



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

TEKSTIILIJÄÄTMETE MEHAANILISE JA KEEMILISE  
ÜMBERTÖÖTLEMISE VÕIMALUSED,  
ÜMBERTÖÖDELDUD MATERJALIDE OMADUSED JA  
SOBIVUS UUTEKS RAKENDUSTEKS EESTI  
KAITSEVÄELASE INDIVIDUAALVARUSTUSE NÄITEL

POSSIBILITIES FOR MECHANICAL AND CHEMICAL RECYCLING OF TEXTILE  
WASTE, PROPERTIES OF RECYCLED MATERIALS AND SUITABILITY FOR NEW  
APPLICATIONS ON THE EXAMPLE OF INDIVIDUAL EQUIPMENT OF THE  
DEFENCE FORCES OF ESTONIA

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Tiina Lelumees

Üliõpilaskood: 178171KVEM

Juhendaja: Tiia Plamus, vanemlektor

Tallinn 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 2019

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 2019

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....2019

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**Tallinna Tehnikaülikooli Materjali ja keskkonnatehnoloogia instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Tiina Lelumees, 178171KVEM  
**Õppekava, peeriala:** KVEM12/15 - Puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia, peeriala plasti- ja tekstiilitehnoloogia  
**Juhendaja:** Vanemlektor, Tiia Plamus PhD, +372 562 11653, tiia.plamus@taltech.ee

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) Tekstiilijäätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise võimalused, ümbertöödeldud materjalide omadused ja sobivus uuteks rakendusteks Eesti kaitseväelase individuaalvarustuse näitel

(inglise keeles) Possibilities for mechanical and chemical recycling of textile waste, properties of recycled materials and suitability for new applications on the example of individual equipment of the Defence Forces of Estonia

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Kaardistada tekstiilijäätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise võimalused ning hinnata nende sobivust erineva kiulise koostisega kaitseväelase individuaalvarustuse tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks;
2. Viia läbi erineva kiulise koostisega kaitseväelase individuaalvarustuse tekstiilijäätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise katsetused ning hinnata ümbertöödeldud materjalide sobivust uuteks rakendusteks;
3. Pakkuda välja lahendused Eesti kaitseväelaste individuaalvarustuse tekstiilijäätmete terviklikuks ringlusesse suunamiseks, sõltumata nende kiulisest koostisest ja seisukorrast, lähtudes seejuures valmistatavate toodete ja materjalide korduvkasutatavuse printsiibist.

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Erineva kiulise koostisega tekstiilijäätmete ümbertöötlemise võimaluste uurimine ja ümbertöödeldud materjalide rakenduste kaardistamine	30.11.2018
2.	Eesti kaitseväelaste individuaalvarustuse tekstiilijäätmete kaardistamine	15.12.2018
3.	Tekstiilijäätmete purustamistehnoloogia võimaluste uurimine ja praktilised katsetused	15.02.2019
4.	Mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise katsetuste läbiviimine	15.04.2019
5.	Katsetuste tulemuste analüüs, tulemuste ja ettepanekute kirjeldamine	03.05.2019
6.	Valminud magistritöö esitamine juhendajale	17.05.2019

