaan vielä jakaa aktiivisiin ja passiivisiin skannereihin.

Santaluodon (2012, 3) mukaan passiiviset skannerit vain havaitsevat niitä ympäröivää säteilyä. Skannerilla itsessään ei ole mahdollista lähettää valoa tai muuta säteilyä. Usein nämä skannerit hyödyntävät näkyvää valoa, mutta ne voivat hyödyntää myös esimerkiksi infrapunasäteilyä. Passiiviset skannerit ovat yksinkertaisimpia 3D-skannereita. Passiivisen skannerin haasteena on sen datan käsittelyn vaatima aika. Aktiiviset skannerit voivat puolestaan lähettää säteilyä, esimerkiksi valo- tai röntgensäteilyä tai vaihtoehtoisesti ultraääntä.

3D-skanneria, joka perustuu valon kulkunopeuteen, kutsutaan useimmiten keilaimeksi. Nimi perustuu laitteen toimintaperiaatteeseen: skanneri mittaa yhden pisteen etäisyyttä kamerasta kerrallaan. Skanneri pystyy kuitenkin mittaamaan tuhansia pisteitä sekunnin aikana. (Santaluoto 2012, 3.)

Menetelmää, jossa 3D-laserskanneri lähettää laserpisteen tai -viivan skannattavaan kappaleeseen, kutsutaan kolmiomittaukseksi. Kamera havaitsee takaisin heijastuvan laserin, joka osuu kameran näkökentän eri kohtiin. Useimmiten kolmiomittaukseen perustuvat 3D-skannerit lähettävät laserviivan. (Santaluoto 2012, 3–4.)

4.4 Erillisiin tunnisteesiin perustuvat menetelmät

4.4.1 RFID

Tekniikkaa, joka toimii radiotaajuuksilla, kutsutaan RFID (Radio Frequency Identification) -tekniikaksi. RFID-tunnisteeseen tallennetaan tietoa, jota voidaan lukea langattomasti RFID-lukijalla. Lukijan toiminta perustuu kykyyn lukea radioaaltoja, joita RFID-tunniste lähettää. RFID-tunnisteilla voidaan esimerkiksi tunnistaa tuotteita sekä yksilöidä niitä. (RFIDLab n.d.)

RFID-tunnisteen etuina ovat helppokäyttöisyys, seurattavuus sekä se, ettei luettavaan tunnisteeseen tarvitse saada fyysistä kontaktia. RFID-tunnisteesiin voidaan tallentaa tietoa, minkä jälkeen tunniste voidaan asettaa kiinni esimerkiksi vaatteeseen. RFID-tunnisteen sisältämää tietoa voidaan muuttaa tai esimerkiksi lisätä sen elinkaaren aikana. RFID-tunniste ei vaadi lukijan kanssa

fyysistä kontaktia vaan tunnisteiden sisältämä tieto voidaan lukea etäältä. Etäisyys, kuten myös tunnistusnopeus, riippuu käytetystä RFID-tunnisteesta. (RFIDLab n.d.)

RFID-tunnisteita voidaan käyttää osana tekstiilien tunnistusta. RFID-tunnisteita voidaan kiinnittää tekstiileihin, jolloin tunnistukseen voidaan kirjata tietoja kyseessä olevasta vaatteesta. RFID:hen voidaan kirjata esimerkiksi vaatteen pesukertojen määrät sekä tietoja vaatteen elinkaaresta. RFID-tunnistukseen on mahdollista myös merkitä tarkempia tietoja tekstiileistä, kuten materiaalisuhdanteet tai tekstiilin väri. Tällöin esimerkiksi poistotekstiilien lajitteluprosessiin on mahdollista lisätä automaattinen lajittelu, jossa RFID-lukija lukee tekstiilien sisältämät RFID-tunnisteet, ja automaattisesti lajittelee niiden sisältämän tiedon perusteella tekstiilit oikeaan paikkaan. (Fentec n.d.)

4.4.2 Viivakoodit

Tekstiileihin on mahdollista kiinnittää viivakoodi, jonka avulla niitä on mahdollista tunnistaa. Viivakoodin toimintaperiaate vastaa RFID:n toimintaperiaatetta. (Kamppuri ym. 2019a, 13.)

Viivakoodien käyttö on usein edullisempaa kuin RFID-tunnisteiden, koska viivakoodi painetaan alustalle eikä sen tarvitse sisältää RFID:lle tyypillistä mikrosirua tai antennia. Viivakoodeja on erilaisia: esimerkiksi 2D-viivakoodit (ns. perinteiset viivakoodit) sekä 3D-viivakoodit (esimerkiksi QR-koodit). RFID-tunnistukseen verrattuna viivakoodissa on kuitenkin muutamia haasteita:

- viivakoodi täytyy lukea fyysisesti vaatteesta eli lukijan ja koodin tulee olla näköetäisyydellä toisistaan
- 2D-viivakoodiin tallennettavan tiedon määrä on rajallista, etenkin jos tunniste ei ole kovin pitkä
- viivakoodin lukeminen saattaa hankaloitua tai olla jopa mahdotonta, jos viivakoodi on kulunut tai likainen. (Kamppuri ym. 2019a, 13.)

4.5 Muut tunnistusmenetelmät

Tässä alaluvussa perehdytään niin kutsuttuihin klassisiin tekstiilien tunnistustapoihin, joita ovat mikroskopointi, kemiallinen analyysi, polttokoe sekä värjäys- ja tiheystestit.

4.5.1 Mikroskopointi

Hun (2008, 51–52) mukaan optiset menetelmät ovat yhtiä yksinkertaisimpia menetelmiä tekstiilien tunnistuksessa. Mikroskopoinnilla voidaan visuaalisesti tunnistaa kuituja toisistaan esimerkiksi tutkimalla niille ominaisia muotoja mikroskoopin avulla. Mikroskopointi soveltuu erityisesti selluloosa- sekä eläinkuitujen tunnistamiseen. Boncamper (2011b, 78, 307) kiteyttää, että tarkasteltaessa esimerkiksi puuvillakuitua mikroskoopilla, kuitu voidaan tunnistaa muista selluloosakuiduista puuvillalle ominaisen kierteisen rakenteen avulla. Polyesterikuitua on puolestaan haastava erottaa muista synteettisistä kuiduista mikroskoopin avulla.

Hu (2008, 52) tiivistää, että mikroskopointi on hyvä menetelmä tukemaan liuotustesti- sekä infrapunaspektroskopian tuloksia, mutta synteettisten kuitujen tunnistaminen toisistaan mikroskoopilla on haasteellista. Esimerkiksi polyesteri muistuttaa ulkonäöltään muita synteettisiä kuituja (Boncamper 2011b, 307).

4.5.2 Kemiallinen analyysi

Kuituja voidaan tunnistaa toisistaan liuotuskokeilla. Eri materiaalit liukenevat eri liuottimiin, jolloin tekstiilimateriaaleja on mahdollista tunnistaa. Liuotuksessa tekstiilikuituihin vaikuttavat myös käytetyn liuoksen väkevyys, lämpötila sekä liuotusaika. (Boncamper 2011b, 79.) SFS-EN ISO 1833-1:2020 -standardi määrittää erilaisten kuituseosten kvalitatiivisen kemiallisen analyysin yhdessä muiden ISO 1833 -standardien osien kanssa (SFS-EN ISO 1833-1:2020, 8).

ISO 1833 -standardin mukainen kemiallinen kuitujen erottelu perustuu usein yksittäisen komponentin liukenemiseen eli esimerkiksi seoksista lähdetään liuottamaan seoksen toista osaa pois. Yleensä kuitu, jota seoksessa on enemmän, on kannattavampaa liuottaa pois, jolloin jäljelle jää pienempää osuutta edustava jäännös. Kun haluttu komponentti on liennut, liukenematon osa kuivataan ja punnitaan ja liuenneen komponentin osuus lasketaan syntyneestä massahäviöstä. Analyysit tehdään kuidun kuivamassan perusteella, koska kaikki kuidut sisältävät kullekin kuidulle ominaisen määrän vettä ja lisäksi kuituihin vaikuttaa vallitseva ilmastokesto. (SFS-EN ISO 1833-1:2020, 6.) Kuivamassoja analysoitaessa mittaukset ovat yhdenvertaisia.

Ennen analyysiä tekstiileistä poistetaan niin kutsutut ei-kuitupitoiset aineet esikäsitellyssä. Näitä voivat olla esimerkiksi erilaiset rasvat sekä vahat. Värjättyjen kuitujen värin katsotaan kuuluvaksi kuituun, joten sitä ei poisteta. (SFS-EN ISO 1833:1:2020, 6.) Liuutusprosessi alkaa niin sanotun karsinnan kautta. Tässä kokeillaan ensin niin kutsuttuja ryhmäliuottimia kuitujen liukenemiseen. Jos kuitu liukenee ryhmäliuottimeen, voidaan liuotusta jatkaa tämän ryhmän sisäisillä liuottimilla. Liuotusta jatketaan niin kutsutuilla analyysiliuottimilla, kunnes kuitu liukenee. Kuidun materiaali tunnistetaan sen mukaan, mihin liuottimeen kuitu liukenee. (Boncamper 2011b, 79.)