**Töö keel:** Eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "29." mai 2019 a

**Üliõpilane:** Tiina Lelumees ..... "....." .....201....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Tiia Plamus ..... "....." .....201....a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA.....	6
Lühendite ja tähiste loetelu .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. TEKSTIILIJÄÄTMETE TEKE JA ÜMBERTÖÖTLEMISE PROBLEEMISTIK.....	10
1.1 Tekstiilijäätmete tekke peamised allikad ja taaskasutamise vajadus.....	11
1.2 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemise peamised probleemid .....	14
1.3 Tekstiilijäätmete teke ja probleemistik Eesti Kaitseväes.....	16
2. TEKSTIILIJÄÄTMETE ÜMBERTÖÖTLEMISE VÕIMALUSED .....	19
2.1 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemisega seonduv terminoloogia ja mõisted .....	21
2.2 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks ettevalmistamine .....	23
2.2.1 Tekstiilijäätmete kogumine .....	24
2.2.2 Kogutud tekstiilijäätmete sorteerimine ja puhastamine.....	26
2.2.3 Muude materjalide separeerimine.....	28
2.2.4 Materjalide purustamine ja jahvatamine .....	29
2.3 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemise tehnoloogiad.....	32
2.3.1 Tekstiilijäätmete mehaaniline ümbertöötlemine.....	32
2.3.2 Tekstiilijäätmete keemiline ümbertöötlemine .....	35
2.3.3 Uudseimad lahendused .....	40
3. ÜMBERTÖÖDELDUD TEKSTIILIJÄÄTMETE KASUTUSVÕIMALUSED .....	42
4. EESTI KAITSEVÄE TEKSTIILIJÄÄTMETE ÜMBERTÖÖTLEMINE JA UUTE MATERJALIDE VALMISTAMINE .....	48
4.1 Katsetuste läbiviimiseks valitud tekstiilijäätmed .....	49
4.2 Lähtematerjali ettevalmistamine.....	51
4.3 Tekstiilijäätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise protsessid ja selle tulemusena saadud materjalid .....	57
4.3.1 Lausmaterjalide valmistamine.....	57
4.3.2 Komposiitmaterjali valmistamine.....	64
4.3.3 Tekstiilijäätmete lahustamine ja uute kiudude formeerimine .....	66
4.2.4 Filamendi ja graanulite valmistamine .....	70
5. ÜMBERTÖÖDELDUD MATERJALIDE SOBIVUS UUTEKS RAKENDUSTEKS.....	74
JÄRELDUSED .....	77
KOKKUVÕTE .....	79

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	81
SUMMARY .....	87
LISAD .....	89
LISA 1 Läviviidud uuringud taaskasutuse ja ümbertöötlemise valdkonnas.....	89
LISA 2 Laboratoorne pooltööstuslik desintegraatorseade DSL-115 .....	91
LISA 3 Elastsete materjalide peenestusseade PP-1 .....	92
LISA 4 PLA spetsifikatsioon .....	93
LISA 5 Lausmaterjali 1 pindtiheduse ja tõmbekatsete andmed .....	94

## EESSÕNA

Magistritöö on valminud koostöös Eesti Kaitseväega, et leida lahendusi kaitseväelaste individuaalvarustuse ümbertöötlemiseks. Eesti Kaitseväe eesmärgiks on otsida alternatiivseid võimalusi kasutuskõlbmatuks muutunud tekstiilijäätmetele nende põletusse suunamise asemel. Selleks kuulutas kaitseminister 01.08.2018 käskkirjaga nr 361 välja stipendiumikonkursi, mille üheks teemaks oli kaitseväelase individuaalvarustuse taaskasutus ringmajanduse eesmärgil. Vastavalt teema käsitlusele sõnastati antud magistritöö eesmärk ja probleemipüstitus. Lahenduste pakkumiseks töötati läbi teemakohane kirjandus ning teostati katsetused. Töö tulemusena toodi välja ettepanekud Eesti kaitseväelase individuaalvarustuse tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks ja rakendamiseks lähtuvalt ringmajanduse printsiibist.

Töös kasutatud individuaalvarustuse katsematerjalid ning vajalikud seadmed on võimaldanud Eesti Kaitseväge ja Tallinna Tehnikaülikool. Magistritöö valmimist toetas riikliku stipendiumiga Eesti Kaitseministeerium. Töö valmimisele on kaasa aidanud Tallinna Tehnikaülikooli teadurid Illia Krasnou, Dmitri Goljandin, Mihkel Viirsalu, Heikko Kallakas, Ahto Reiska ja Percy Alao. Eriline tänuavaldus töö juhendamise ja nõustamise eest Tiia Plamusele.

Võtmesõnad: ringmajandus, tekstiilijäätmete ümbertöötlemine, kaitseväelase individuaalvarustus, tekstiilijäätmed.