Kemiallinen analyysi sopii sekä selluloosapohjaisille kuiduille, kuten puuvillalle, että synteettisille kuiduille, kuten polyesterille (Palm ym. 2014, 141). Polyesterin tunnistaakin muista synteettisistä kuiduista parhaiten liuotuskokeella (Boncamper 2011b, 307).

Haasteellista prosessin kannalta ovat erilaiset kuituja yhteensitovat aineet sekä erikoisominaisuuksia lisäävät aineet, esimerkiksi rypistymisenkestoon liittyen. Nämä aineet tulee poistaa ennen analysointia, koska ne voivat aiheuttaa analyysiin virhettä. (SFS-EN ISO 1833-1:2020, 6.)

4.5.3 Polttokoe

Eri materiaaleja voidaan myös tunnistaa niin kutsutulla polttokokeella, jossa materiaalitilkkaa poltetaan varovasti paloturvallisissa olosuhteissa niin, että tilkkua kannatellaan pinseteillä. (Hu 2008, 53–57.) Materiaaleja voidaan tunnistaa toisistaan seuraamalla kuidun palamista sekä tutkimalla palamisen aiheuttamia seurauksia. Polton aikana kuidusta seurataan palonopeutta, syttymisherkkyttä sekä palamisesta aiheutuvia hajua- sekä savuhavaintoja. Polton jälkeen kuidusta tutkitaan syntyneitä palojäännöksiä sekä mahdollista jälkihehkuntaa. Polttokokeiden tuloksia voi väärentää esimerkiksi mahdollisesti käytetyt viimeistelyaineet. (Boncamper 2011b, 76).

Puuvilla syttyy helposti ja palaa nopeasti. Palaminen muistuttaa paperin palamista, ja hajua on samanlainen kuin poltettaessa paperia. Puuvillan palamisesta syntyy tuhkaa. (Boncamper 2011b, 111.) Polyesteri puolestaan sulaa palaessaan ja palojäännöksenä syntyy kova, hehkuva kokkare poltettuun reunaan. Polyesteri muodostaa palaessaan nokea. (Boncamper 2011b, 77.)

Polttokokeella ei kuitenkaan välttämättä selviä kuidun tarkka materiaali. Varmin tapa selvittää kuidun materiaali on toteuttaa liuotuskoe sekä mikroskopointi yhdessä polttokokeen kanssa. (Hu 2008, 53.)

4.5.4 Värjäystestit

Tekstiilien värjäyстesteillä voidaan osoittaa kuiturakenteiden muutoksia, joita syntyy tekstiilin siirtyessä prosessista toiseen. Jos tekstiilin kuiturakenne muuttuu prosessien aikana, muutos näkyy värisävyn muutoksena erien välillä. Värjäyksen jälkeen näytteet kuivataan ja niitä verrataan aiemmin tunnistettuun näytteeseen. Värjäyksellä selviää, onko kuitu hydrofiilinen vai -fobinen. Hydrofobisia kuituja on haasteellisempaa värjätä kuin hydrofiilisiä. (Hu 2008, 53.)

Hu (2008, 53) kiteyttää, että värjäyстestien käyttö osana tekstiilien tunnistusta edellyttää, että kuidut ovat valkoisia tai sitä, että kuiduista on mahdollista

poistaa niissä oleva väri. Haasteellisia prosessissa ovat läpivärjätyt tekstiilit sekä tekstiileissä käytetyt erilaiset kemialliset viimeistelyaineet.

4.5.5 Tiheystestit

Tekstiilejä voidaan tunnistaa myös tiheystestien avulla. Tiheystesteissä tutkitaan, kelluvatko vai uppoavatko kuidut nesteeseen. Nestepylväälle sekä nesteen lämpötilalle on asetettu tietyt määreet, joita mittauksessa tulee noudattaa. (Hu 2008, 52–53.)

Haasteellisia tutkittavia kuituja ovat huokoiset kuidut sekä sekoitteet. Kummatkin edellä mainituista vääristävät saatuja tiheystuloksia eivätkä näin ollen sovellu tiheystesteihin tunnistettavaksi. (Hu 2008, 52–53.)

5 Tutkimuksen toteutus

Tässä opinnäytetyössä tutkimusmenetelmänä käytettiin empiiristä tutkimusta. Valitsin kyseisen menetelmän, koska aiheesta on tehty niukasti käytännön tutkimusta. Työ etenee laajasta taustatietokatsauksesta kohti toteutettua empiiristä tutkimusta ja tutkimuksesta saatuja tuloksia.

Työn tavoitteena oli selvittää, miten identtiset tekstiilit kuluvat elinkaarensa aikana sekä miten mekaaninen kuidunavaus vaikuttaa tekstiilien kuitusisältöihin.

Kirjallisuutta tekstiilikuiduista, niiden ominaisuuksista sekä konenäön menetelmistä on saatavilla runsaasti. Tietoa tekstiilikuitujen kulumisesta tekstiilien elinkaaren aikana on kuitenkin saatavilla melko niukasti. Myöskään mekaanisen kuidunavausprosessin jälkeisistä kuitusisällöistä ei ole saatavilla kovinkaan paljoa tietoa. Edellä mainittujen puutteellisten tietojen vuoksi päädyin selvittämään kulumaa fyysisen, eli empiirisen tutkimuksen kautta, jossa selvitetään hyperspektrikuvantamisella sekä kemiallisella analyysillä (liotuksella), miten identtiset tekstiilit kuluvat elinkaarensa aikana.

Tutkimus aloitettiin näyte-erien keräämisellä. Näyte-eriä kerättiin kaksi:

- Ensimmäinen (pienempi) erä sisältää 30 vaatekappaletta, joista jokaisen vaateen pesukertojen määrä on tiedossa.
- Toinen (suurempi) erä on suuruudeltaan 319 kg, jotka ovat käyneet tuntemattoman määrän pesuja.

Näyte-erien koot määräytyivät menetelmien tarpeiden mukaan: Pienemmän erän vaatteet kuvannettiin hyperspektrisesti, joten 30:n kappaleen erä oli tähän sopivan suuri. Näin mittauksista saatiin suhteellisen laajoja ilman, että kuvantaminen ja spektrien käsittely kestäisi kovin pitkään. Suuremmassa erässä koko määräytyi sen mukaan, että avatuista tekstiileistä saatiin tehtyä kuitupaali. Kuitupaali mahdollisti sen, että avattua kuitua oli tarpeeksi edustamaan isompaa näyteotantaa.

Kummankin näyte-erän vaatteet olivat koostumuksiltaan identtisiä: tietyn asiakkaan toimittamaa valkoista työvaatetta, joiden alkuperäinen materiaalisuhde on 65 % polyesteriä ja 35 % puuvillaa. Tekstiilien tarkkaa käyttöastetta ei tiedetty.

Kaikkien tutkittavien tekstiilien pesutausta oli samanlainen. Tekstiilit ovat käyneet matalalämpöpesuissa (pesulämpötila 40–55 °C), joten tekstiilien desinfektio on taattu pesukemikaaleilla. Näyte-erän työvaatteissa on käytetty myös desinfiioivaa valkaisua. Käytetty pesuohjelma sisältää 1–2 pesuvaihetta, joita seuraa 1–3 huuhteluvaihetta. Huuhteluvaiheessa on varmistettu, että käytetyt pesu- ja valkaisuaineet huuhtoutuvat pois tekstiileistä. Käytetyt pesuaineet ovat olleet nestemäisiä tiivistepesuaineita, jotka on annosteltu automaattisesti. Pesun jälkeen tekstiilit on kuivattu pääsääntöisesti rumpukuivauksella, jossa loppulämpötila on ollut 55–90 °C:een välillä. Kuivausaika on ollut keskimäärin noin 30 minuuttia. (Sisäinen tiedonanto 5.3.2024.)

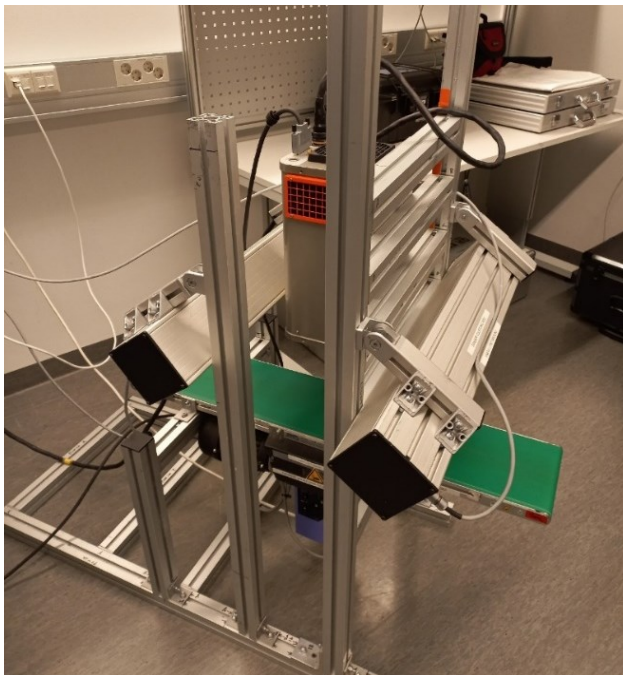
Kulumaa tutkittiin kahdella menetelmällä: hyperspektrikuvantamisella sekä kemiallisella analyysillä eli liuotuksella. Pienemmän erän tekstiilien kulumaa tutkittiin ensin konenäön avulla kuvantamalla ne hyperspektrikameran avulla (ks. luku 4.2.) Tämän jälkeen erästä valittiin viisi koko erää edustavaa näytettä, joiden kuitusisältö analysoitiin kemiallisesti. Suurempi näyte-erä puolestaan ajettiin Resterin tekstiilinkäsittelylaitoksella kuiduksi, ja valmiista kuidusta mitattiin kemiallisesti lopulliset materiaalisällöt. Isommasta näyte-erästä otettiin myös näyte giljotiinileikkuun jälkeen, joka edustaa lähtötilannetta ennen avausprosessia.