## Lühendite ja tähiste loetelu

$A$  – pindala

$ABS$  – polüakrülonitriilbutadieenstüreen

$BHET$  – bishüdroksüültereftalaat

$CO$  – puuvill (ingl k *cotton*)

$CO_2$  - süsihappegaas ehk süsinikdioksiid

$DMSO$  – dimetüülsulfoksiid

$EA$  – elastaan (ingl k *elastane*)

$[EMIm]Br$  – 1-etüül-3-metüülimidasoolium bromiid

$FDM$  – sulatatud materjali sadestumise modelleerimine (ingl k *fused deposition modelling*)

$FFF$  – sulatatud materjali sadestumise vormimine (ingl k *fused filament fabrication*)

$FTIR$  – Fourier infrapunaspektroskoopia

$G_S$  – pindtihedus

$L_k$  – pikkus maksimaalse jõu juures

$l_t$  – absoluutne venivus maksimaalse jõu juures

$l_0$  – algpikkus

$mPt$  – ökoindikaatori ühik, millipunkt

$NIR$  – lähi-infrapuna spektroskoopia

$OSB$  – suunatud laastuga puitplaat (ingl k *oriented strand board*)

$PA$  – polüamiid (ingl k *polyamide*)

$PAN$  – akrüül (ingl k *polyacrylic*)

$PES$  – polüester (ingl k *polyester*)

$PET$  – polüetüleentereftalaat (ingl k *polyethylene terephthalate*)

$PLA$  – polülaktiid (ingl k *polylactic acid*)

$POM$  - polüoksümetüleenatsetaal

$PVA$  – polüvinüülatsetaat

$P_t$  – maksimaalne jõud

$P_0$  – suhteline koormus maksimaalse jõu juures

$RFID$  – raadiosagedustuvastuse silt (ingl k *radio-frequency identification*)

$SEM$  - skaneeriv elektronmikroskoop

$TPE$  - termoplastne eslatomeer

$\epsilon_t$  – suhteline venivus maksimaalse jõu juures

## SISSEJUHATUS

Masstootmine, ületarbimine, kiirmoe levik ja rahvaarvu hüppeline kasv on viinud olukorrani, kus iga elaniku kohta maailmas tekib keskmiselt 32 kilogrammi tekstiiljätmeid aastas. Tekstiilmaterjalid on väga erineva koostisega ja valmistatud mitmesuguste tehnoloogiatega, mis teeb sellise jäätmeliigi ringlusesse tagasisuunamise keerulisemaks kui seda on näiteks puidu, klaasi, või paberi puhul. Seetõttu enamik tekstiiljätmetest kas põletatakse või ladestatakse prügilatesse. Vaid väga väike osa tekstiiljätmeid suunatakse tagasi ringlusesse, millest omakorda enamuse moodustab rõivaesemete korduvkasutamine.

Samas on aga kiirmoe pealetung ja ületootmine langetanud rõivaste kvaliteeti ja hinda, millega süvendatakse veelgi käitumismustrit, et rõivaid soetatakse kandmiseks vaid väga lühikese perioodi vältel ning seejärel visatakse minema ja ostetakse uued. Piiratud ressursside ja jäätmetekke vähendamise temaatika taustal on hakatud neile probleemidele viimastel aastatel järjest suuremat tähelepanu pöörama. Jõutud on ka arusaamani, et ainuüksi kasutatud rõivastest ning tootmisjääkidest uute toodete disainimine ei lahenda tervikuna kiirmoest ja kasvavast tarbijaskonnast tulenevat tekstiiljätmete probleemi ning selle valdkonna suundumuste muutmiseks on vaja uudsemaid lahendusi.

Ühe algatusena selliste probleemide lahendamiseks võttis Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu Euroopa Komisjoni ettepanekul 30. mail 2018 vastu direktiivi, mille kohaselt pannakse liikmesriikidele kohustuseks võtta kasutusele meetmeid jäätmetekke vältimiseks. Muuhulgas kehtestati sellega liikmesriikidele nõue koguda alates 01. jaanuarist 2025 tekstiiljätmeid olmejäätmetest eraldi, et vältida jäätmetöötlust, millega need ressursid satuvad jäätmehierarhia magalamatele astmetele, tõsta korduskasutamiseks ettevalmistamise ja ringlussevõtu määra ning ergutada kvaliteetsete teiseste toorainete kasutuselevõttu. Eestis ega ka meie naaberriikides ei ole tänaseks rakendatavat lahendust suurtes kogustes kogutud tekstiiljätmete terviklikuks ümbertöötlemiseks, et vältida nende põletamist ja prügilatesse ladestamist. Teiste riikide kogemuste kaardistamine ning väga väikeses koguses jäätmete ümberdisainimine on käesoleval hetkel Eestis ainsaks reaalselt toimivaks võimekuseks.

Sama probleemiga on juba mitmeid aastaid tegelenud ka Eesti Kaitsevägi, kus hinnanguliselt tekib individuaalvarustuse jäätmeid ligikaudu 40 tonni aastas. Senini on muude lahenduste puudumisel suunatud need jäätmed põletusse, kuid eesmärgiks on leida võimalus efektiivsemaks ressursikasutuseks.



Eeltoodud probleemistikust lähtuvalt on antud magistritöö eesmärkideks:

- kaardistada tekstiilijätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise võimalused ning hinnata nende sobivust erineva kiulise koostisega Eesti kaitsevälase individuaalvarustuse tekstiilijätmete ümbertöötlemiseks;
- viia läbi erineva kiulise koostisega kaitsevälase individuaalvarustuse valitud tekstiilijätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise katsetused ning hinnata ümbertöödeldud materjalide omadusi ja sobivust uuteks rakendusteks;
- pakkuda välja lahendused Eesti kaitsevälaste individuaalvarustuse tekstiilijätmete terviklikuks ringlusesse suunamiseks, sõltumata nende kiulisest koostisest ja seisukorrast, lähtudes seejuures loodavate toodete ja materjalide korduvkasutatavuse printsiibist.

Töö tulemused aitavad laiendada tekstiilijätmete kasutamisevõimaluste ringi ja pakkuda terviklikke lahendusi erineva koostise, tehnoloogia ja kvaliteediga valmistatud tekstiilijätmete ringlusesse tagasi suunamiseks.

Käsitleva teema on oluline eelkõige seetõttu, et nii riiklikul tasandil kui ka korduvkasutusega tegelevate organisatsioonide seas ollakse huvitatud initsiatiividest ja arendusprojektidest, mis aitaksid vältida olukorda, kus EL direktiivist 2008/98/EÜ ning Riiklikust Jäätmekavast 2014-2020 tulenevate kohustuste lahendamiseks on liikmesriik teinud investeeringuid jätmete (sh tekstiilijätmete) liigiti kogumiseks, kuid puuduvad edasised lahendused vältimaks jäätmetöötlust, millega need ressursid satuvad jäätmehierarhia madalamatele astmetele. Sellega seonduvalt analüüsitakse ja katsetatakse töös erinevaid võimalusi, mis võiksid sobida madala kvaliteedi ja erineva kiulise koostisega tekstiilijätmete terviklikuks ümbertöötlemiseks. Analüüsi järeldusi ja katsetuste tulemusi kasutatakse töö kolmanda eesmärgina seatud lahenduste väljatöötamiseks.

Probleemi lahendamiseks ja töö eesmärkide täitmiseks analüüsitakse erinevaid kirjanduslikke allikaid, milles käsitletakse tekstiilide mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise tehnoloogiaid ja põhimõtteid, tuuakse välja ümbertöötlemise peamised kitsaskohad ja suuremad probleemid ning kaardistatakse uued lahendused erineva koostisega tekstiilijätmete ringlussevõtuks. Samuti katsetatakse erineva koostisega tekstiilijätmete ümbertöötlemise võimalusi ning hinnatakse ümbertöödeldud materjalide omadusi ja sobivust uuteks otstarveteks, võttes samaaegselt juba lahenduste kavandamise etapis arvesse kogu ressursi eluringi, et valmistatud materjalid ja tooted oleksid omakorda hõlpsasti korduskasutatavad või võimalikult pika kasutusajaga.