5.1 Hyperspektrinen kuvantaminen

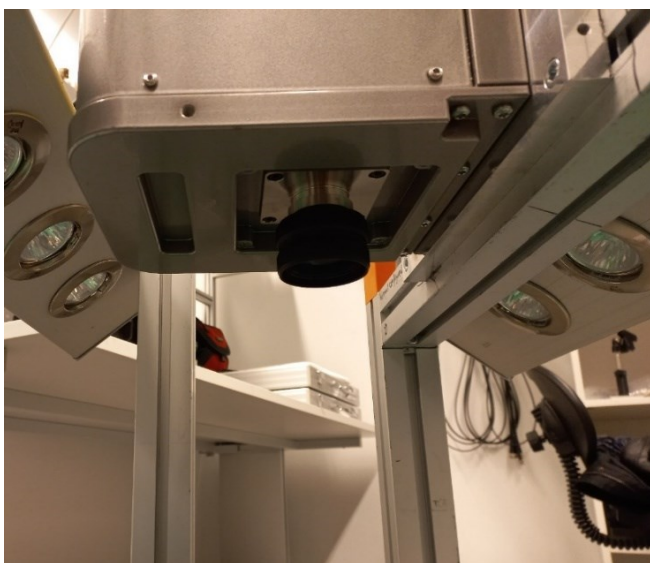
Ennen kuvantamista tekstiilinäytteet valmisteltiin. Jokaisesta pienemmän erän vaatteesta otettiin kaksi 10x10 cm näytetilkkua. Näytteet otettiin vaateen vähiten kuluneesta osasta, jolloin tulokset edustavat yleisesti käytön ja pesujen aiheuttamaa kuitujen kulumaa eikä pelkästään tietyn, mahdollisesti paljon

kuluvan kohdan, kulumaa. Näytetilkkujen koko määräytyi hyperspektrikameran speksien mukaan. Koska yhdestä vaatteesta ei olisi mahdollista ottaa kaikkia tutkittavia näytteitä niin, että ne olisivat edustavia, käytettiin näytteiden keruussa useita, täysin identtisiä, työvaatteita. Lisäksi usean eri pesukerran omaavan vaateen keruulla saatiin kattava joukko eri pesukertoja edustavia näytteitä. Taulukkoon 2 (ks. liite 1) on koottu tiedot, jotka näytteistä kerättiin ennen mittausta. Valmistelun lopuksi näytteet merkittiin ja pakattiin yksitellen, minkä jälkeen ne lähetettiin kuvannettavaksi VTT:lle Kuopion laboratorioon. Mittaukset ja analyysit toteutti Tuomas Sormunen VTT:ltä ja mittaukset suoritettiin Specimin SpecCam short-wavelength infrared hyperspektrikameralla. Tällä laitteistolla kuvantaminen tapahtuu aallonpituusalueella 884–2491 nm. (Sormunen ym. 2019, 2)

Mittauksessa jokainen näyte asetettiin yksitellen mustaa taustaa vasten kameran alla kulkevalle liukuhihnalle (ks. kuva 4), jossa näytteet kulkivat yksi kerrallaan kameran alle kuvannettavaksi. Tätä tekniikkaa kutsutaan ”push-broom”- tai ”line-scanning” -tekniikaksi (Siikanen ym. 2021). Musta tausta vähentää muiden heijastusten vaikutusta kuvaukseen. Onnistunut mittaus vaatii tehokkaan jatkuvasektrisen valaistuksen, joten kameran kummallekin puolelle oli sijoitettuna halogeenilamppuja (ks. kuva 5), joiden valonsäteet osoittavat mitattavaan näytteeseen.



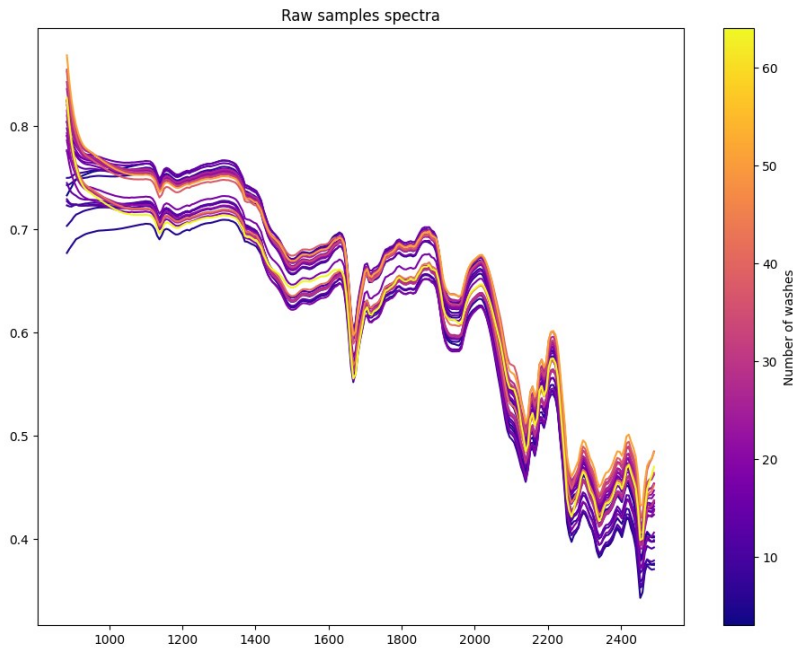
Kuva 4. Näyte laitetaan kuvassa näkyvälle vihreälle liukuhihnalle mustaa taustaa vasten (Kuva: Tuomas Sormunen).



Kuva 5. Tarkempi kuva kamerasta. Sivulla näkyvät halogeenilamput, joita on yhteensä kuusi kappaletta (Kuva: Tuomas Sormunen).

Tulosten saaminen hyperspektrikuvantamisesta vaatii analysointia ja tietojen käsittelyä. Näytteiden kuvantamisesta saadaan näytteiden raakaspektrit, jotka näkyvät kuvassa 6. Kuvassa näkyvät yksitellen jokaisen näytteen spektri.

Spektrit on värikoodattu siten, että mitä vaaleamman värinen piirretty spektri on väriltään, sitä useammin kyseistä tekstiiliä on pesty. Kuvaukset toteutettiin aallonpituusalueella 884-2491 nm (x-akseli). Y-akselilla on reflektanssi eli heijastuskyky.



Kuva 6. Hyperspektrikuvantamisen raakaspektrit (Kuva: Tuomas Sormunen).

Raakadataa lähdetään muuttamaan heijastusarvoiksi kahdella kalibroinnilla:

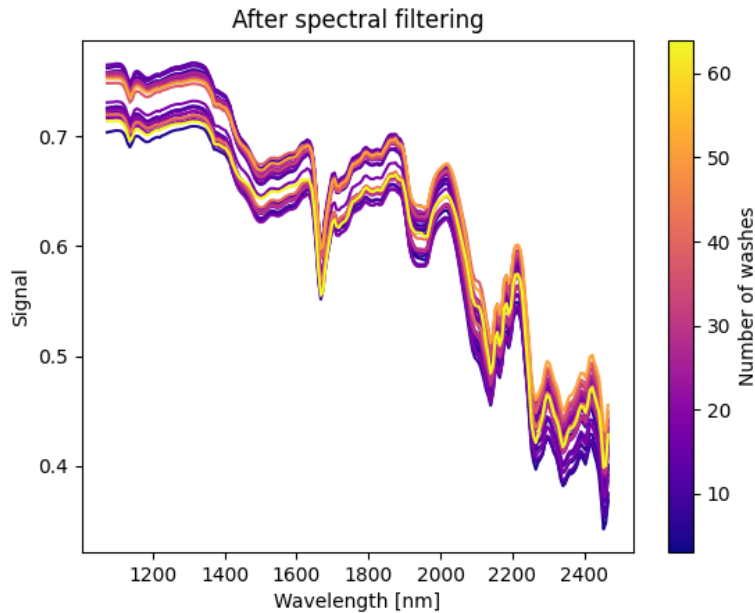
1. Tumma referenssi: satunnainen kohina kameran tunnistimessa (suljin suljettuna)
2. Valkoinen referenssi: jotta löydetään käytetyn valaisimen spektri, mitataan ns. "täydellisesti heijastava" materiaali