# 1. TEKSTIILIJÄÄTMETE TEKE JA ÜMBERTÖÖTLEMISE PROBLEEMISTIK

Üheks suuremaks väljakutseks, millega kanga- ja rõivatootjad ning keskkonnaspetsialistid silmitsi seisavad, on rõivatööstuse tootmisjääkide ja kasutatud rõivaste aasta-aastalt massiliselt kasvav hulk. Inimkonna hüppeline kasv, tarbimismustrite muutumine ja moetööstuse propageeriv pealetung loovad aina hoogu masstoodangu levikuks, mis kasutab tootmises tarbijale lõpptoodangu kättesaadavuse parandamiseks enamasti vähemkvaliteetseid kangaid. See omakorda on viinud tarbimise ja jäätmete tekke väga kiire kasvuni.

Sellest tingituna on hakatud üha suuremat tähelepanu pöörama materjalide ja tooraine ringluse olulisusele erinevates tööstusharudes. Tekstiili- ja rõivatööstuses tähendab see keskendumist materjalide ümbertöötlemise kontseptsioonile, mis võimaldab vanu ja kasutuskõlbmatuks muutunud tekstiilmaterjale kasutada uute tekstiilkiudude, -materjalide, kangaste ja rõivaste valmistamiseks. Selliselt on ressursse võimalik korduvalt uuesti kasutada ja vähendada survet ammenduvatele toorainevarudele.

Mõistlikuma ja vastutustundlikuma tarbimise stimuleerimiseks, prügilatesse ladestatavate jäätmete hulga vähendamiseks ja ringmajanduse osakaalu suurendamiseks on paljud riigid otsustanud rakendada meetmeid ja motivatsioonipakette ning kehtestada regulatsioone. Ka Euroopa Komisjon võttis 02.12.2015 vastu ringmajanduse paketi, mille eesmärgiks on vähendada jäätmete prügilasse ladestamist ning suurendada ringlussevõttu ja korduvkasutamist. Selleks, et toote olulusring sulgeda, on paketi ühe osana koostatud tegevuskava ringmajanduse toetamiseks väärtusahela igas etapis – alates tootmisest kuni tarbimise, parandamise ja valmistamiseni, jäätmekäitluse ja teisese toormeni, mis ringlusesse tagasi suunatakse. Komisjon on võtnud kohustuse rakendada üksikasjalikke meetmeid oma praeguste volituste raames, millega püütakse Euroopa majandust ajakohastada ja muuta selle kurssi jätkusuutlikumaks. Ringmajanduse laiem kasu seisneb ka energiatarbimise ja CO<sub>2</sub> -heite vähenemises.

Ühe osana eelnimetatud ringmajanduse paketist võeti 30.05.2018 vastu jäätmemajandust käsitleva direktiivi 2008/98/EÜ muudatus, millega pandi liikmesriikidele kohustuseks alates 01.01.2025 koguda tekstiilijäätmeid olmejäätmetest eraldi, et võimaldada nende tõhusamat ringlusesse suunamist (EP ja nõukogu direktiiv, 2018). Kuigi mitmed Euroopa Liidu riigid nagu Holland, Belgia ja Prantsusmaa on juba astunud olulisi samme, et tõhustada ja tõsta tekstiilijäätmete kogumise määra (Watson, Aare, Dahl-Petersen, & Trzepacz, 2018), on siiski hetkel võtmetähtsusega teha kindlaks, kas järjest suurenevale hulgale kokku kogutud tekstiilijäätmetele on tulevikus olemas ka rakendus.

## 1.1 Tekstiilijätmete tekke peamised allikad ja taaskasutamise vajadus

Rõivatööstus, mis on ühtlasi ka maailma suurimaks tekstiilkiudude tarbijaks (Textile exchange, 2016), soodustab tahtlikult erinevate rõivaesemete kiiret tarbimismudelit, kavandades juba disainimisfaasis sisse rõivaste lühikese eluea (Echeverria, Handoko, Pahlevani, & Sahajwalla, 2019). Tootmismahude kasvule lisavad hoogu muutuvad moetrendid, mis omakorda mõjutavad aasta-aastalt tarbimise hulka, ületades nii kordades inimeste tegelikud vajadused. Lisaks on globaliseerumine loonud võimaluse toota rõivaid järjest madalamate hindadega, sedavõrd madalate, et paljud tarbijad käsitlevad soetatavaid riideesemeid kui ühekordseks kasutamiseks mõeldud kaupa. Sellist trendi on hakatud nimetama ka kiirmoeks (ingl k *fast fashion*), sest rõivaste maksumus on odav ja tarbijad saavad neid endale rohkem lubada ning muudavad oma garderoobi sagedamini, loobudes lihtsamini sellest, mida nad enam ei kannu. Näiteks ostis keskmine tarbija 2014. aastal 60% rohkem rõivaid kui aastal 2000 ning kasutas seejuures igat rõivaeset poole lühemat aega kui varasemalt (Drew & Yehounme, 2017). Ainuüksi Ameerika Ühendriikides tekkis 2015. aastal enam kui 16 miljonit tonni tekstiiljätmeid (National overview: facts and figures on materials, wastes and recycling, kuupäev puudub) ja terves maailmas kokku hinnanguliselt 92 miljonit tonni ning prognooside kohaselt kasvab 2030. aastaks 148 miljoni tonnini aastas (Truscott, Tan, & Opperskalski, 2017).

Tekstiilitööstus on õli- ja naftatööstuse järel suuruselt teine kõige keskkonnasaastavam sektor maailmas, tootes 10% kogu maailma süsinikdioksiidi heitkogusest (Hall, 2017; Bell, Lee, Riley, & Slater, 2018; Echeverria, Handoko, Pahlevani, & Sahajwalla, 2019). Tekstiili- ja rõivatootmine on ühe keerukaima globaalse tööstusliku tootmisahelaga protsess (Köksal, Strähle, Müller, & Freise, 2017). Näiteks koosneb ühe rõivaeseme elutsükkel järgmistest etappidest: tooraine, tekstiilitootmine, rõivaste konstrueerimine, transport, jaekaubandus, kasutamine ja lõpuks rõivaesemete jõudmine prügi hulka. Kõigi nende etappidega kaasneb märkimisväärne ressursikulu ning negatiivsetest aspektidest lisandub üldisele süsinikukogusele veel näiteks puuvillakasvatuses kasutatavate pestitsiidide hulk, tootmises kasutatavad mürgiseid värv- ja viimistlusained. Ja otse loomulikult elutsükli lõpuks ka äärmiselt suur kogus jäätmeid.

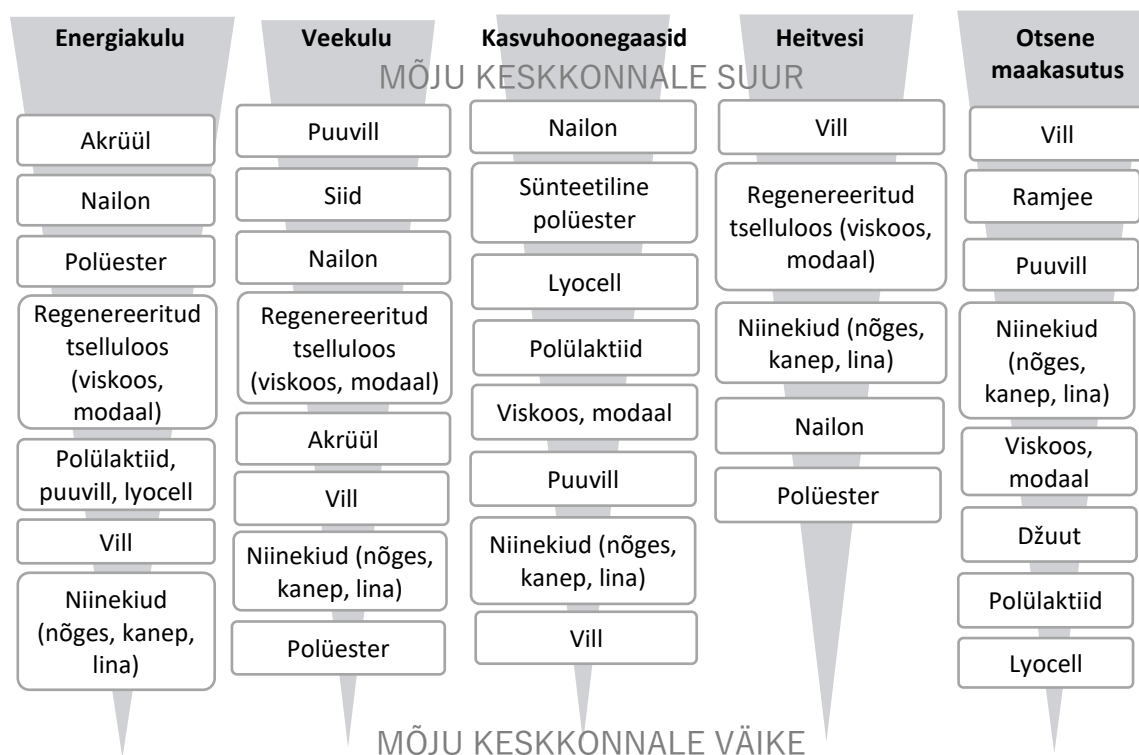
Tekstiilijätmed jagunevad kahte peamisse gruppi: tarbimiseelsed tekstiilijätmed (ingl k *pre-consumer textile waste*), mis tekivad tekstiilide ja rõivaste valmistamise protsesside käigus ning tarbimisjärgsed tekstiilijätmed (ingl k *postconsumer textile waste*), milleks on jäätmetesse suunatud kasutatud rõivad (Pensupa et al., 2017). Lisaks räägitakse mõningatel juhtudel eraldi ka