Muunnos tapahtuu seuraavalla kaavalla:

$$\frac{\text{Signaali}_{\text{näyte}} - \text{Signaali}_{\text{tumma}}}{\text{Signaali}_{\text{valkoinen}} - \text{Signaali}_{\text{tumma}}}$$

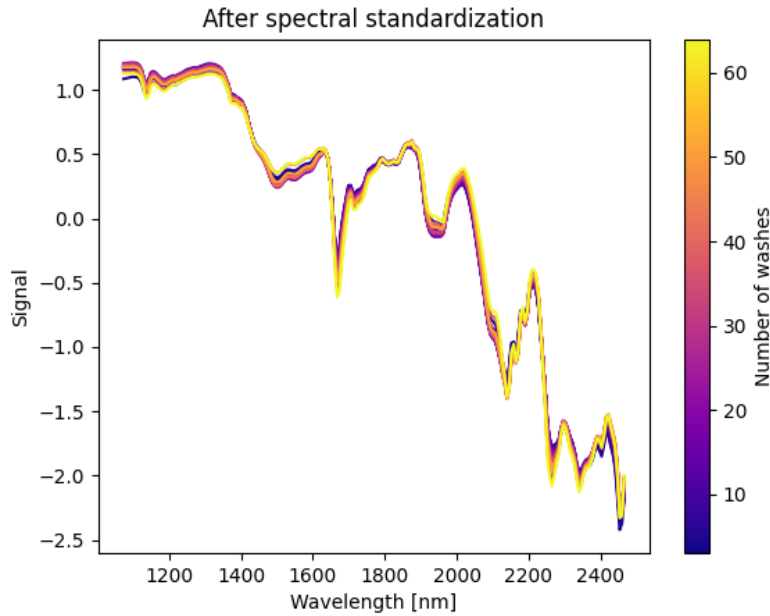
Spektreille tulee tehdä myös esikäsittelyä. Esikäsittelyssä usein poistetaan esimerkiksi hyperspektrianturin sisältämiä virheitä, jotka näkyvät spektreissä

usein nousevina tai laskevina häntinä. (Sormunen 2024.) Kuvassa 7 on havainnollistaa spektrit, joista on suodatettu pois nämä hännät.



Kuva 7. Spektrit suodatuksen jälkeen (Kuva: Tuomas Sormunen).

Näytteen perusheijastustaso saattaa vaihdella esimerkiksi erilaisten valonsirontavaikutusten seurauksena tai tekstiileissä voi olla tekstuurieroja. Nämä ominaisuudet näkyvät kuvaajissa esimerkiksi eritasoisuutena. Tämän voi havaita esimerkiksi yllä olevan kuvan (kuva 7) vasemmasta reunasta, jossa spektrit ovat irrallaan toisistaan. Edellä mainitut asiat aiheuttavat analyysissä ongelmia, minkä takia jokainen spektri standardoidaan käyttämällä ns. standard normal variate -menetelmää, eli kustakin spektristä vähennetään sen keskiarvo ja saatu tulos jaetaan keskihajonnalla. Alla olevassa kuvassa (kuva 8) on esitettynä spektrit, jotka ovat standardoitu em. tavalla. Tällä menetelmällä korostetaan näytteiden piirteitä kuvausasetelman piirteiden sijasta. Kuvasta havaittavat erot ovat tällöin peräisin näytteistä, ei kuvausasetelmasta. (Sormunen 2024.)



Kuva 8. Spektrisen standardoinnin jälkeen spektrit näyttävät tältä (Kuva: Tuomas Sormunen).

Tavoitteena analyysissä oli ennustaa jokaiselle näytteelle pesukertojen määrää spektritiedon perusteella. Jotta regressio-algoritmi osaa tunnistaa ja yhdistää tiettyjä spektriominaisuuksia, sitä tulee opettaa. Kustakin näytteestä tulee syöttää näytteen piirteet (keskimääräinen spektri) sekä spektristä haluttu tieto, tässä tapauksessa pesujen määrät, algoritmiin. Opetuksen jälkeen algoritmi osaa yhdistää spektrien tiettyjä piirteitä pesujen lukumäärään, joten kun kuvannetaan täysin uutta näytettä, voidaan algoritmin avulla ennustaa pesujen lukumäärää.

Algoritmin hyvyden arviointiin voidaan käyttää mm. kahta eri menetelmää:

1. Ristiinvalidointijärjestelmällä, jossa algoritmia koulutetaan jättämällä yksi näyte yksitellen testikappaleeksi ja kouluttamalla lopuilla näytteillä tai
2. Opetetaan algoritmia kaikilla näytteillä, ja testataan mallia näytteiden kaksoiskappaleilla.

Tässä tutkimuksessa algoritmia arvioitiin jälkimmäisellä tavalla eli jokaisella näytteellä (30 kappaletta), jonka jälkeen algoritmia testattiin näytteiden duplikaateilla. (Sormunen, T. 2024.) Algoritmin tulokset käsitellään luvussa 6.

Hyperspektrikuvantamisen jälkeen VTT valitsi pienemmästä erästä viisi koko kyseistä erää edustavaa näytettä. Valitut näytteet lähetettiin vielä kemialliseen kuituanalyysiin. Analyysiin valikoitiin näytteet 001, 009, 021, 028 sekä 030. Näytteiden tarkemmat tiedot löytyvät taulukosta 2 (ks. liite 1).

5.2 Mekaaninen kuidunavaus

Isompi näyte-erä ajettiin Resterin kuidunavauslinjastolla kuiduksi, jossa ajo tapahtui luvussa 3 kuvatulla tavalla. Näytteitä kemialliseen analyysiin kerättiin kaksi:

1. Tuppo näytetilkkuja, joissa kuitu on leikeltä giljotiinileikkurilla (kuva 9) sekä
2. Tuppo mekaanisesta kuidunavausprosessissa avattua kuitua (kuva 10).

Tällöin ensimmäinen näyte edustaa kuitusuhdetta ennen mekaanista kuidunavausta ja toinen näyte edustaa kuitusuhdetta mekaanisen avauksen jälkeen.



Kuva 9. Kuitu giljotiinileikkuun jälkeen (Kuva: Teri Niekka).



Kuva 10. Mekaanisessa kuidunavausprosessissa avattua kuitua (Kuva: Teri Niekka).

5.3 Kemiallinen analyysi

Kemialliseen analyysiin lähetettiin seuraavat tekstiilinäytteet: näyte 001, näyte 009, näyte 021, näyte 028, näyte 030. Em. näytteiden lisäksi analyysiin lähetettiin näytetupot, jotka edustivat ison erän tilannetta ennen ja jälkeen kuidunavauksen. Kemiallisessa analyysissä analysoitiin siis yhteensä seitsemän eri näytettä.

Kaikki näytteet toimitettiin samalla kerralla kemialliseen analyysiin. Analyysi toteutettiin standardien SFS-EN ISO 1833-1:2020 sekä SFS-EN ISO 1833-11:2017 mukaisesti SGS:n laboratoriossa Turkissa. SFS-EN ISO 1833-1:2020 -standardissa on määritetty kemiallisen analyysin yleiset testausperiaatteet ja SFS-EN ISO 1833-11:2017 -standardi puolestaan keskittyy analyysimenetelmiin, joissa käytetään rikkihappoa tiettyjen selluloosakuitujen

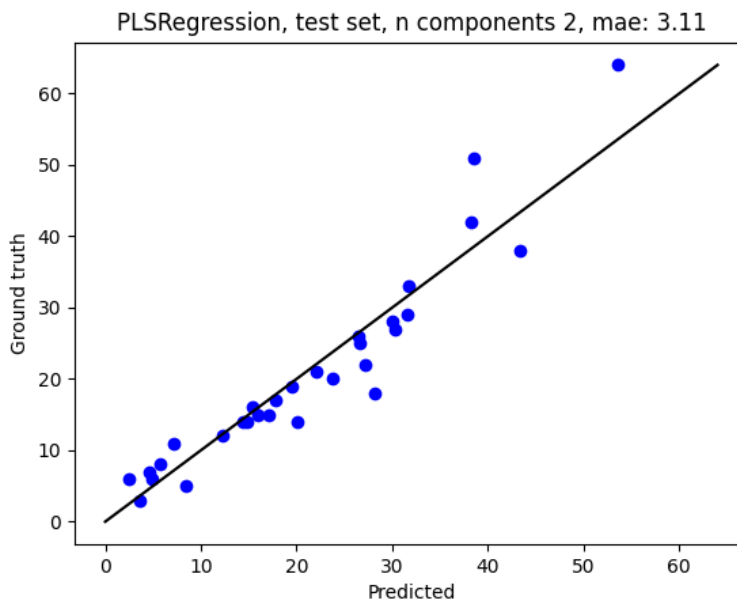
seosten, joissa toisena osa tiettyä muuta kuitua, kanssa. Näytteet olivat näiden standardien mukaisessa liuotuksessa yhteensä viisi päivää. SGS toteutti mittaukset sekä raportoinnin mittausten tuloksista. Luvussa 6 käsitellään tarkemmin kemiallisen analyysin tuloksia.