tööstuslikest tekstiilijäätmetest, milleks on näiteks vaipade, kardinade, meditsiiniliste tekstiilide jm tootmisest ja tarbimisest tekkinud jäägid (Chavan, 2014).

Tarbimiseelseid jäätmeid (erinevates allikates kasutusel ka nimetusena tootmisjärgsed jäätmed) tekib kõigis tekstiili ja rõivaste tootmisprotsesside etappides: kiudude (looduslike ja sünteetiliste) töötlemine ja viimistlemine, kanga, rõivaste ja jalatsite valmistamine. Selliseid jäätmeid nimetatakse ka „puhasteks jäätmeteks“ (ingl k *clean waste*) tulenevalt nende tekkimisest enne tarbimisfaasi. Nendeks on näiteks väljalõikuste ülejäägid/servad, kvaliteedile mittevastavad materjalid, müügit kõrvaldatud tooted, jne (Caulfield, 2009; Tomovska, 2016; Dissanayake, Weerasinghe, Wijesinghe, & Kalpage, 2018).

Tarbimisjärgsed tekstiilijäätmed on erinevat liiki rõivad ja kodutekstiil, mida enam ei vajata tulenevalt nende vananemisest, kahjustustest, tarbija suuruste või moetrendide muutumistest (Chavan, 2014). Selles kategoorias on suur osa kasutatud rõivastel, mis sisaldavad erinevaid materjale ja on looduses aeglaselt lagunevad. Selliste jäätmete ladestamine võtab palju ruumi ning nõuetekohase jäätmekäitlusega tekitab mitmeid keskkonnaprobleeme nagu kahjurite ja nakkushaiguste levik (Pensupa et al., 2017) ning saasteainete eraldumine põhjaveisse ja atmosfääri (Gadkar & Burji, 2015; Dissanayake et al. 2018).