6 Mittaustulokset

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää vaatteeseen sen elinkaaren aikana mahdollisesti syntyneitä kuitusisällön muutoksia sekä sitä, vaikuttaako mekaaninen kuidunavaus materiaalin kuitusisältöön. Tässä luvussa perehdytään tutkimuksen tuloksiin ja tehdään tuloksista yhteenveto.

6.1 Hyperspektrikuvantamisen tulokset

Hyperspektrikuvantamisdatan analyysiin käytetty algoritmi on PLS (partial least squares, suom. osittaisen pienemmän neliösumman regressio) (Sormunen, T. 2024). Kuvassa 11 on esitettyinä algoritmin tulokset. Y-akselilla on todelliset pesukertojen määrät ja x-akselilla on algoritmin ”ennustamat” pesukerrat. Mitä lähempänä suoraa piste on, sitä tarkemmin algoritmi on osannut ennustaa pesukertojen määrää näytteissä. Kuvasta havaitaan, että algoritmi on oppinut löytämään sille opetetun tiedon, eli pesukertojen määrän, näytteistä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe oli 3,11, mikä tarkoittaa, että malli ennustaa pesujen määrän keskimäärin noin ± 3 :n pesukerran tarkkuudella. Tulos viittaa algoritmin hyvään suorituskykyyn.



Kuva 11. Algoritmin tulokset (Kuva: Tuomas Sormunen).

Yhtenä tutkimusnäkökulmana oli myös havainnoida, pystyykö konenäön avulla havaitsemaan pieniä syntyneitä kuitusuhde-eroja, jotka ovat käytön ja pesujen seurausta. Tehty tutkimus osoittaa, että konenäkölaitteistolla on mahdollista tunnistaa syntyneitä pieniä kuitusuhde-eroja tekstiileissä.

6.2 Kemiällisen analyysin tulokset

Taulukkoon 1 on koottu kemiällisen analyysin tulokset. Analyysin mittaustarkkuus oli ± 1 %.

Taulukko 1. Kemiällisen analyysin tulokset.

SGS näytenumero	Näyte	Alkuperäinen kuitusisältö	Mitattu kuitusisältö
85	Näyte 001 (3 pesua)	65 % polyesteri 35 % puuvilla	67,2 % Polyesteri 32,8 % puuvilla
86	Näyte 009 (14 pesua)	65 % polyesteri 35 % puuvilla	65,2 % polyesteri 34,8 % puuvilla
87	Näyte 021 (25 pesua)	65 % polyesteri 35 % puuvilla	65,0 % polyesteri 35,0 % puuvilla
88	Näyte 028 (42 pesua)	65 % polyesteri 35 % puuvilla	67,0 % polyesteri 33,0 % puuvilla
89	Näyte 030 (64 pesua)	65 % polyesteri 35 % puuvilla	72,5 % polyesteri 27,5 % puuvilla
90	Näyte tilkut	65 % polyesteri 35 % puuvilla	67,0 % polyesteri 33,0 % puuvilla
91	Näyte avatut kuidut	65 % polyesteri 35 % puuvilla	68,0 % polyesteri 32,0 % puuvilla

SGS:n näytenumeroita 85–89 edustavat näytteet olivat samoja, jotka kuvannettiin hyperspekrisesti. Näiden näytteiden pesukertojen määrä oli tiedossa. Näytteet 90 ja 91 edustivat isompaa näyte-erää niin, että näyte 90

edusti tilannetta ennen mekaanista kuidunavausta ja näyte 91 edusti tilannetta mekaanisen kuidunavauksen jälkeen. Näytteiden 90 ja 91 pesukertojen määrää ei tiedetty ja näytteet edustivat analyysissä koko suurempaa erää.

Taulukosta 1 nähdään, että SGS:n näytenumeron 85 omaavan tilkun (3 pesua) kuitusuhde on muuttunut yli kaksi prosenttia. Tekstiilin käyttö ja peseminen ovat aiheuttaneet puuvillan kulumaa vaatteessa, ja puuvillan osuus on vähentynyt yhteensä 2,2 % alkutilanteesta. Mitattu kuitusisältö näytetilille on siis 67,2 % polyesteriä ja 32,8 % puuvillaa.

Pienempiä muutoksia on puolestaan havaittavissa SGS:n näytenumeroissa 86 ja 87. Näytteen 86 (14 pesua) kuitusuhde on muuttunut käytön ja pesujen seurauksena vain 0,2 %, joten puuvillan osuus on näin ollen enää 34,8 % koko näytteen kuitusisällöstä. Mitattu kuitusisältö on siis 65,2 % polyesteriä ja 34,8 % puuvillaa. Näytteen 87 (25 pesua) kuitusisällöt ovat puolestaan pysyneet samana käytöstä ja pesuista huolimatta kuitusisällön edelleen ollessa 65,0 % polyesteriä ja 35,0 % puuvillaa.

SGS:n näytenumeron 88 omaavan näytteen (42 pesua) kuitusisältö on puolestaan muuttunut kaksi prosenttia puuvillan osuuden ollessa enää 33 % koko kuidun sisällöstä. Käyttö ja pesut ovat siis aiheuttaneet tekstiiliin kulumaa niin, että tilkun lopulliset kuitusuhdanteet ovat 67 % polyesteriä ja 33 % puuvillaa.

Näytteen 89 (64 pesua) kuitusisällössä on havaittavissa suuria eroja, jotka ovat seurausta tekstiilin käytöstä ja sen pesemisestä. Alkuperäisestä suhdanteesta (65,0 % polyesteri ja 35,0 % puuvilla) suhdanteet ovat muuttuneet 7,5 % ja analyysissä mitatut kuitusuhteet ovat näin ollen 72,5 % polyesteriä ja 27,5 % puuvillaa.

SGS:n näytteet 90 ja 91 edustavat näytetuppoja, joista 90 on otettu ennen mekaanista avausprosessia ja 91 mekaanisen avausprosessin jälkeen. Yllätyksellisesti suhdanteiden muutokset ovat vain prosentin luokkaa toisistaan: näytteen 90 mitatut kuitusuhteet ovat 67,0 % polyesteriä ja 33,0 % puuvillaa. Muutosta alkuperäisiin kuitusuhteisiin on siis havaittavissa kaksi prosenttia.

Näytteen 91 mitatut kuitusuhteet ovat puolestaan 68,0 % polyesteriä ja 32,0 % puuvillaa. Muutosta alkuperäisiin kuitusuhteisiin on siis yhteensä kolme prosenttia.

6.3 Tulosten yhteenveto

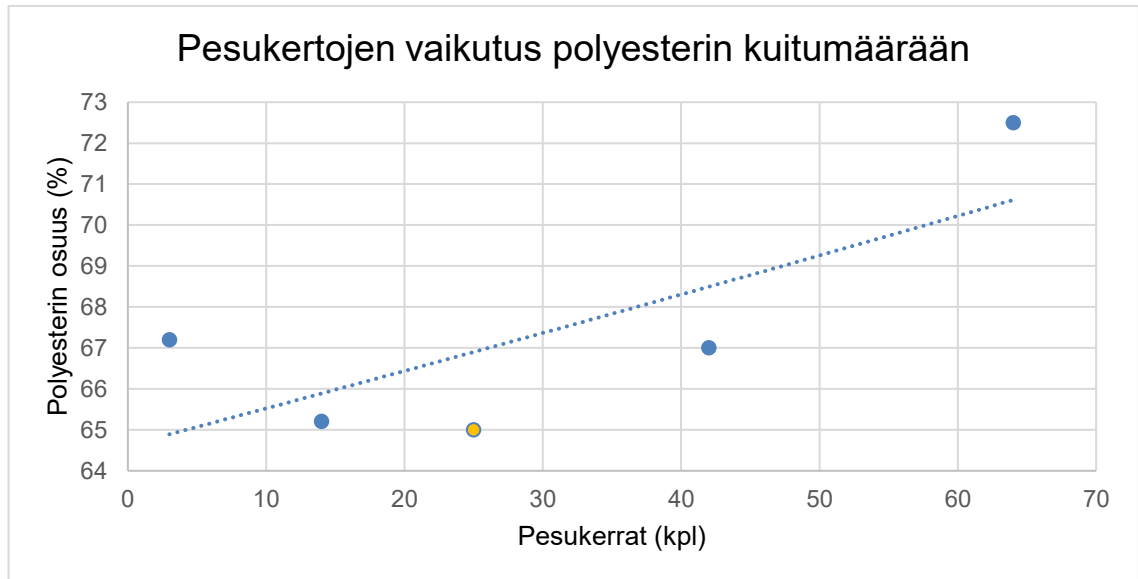
Hyperspektrikuvantamisessa tuotettu algoritmi oppi etsimään näytteistä haluttuja piirteitä eli pesukertojen määrää. Algoritmin virhe oli luokkaa 3,11, joka tarkoittaa että tuotettu algoritmi osaa ennustaa muutoksia noin ± 3 :n pesukerran tarkkuudella. Hypespektrikuvantamisella voidaan löytää pieniä kuitusuhteisiin syntyneitä eroja näytteiden välillä.

Kemiallisessa analyysissä puolestaan näytteiden välisissä tuloksissa oli hajontaa. Erityisesti hyperspektrikuvannettujen kangastilkkujen (näytteet 85–89) välillä oli hajontaa. Vain yhdessä näytteessä (näyte 87, 25 pesua) kuitusuhdanteet olivat samat kuin alun perin, eli 65 % polyesteriä ja 35 % puuvillaa. Tuloksista voidaan havaita kaksi asiaa:

- ilmoitetun kuitusuhteen tarkkuus ja
- käytön sekä pesujen vaikutus kuitusuhteisiin.

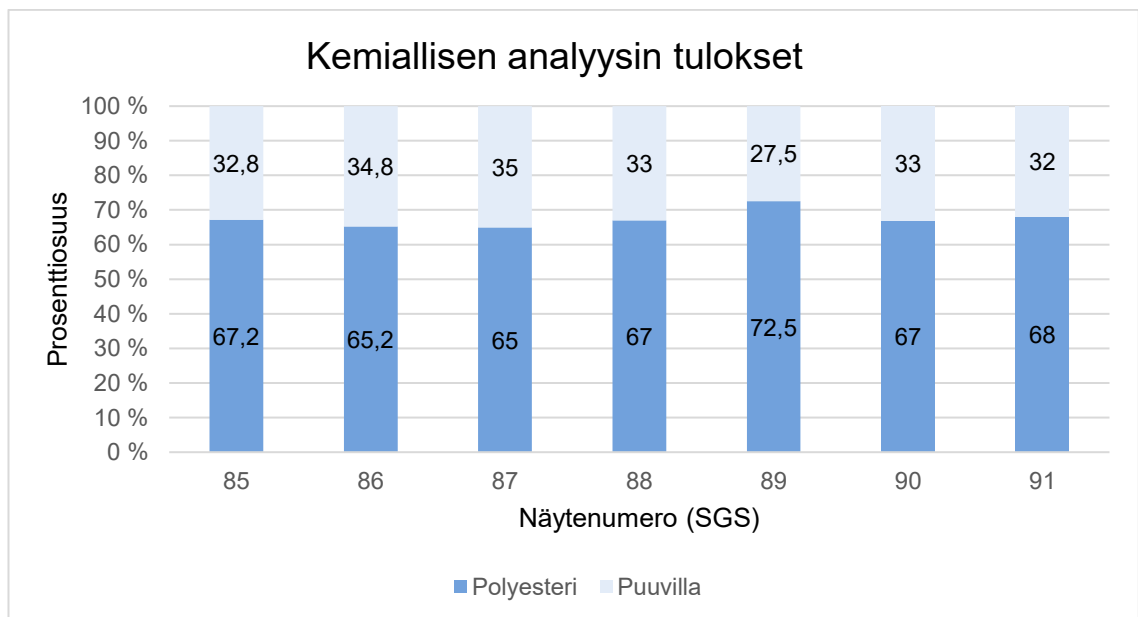
Ilmoitetun kuitusisällön merkitseminen erityisesti kuluttajapuolen tekstiileihin on ollut haastavaa, koska merkintätavoista ei ole ollut selkeää yhtä linjausta. Vuonna 2023 on käynnistynyt EU:n alueella laaja uudistus, jolla on tarkoitus päivittää ja yhdenmukaistaa tekstiilimerkintöjä vaatteissa. (STJM ry 2024.)

Kuvaan 12 on havainnollistettu kemiallisen analyysin tuloksia regressiomallilla. Regressiomallista havaitaan, ettei kuluma ole lineaarista ainakaan tämän suuruisella näyte-erällä. Tätä edustaa näyte 87 (kuvan oranssi pallero), jota on pesty yhteensä 25 kertaa. Kyseisen vaatteen kuitusuhteessa ei ole havaittavissa muutoksia, toisin kuin muissa näytteissä. Esimerkiksi näytteessä 85 (3 pesua), joka on kuvan vasemmanpuolimmaisina pallo, havaitaan suurempia kuitusuhdemuutoksia kuin näytteessä 87 (25 pesua).



Kuva 12. Pesukertojen vaikutus polyesterin osuuteen (Kuva: Teri Niekka).

Alla olevaan kuvaan (kuva 13) on havainnollistettu tuloksia pylväsdiagrammin avulla. Analyysin tuloksiin vedoten voidaan todeta, että käyttö ja peseminen aiheuttavat kulumaa tekstiileihin. Tätä argumenttia puoltaa lähes kaikki kemiallisen analyysin tulokset. Suurimmat muutokset kuitusuhteiden osalta havaitaankin eniten pesuja käyneestä näytteestä 89 (yhteensä 64 pesua).



Kuva 13. Kemiallisen analyysin tulokset esitettynä pylväsdiagrammina (Kuva: Teri Niekka).

Näytteet 90 ja 91 ovat isommasta näyte-erästä, joista näyte 90 edustaa tilannetta ennen mekaanista kuidunavausta ja 91 tilannetta kuidunavauksen jälkeen. Näyte 90 on leikeltä giljotiinileikkurissa pienemmäksi. Vastoin alkuperäisiä odotuksia, kuitusuhteiden muutokset eivät ole kovinkaan suuria näiden näytteiden välillä. Alunperin 65/35 % PES/CO kuiduista mitattiin seuraavat tulokset:

- näyte 90: 67,0 % PES ja 33,0 % CO
- näyte 91 68,0 % PES ja 32,0 % CO.

Jo ennen mekaanista kuidunavausta edustavan näytetupon kuitusuhde on eri kuin oli tarkoitus. Tarkoitus oli tutkia 65/35 % PES/CO vaatteiden kuitusuhdemuutoksia, mutta tuloksista nähdään, että kuitusuhde on jo ennen mekaanista kuidunavausta muuttunut. Tulos viittaa siis siihen, että tekstiilien käyttö ja peseminen ovat aiheuttaneet kuitusuhdemuutoksia tekstiileihin tai siihen, että ilmoitettu kuitusuhde ei täysin pidä paikkaansa. Giljotiinileikkuu ei muuta kuitusuhdannausta, koska esimerkiksi puuvillalle tyypillistä pölyämistä ei pääse tässä vaiheessa tapahtumaan.

Tuloksissa tulee ottaa myös huomioon mittauksen tarkkuus, joka oli luokkaa ± 1 %. Esimerkiksi isomman erän näytteiden (90 ja 91) kuitusuhteiden ero on juurikin tämän yhden prosentin luokkaa, eli on vaikeaa arvioida, onko mekaaninen kuidunavaus vaikuttanut mitenkään kuitusuhteisiin. Tekstiilinäytetilkkujen välisissä tuloksissa oli kuitenkin jopa 7,5 % eroja keskenään. Erot johtuvat vaatteiden käytön ja pesujen aiheuttamasta kulumasta.

7 Pohdinta

Vaatteiden kuitusuhteisiin syntyy muutoksia vaatteen elinkaaren aikana. Polyesteri-puuvillasekoitteesta tehtyihin työvaatteisiin sekä käyttö että peseminen aiheuttavat kulumaa, jolloin puuvillan osuus tekstiilin kuiduista vähenee. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin

- tekstiilien käytön ja pesujen aiheuttamaa kulumaa tekstiilikuitusuhteisiin
- mekaanisen kuidunavauksen vaikutuksia kuitusuhteisiin.

Lisäksi tässä opinnäytetyössä tehtiin laajaa taustakartoitusta tekstiilien tunnistusmenetelmiin ja menetelmien toimintaperiaatteisiin. Opinnäytetyössä havainnoitiin myös hyperspektrikuvantamisen mahdollisuuksia tunnistaa pieniä syntyneitä kuitusuhte-eroja. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli havainnoida siis puuvilla-polyesterisekoitevaatteisiin syntyviä muutoksia, joita vaatteisiin niiden elinkaaren aikana syntyy.

Opinnäytetyössä saatiin tehtyä kattava taustakartoitus tekstiilien tunnistusmenetelmiin kartoittamalla niin perinteisiä kuin koneellisiakin menetelmiä. Tekstiilien tunnistusmenetelmiä on olemassa useita erilaisia ja menetelmiä erottaa toisistaan se, mitä kaikkea menetelmillä on mahdollista tunnistaa. Yhteistä tunnistusmenetelmissä on se, että menetelmät perustuvat nimenomaan kuidun ominaisuuksien tutkimiseen koneellisesti tai klassisilla menetelmillä. Tehdyllä taustakartoituksella selvitettiin eri menetelmiä ja sitä, mihin tunnistaminen perustuu.

Koneellisesti tunnistaminen tapahtuu NIR- tai FTIR- laitteistoilla, hyperspektrikuvantamisella, tekoälyllä tai perustuen erilaisiin tunnisteisiin (RFID tai viivakoodit). Tekoälyllä voidaan tunnistaa konenäön avulla tai 2D- ja 3D-hahmontunnistuksella ja erilaisia tunnisteita ovat esimerkiksi RFID-tunniteet tai viivakoodit. (Kamppuri ym. 2019a 6–13.)

Klassisiin menetelmiä, joilla tekstiilejä voidaan tunnistaa, ovat puolestaan mikroskopointi, kemiallinen analyysi, polttokoe sekä värjäys- ja tiheystestit (Hu 2008, 51–57).

Taustakartoituksen avulla saatiin myös selville, että yhdisteltäessä useampaa eri menetelmää saadaan tarkempia tuloksia ja esimerkiksi tekstiilien lajittelua saadaan nopeammaksi, tarkemmaksi ja tehokkaammaksi.

Kemiallisen analyysin tekstiilitilkkunäytteet edustivat kulumaa tekstiileiden eri pesukertojen määrällä. Näytteiden kuitusuhteisiin oli syntynyt muutoksia käytön ja pesujen seurauksena. Kuluma ei kuitenkaan ollut lineaarista, jota edustaa näyte, jota oli pesty 25 kertaa. Näytteen kuitusuhdanne mittauksessa oli edelleen 65/35 % PES/CO, kun taan puolestaan vähiten pestyn tekstiilitilkkunäytteen (3 pesua) kuitusuhde oli puolestaan muuttunut 67,2/32,8 % PES/CO:ksi. Eniten pesuja (64 pesua) läpikäyneen näytteen kuitusuhde oli muuttunut 72,5/27,5 % PES/CO:ksi.

Isomman erän, yhteispaino 319 kg, tilannetta edusti kaksi näytettä: näytetuppo ennen kuidunavausta ja näytetuppo kuidunavauksen jälkeen. Näytetuppojen tulosten välillä oli eroa vain 1 % (67/33 % PES/CO ja 68/32 % PES/CO). Mittauksen tarkkuus oli kuitenkin ± 1 % luokkaa, eli johtopäätöstä, kuluttaako mekaaninen kuidunavaus kuituja, ei voida sanoa varmaksi. Kyse voi olla kulumasta tai mittalaitteiston tarkkuudesta.

Derycke (2024) oli arvioinut, että vaatteiden käyttö ja peseminen eivät muuttaisi suuresti kuitusuhdetta vaan suurimmat muutokset kuitusuhteisiin syntyisivät mekaanisessa kuidunavausprosessissa. Hän arveli että alun perin 67/33 % PES/CO-vaate saattaisi olla mekaanisen kuidunavauksen ja karstauksen jälkeen enää 90/10 % PES/CO. Tässä opinnäytetyössä toteutetun mittauksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että suurempia muutoksia kuitusuhteisiin syntyi vaatteen käytöstä sekä pesemisestä, kuin mitä mekaanisesta kuidunavauksesta.

Tutkimuksessa onnistuttiin saamaan melko kattavaa dataa. Vaikka analysoitavia näytteitä olikin melko niukasti, saatiin näillä tuloksilla kuitenkin

valtavasti uutta tietoa. Tekstiilien kiertotalous on melko uusi mutta laaja teollisuudenala, ja tekstiilien kulumisen tiimoilta on aiemmin tehty vain hyvin niukasti tutkimusta, joten tulokset asian tiimoilta olivat tarpeellisia. Tuloksia kuitujen kulumasta tarvitaan, jotta syntyvää uusioraaka-ainetta on mahdollista hyödyntää oikeissa paikoissa.

Haastavaa tutkimuksen toteuttamisessa oli käytännön haasteet sekä rajalliset resurssit. Kulumisen seuranta on käytännössä haastavaa suurten tekstiilivirtojen takia. Konenäöllä on kuitenkin mahdollista löytää syntyneitä kuitusuhde-eroja, ja saatuihin tuloksiin voidaan luottaa. Konenäkö nopeuttaa siis osaltaan tekstiilien lajittelua. Tämän lisäksi mittausten toteuttaminen on kallista ja mittaus vaatii aikaa. Tässä opinnäytetyössä tehdyssä tutkimuksessa tarvittiin useamman eri tahon asiantuntijoita, joten tutkimus vaati myös heidän aikaansa sekä kaikkiaan kattavaa alan verkostoa. Tutkimuksessa analysoitavat erät olivat lisäksi melko suppeita, ja esimerkiksi kemialliseen analyysiin pienempää erää (alunperin 30 näytettä) tuli vielä supistaa niin, että analyysiin valittiin viisi tekstiilitilkunäytettä. Otos oli kattava, mutta useamman näytteen analysointi olisi antanut enemmän yksityiskohtaista tietoa. Tarkempia tuloksia isommasta erästä olisi voitu saada, jos olisi ollut mahdollista analysoida kemiallisesti koko kuitupaali pienemmän otannan sijasta. Pienemmällä otoskoolla tulokset saattavat olla suppeampia kuin mitä ne todellisuudessa olisivat.

Mahdollisia vaihtoehtoja uuden tutkimuksen toteuttamiselle tai tämän tutkimuksen jatkolle on monia. Tätä tutkimusta olisi voitu jatkaa esimerkiksi suurentamalla eriä (esim. 100 näytettä) tai pidentämällä aikaikkunaa. Myös samojen tekstiileiden kuluneimpien kohtien (hiansuut, polvien kohdat) tutkiminen voisi antaa mielenkiintoisia tuloksia. Samantyyllisen uuden tutkimuksen olisi voinut toteuttaa erilaisista tai eri taustan (käytetty eri käyttökohteessa) omaavista vaatteista tai eri kuitusuhteen/materiaalin (ei 65/35 % PES/CO) omaavista vaatteista. Myös vielä useammin pestyjä (70+ tai 100+ pesua) vaatteita voisi tutkia.

Lähteet

Advian n.d. Mitä on hyperspektrikuvantaminen? Nettilähde. Viitattu 6.3.2024.

<https://www.advian.fi/fi/mita-on-hyperspektrikuvantaminen>

Blanch-Perez-del-Notario, C.; Saeys, W. & Lambrechts, A. 2019. Hyperspectral imaging for textile sorting in the visible near-infrared range. J. Spectral Imaging 8, a17. Tutkimusartikkeli. Viitattu 26.3.2024.

https://www.impopen.com/download.php?code=I08_a17

Boncamper, I. 2011a. Vaatetusalan materiaalit. 1.-5. painos. Helsinki. WSOYpro Oy.

Boncamper, I. 2011b. Tekstiilioppi: kuituraaka-aineet. Hämeenlinna. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Dahlbo H.; Rautiainen, A.; Savolainen, H.; Oksanen, P.; Nurmi, P.; Virta, M. & Pokela, O. 2019. Textile flows in Finland 2019. Viitattu 13.3.2024.

<https://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522167873.pdf>

Derycke, J-L. 2024. Tiedonanto sähköpostitse 18.1.2024.

Duhoux, T.; Maes, E.; Hirschnitz-Garbers, M.; Peeters, K.; Asscherickx, L.; Christis, M.; Stubbe, B.; Colignon, P.; Hinzmann, M & Sachdeva, A. 2021. Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. Final Report. Viitattu 29.2.2024.

<https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2022/50030-study-textile-recycling-web.pdf>

Ellen MacArthur Foundation 2017. A new textiles economy: Redesigning fashion's future. Viitattu 13.3.2024.

https://emf.thirdlight.com/file/24/uiwtaHvud8YIG_uiSTauTIJH74/A%20New%20Textiles%20Economy%3A%20Redesigning%20fashion%E2%80%99s%20future.pdf

Euroopan komissio 2022. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the Europeans Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles.

Brysseli. <https://environment.ec.europa.eu/document/download/74126c90-5cbf->

[46d0-ab6b-60878644b395_en?filename=COM_2022_141_1_EN_ACT_part1_v8.pdf](https://www.fentec.fi/46d0-ab6b-60878644b395_en?filename=COM_2022_141_1_EN_ACT_part1_v8.pdf)

Fentec Oy. n.d. Tekstiilien tuotantoprosessi läpinäkyväksi RFID-ratkaisulla. Nettilähde: Portfolio: Case Lannen Tekstiilihuolto. Viitattu 28.3.2024.

<https://fentec.fi/fi/portfolio/case-lannen-tekstiilihuolto/>

Heikkilä, P. 2019. Polyesteri – ympäristön paholainen vai pelastaja? Paloturvallisen sisustustekstiilin kierrättäminen ja uudelleen hyödyntäminen. PowerPoint-esitys 16.5.2019. VTT. Viitattu 2.2.2024.

https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24619408/ContractDeco_Heikkila_2019.pdf

Heikkilä, P.; Hinkka, V. & Harlin, A. 2019. Tekstiilikierrätyksen prosessien kustannusmallinnus. Tutkimusraportti. VTT. Viitattu 1.3.2024.

https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24245321/VTT_R_06611_18.pdf

Hu, J. 2008. Fabric testing. E-kirja. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. Viitattu 17.4.2024.

<https://ocd.lcwu.edu.pk/cfiles/Home%20Economics/Maj/H.Eco/TC-307/FabricTesting.pdf>

Jaarinen, S. & Niiranen, J. 2005. Laboratorion analyysitekniikka. 5. uudistettu painos. Helsinki: Edita Publishing Oy.

Kamppuri T.; Heikkilä, P.; Pitkänen, M.; Saarimäki, E.; Cura, K.; Zitting, J.; Knuutila, H. & Mäkiö, I. 2019b. Tekstiilimateriaalien soveltuvuus kierrätykseen. Tutkimusraportti. VTT. Viitattu 3.4.2024.

https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24225719/VTT_R_00091_19.pdf

Kamppuri, T.; Heikkilä, P.; Pitkänen, M.; Hinkka, V.; Viitala, J.; Cura, K.; Zitting, J.; Lahtinen, T.; Knuutila, H. & Lehtinen, L. 2019a. Tunnistusteknologiat tekstiilien kierrätyksessä. Tutkimusraportti. VTT. Viitattu 7.2.2024.

https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24214371/VTT_R_00092_19.pdf

Lounais-Suomen Jätehuolto n.d. Mitä on poistotekstiili? Poistotekstiilin lajitteluohjeet. Nettilähde. Viitattu 13.3.2024. <https://poistotekstiili.lsjh.fi/mita-on-poistotekstiili/>

Mäkelä, M. 2022. Entä jos kännykässäsi olisi hyperspektrikamera? Hyperspektrikuvaus vie tutkimuksen laboratoriosta niin avaruuteen kuin vesistöihin. Tutkimusartikkeli. VTT. Viitattu 6.3.2024.

<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/enta-jos-kannykassasi-olisi-hyperspektrikamera-hyperspektrikuvaus-vie>

Palm, D.; Elander, M.; Watson, D.; Kjørboe, N.; Salmenperä, H.; Dahlbo, H.; Synnøve, R.; Hanssen, O-J.; Gíslason, S.; Ingulfsvann, A-S. & Nystad, Ø. 2014. A Nordic textile strategy. Part II: A proposal for increased collection, sorting, reuse and recycling of textiles. Verkkolähde. Viitattu 1.3.2024.

<https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:791003/FULLTEXT01.pdf>

Palme, A. 2017. Recycling of cotton textiles: Characterization, pretreatment, and purification. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Chemistry and Chemical Engineering. Gothenburg. Chalmers University of Technology. Viitattu 30.4.2024.

<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/246506/246506.pdf>

Palme, A.; Idström, A.; Evenäs, L. & Brelid, H. 2014. Chemical and ultrastructural changes in cotton cellulose induced by laundering and textile use. Verkkolähde. Viitattu 30.4.2024.

https://www.researchgate.net/publication/283259277_Chemical_and_ultrastructural_changes_in_cotton_cellulose_induced_by_laundering_and_textile_use

Rester Oy 2021. Rester Oy:n mekaaninen tekstiilien kierrätysprosessi. 19.11.2021. Youtube-video. Viitattu 29.2.2024.

<https://www.youtube.com/watch?v=oWVp9z7V55s>

Rester Oy 2024. Sisäinen tiedonanto 30.1.2024.

Rester Oy n.d. Nettilähde. Viitattu 23.2.2024. <https://rester.fi/en/>

RFIDLab n.d. Mitä on RFID? RFID-teknologia. RFIDLab Finland ry. Nettilähde. Viitattu 28.3.2024. <https://rfidlab.fi/rfid-teknologia/>

Räisänen, R.; Rissanen, M.; Parviainen, E. & Suonsilta, H. 2017. Tekstiilien materiaalit. 1.-2. painos. Helsinki: Finn Lectura. Kustannusosakeyhtiö Otava.

Santaluoto, O. 2012. 3D-skannaukseen perehtyminen. Opinnäytetyö (AMK). Kone- ja tuotantotekniikka. Paikkakunta: Helsinki. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Viitattu 12.4.2024.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/45691/3D-skannaukseen%20perehtyminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sell, H. 2012. Polyesteri-, polyamidi- ja juuttikuitujen tutkimus FTIR-laitteistolla sekä niiden poltossa muodostuvien savukaasujen kvalitatiivinen määrittäminen GC-MS-laitteistolla. Opinnäytetyö (AMK). Kemianteekniikka. Prosessi- ja ympäristötekniikka. Kaupunki: Metropolia Ammattikorkeakoulu. Viitattu 17.2.2024.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43286/Insinoorityo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SFS-EN ISO 1833-1:2020. Textiles. Quantitative chemical analysis. Part 1: General principles of testing. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. SFS ry.

SFS-EN ISO 1833-11:2017. Textiles. Quantitative chemical analysis. Part 11: Mixtures of certain cellulose fibres with certain other fibres (method using sulfuric acid). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SGS Finland Oy. n.d. Nettilähde: Tietoa SGS:stä. Viitattu 18.4.2024.

<https://www.sgs.com/fi-fi/yritys/tietoa-sgs-sta>

Siikanen, S.; Savolainen, M.; Groombridge, M.; Ratnayake, C.; Srivastava, A.; Akhilesh, K.; Kauppinen, T. & Paavola, M. 2021. Examining short-wavelength infrared hyperspectral imaging for do-it-yourself-for-you laundry detergent powder fablab quality control. Tutkimusraportti. VTT. Viitattu 14.3.2024.

https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/46500705/Examining_short_wavelength.pdf

Sinikallio, V.; Salminen, S. & Kämppe, V. 2021. Spektroskopia tutuksi -diaesitys. Infrapunaspektroskopia. Viitattu 13.2.2024.

https://www.helsinki.fi/assets/drupal/2021-09/Spektroskopia-tutuksi_ir_diaesitys_tiedekasvatus.pdf

Sisäinen tiedonanto. 5.3.2024. Sisäinen tiedonanto asiakkaalta sähköpostitse.

Sormunen, T.; Järvinen, S.; Lämsä, A.; Immonen, K.; Mannila, J. & Peltola, J. Material sorting using hyperspectral imaging for biocomposite recycling. Tutkimusartikkeli. Viitattu 2.5.2024.

https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/55598810/ICNF2019_sormunen_split_pdf.pdf

Sormunen, T. 2024. Tiedonanto ja PowerPoint -esitys kuvantamistuloksista sähköpostitse 5.4.2024.

STJM ry = Suomen Tekstiili & Muoti ry 2022. Tekstiilikuituopas. Viitattu 1.2.2024. <https://www.stjm.fi/palvelut-ja-tietoa-yrityksille/tekstiilikuituopas/?cats=0>

STJM ry 2024. Nettilähde: Uutiset: Tekstiilimerkintöjen yhdenmukaistaminen helpottaa kaupankäyntiä ja parantaa kuluttajien luottamusta. Viitattu 26.4.2024. <https://www.stjm.fi/uutiset/tekstiilimerkintojen-yhdenmukaistaminen-helpottaa-kaupankayntia-ja-parantaa-kuluttajien-luottamusta/>

Suomen Tekstiili & Muoti ry n.d. Nettilähde: Palvelut ja tietoa yrityksille: Tekstiilien kiertotalous. Kiertotalouden termit tutuiksi. Viitattu 4.4.2024. <https://www.stjm.fi/palvelut-ja-tietoa-yrityksille/tekstiilien-kiertotalous/kiertotalouden-termit-tutuiksi/>

TExtended -hanke n.d. Nettilähde: about. Viitattu 16.2.2024. <https://textended.eu/about/>

Textile Exchange. 2022. Preferred Fiber & Materials Market Report. Tutkimusraportti. Viitattu 17.4.2024. https://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange_PFMR_2022.pdf

Valtioneuvoston asetus jätteistä. 18.11.2021/978. Viitattu 9.2.2024.

VTT n.d. Nettilähde: VTT yhtiönä. Viitattu 9.4.2024. <https://www.vttresearch.com/fi/vtt-yhtiona>

Liite 1

Taulukko 2. Hyperspektrikuvannettavien näytteiden tiedot.

ID	Ilmoitettu kuitusuhde	Kuvaus vaatteesta	Näytteenotto kohta	Pesukerrat
001	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, kuminauhallinen housu	Vyötäröltä, kuminauhan alta sekä oikealta että vasemmalta puolelta	3
002	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, napillinen pitkä työtakki	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	5
003	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	6
004	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	6
005	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	7
006	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	8
007	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	11
008	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	12
009	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	14
010	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	14
011	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	14
012	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	15
013	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	15
014	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	16
015	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	17
016	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, kuminauhallinen housu	Vyötäröltä, kuminauhan alta sekä oikealta että vasemmalta puolelta	18
017	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, kuminauhallinen housu	Vyötäröltä, kuminauhan alta sekä oikealta että vasemmalta puolelta	19

018	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	20
019	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	21
020	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	22
021	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	25
022	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	26
023	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	27
024	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	28
025	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	29
026	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	33
027	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, kuminauhallinen housu	Vyötäröltä, kuminauhan alta sekä oikealta että vasemmalta puolelta	38
028	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	42
029	65 % PES 35 % CO	Valkoinen, normaalimittainen työtakki, taskut takin sisäpuolella	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	51
030	65 % PES 35 % CO	Valkoinen työtakki, vihreät raidat rintataskun reunassa sekä yläselässä, takana kiristysnaru	Helmasta alhaalta, takin takapuolelta	64