Tekstiilide tootmiseks kasutatava toormaterjali võib omakorda jagada kolme peamisse gruppi: tsellulooskiud, proteiinkiud ja sünteetilised kiud (Ghaly, Ananthashankar, Alhattab & Ramakrishnan, 2014). Statistika järgi toodeti aastal 2017 kogu maailma tekstiilkiududest 64,2% nafta baasil valmistatud sünteetilisest kiust. Sellele järgnesid naturaalsed tselluloosi ja valgupõhised kiud: puuvillast toodetav kiud (24,1%), puidust toodetav tselluloosikiud (6,2%), muu naturaalne kiud (siid, lina, bambus jt, 4,4%) ning loomsest villast toodetav tekstiilkiud (1,1%) (Statista GmbH, kuupäev puudub). Kuigi puuvill, eriti orgaaniline puuvill, võib tunduda mõistliku valikuna, tähendab see ikkagi ainult ühe T-särgi ja paari teksapükste tootmiseks veekulu ligikaudu 19 000 liitrit. Keemiliste kangakiudude tootmine on probleemne saastamisastme ja jätkusuutlikkuse lähtekohast (Sweeny, 2015). Joonisel 1.1 on järjestatud naturaalsest ja keemilisest kiust erinevate tekstiilide tootmisega kaasneva saaste hulk ja protsesside mõju keskkonnale.



Joonis 1.1. Tekstiilmaterjalide järjestus nende tootmise mõju järgi keskkonnale (Chapman & Hollins, 2010)

Tekstiilkiudude tootmise ning rõivatööstuse (koos tarbimise ja tekkinud jäätmete prügilatesse ladestamisega) globaalse keskkonnamõju kvantifitseerimine (tabel 1.1) on selgelt tõestanud, et võimaluste leidmine selliste materjalide ringlusesse suunamiseks ja kasutusea pikendamiseks, prügilatesse ladestamise ning põletamise asemel, on olulise tähtsusega (Echeverria et al. 2019).

Keskkonnamõjude indekseerimise järgi on võimalik välja arvestada erinevat liiki tekstiilkiudude tootmiseks ja neist valmistatud materjalide elutsükliks kuluvate ressursside ja kaasnevate mõjude hulk tervikuna. Nii on näiteks energiakulu säästmise perspektiivist erinevate uuringute autorid toonud esile levinuimate tekstiilkiudude ringlusevõtu eelised võrreldes nende põletamisega või prügilatesse ladestamisega (Muthu et al., 2012; Textile Exchange, 2016; Mitsubishi Chemical Corporation, kuupäev puudub).

Tabel 1.1. Peamiste tekstiilkiudude tootmise ja käitlemise mõju keskkonnale (Echeverria et al. 2019)

	<b>Puuvill</b>	<b>Vill</b>	<b>Polüester</b>	<b>Nailon</b>
Tooraine/Päritolu	Taimne	Loomne	Nafta	Nafta
Tootmisharu	Põllumajandus	Lambakasvatus	Toornafta kaevandamine	Toornafta kaevandamine
Polümeer	$\alpha$ -tselluloos	$\alpha$ , $\beta$ -keratiin	Polüetüleen-tereftalaat (PET)	Polüamiid
Kiutootmise osakaal maailmas, %	33	1,5	51,5	5

Tabel 1.1 järg

	Puuvill	Vill	Polüester	Nailon
Ülemaailmse rõivatööstuse keskkonnamõju osakaal, %	27	1,3	55	4,7
Materjali tootmise ökoloogiline mõju tervikuna, Pt*	0,001	604	7,9	16,2-20,2
Prügilatesse ladestamise ökoloogiline mõju, mPt*	77,5	77,5	77,5	89,7
Kiu tootmise energiakulu, MJ/kg	55	63	125	250
Kiu tootmise veekulu, L/kg	7 000-29 000	130-165	62	185-663
Kiu tootmise vs prügilatesse ladestamise CO <sub>2</sub> emissioon ühe kg kiu kohta, CO <sub>2</sub> eq	0,4-700	86-700	2,8-700	8-89,7

\*Pt ja mPt on ökoindikaatorite ühikud ja väärtused. Omadustest lähtuvalt on standardised ökoindikaatori väärtused, sarnaselt valuutaühikutele, dimensioonideta. Eco-99 süsteemis nimetatakse mõõtühikut ökoindikaatori punktiks, mis jaotatakse omakorda 1000-ks millipunktiks (mPt). Mõõtühikute eesmärk on alternatiivsete materjalide, toodete ja protsesside võrdlemine.

Tabelist on näha, et tekstiilkiu toormaterjalist tootmisega seonduv ökoloogiline mõju võrreldes prügilatesse ladestamisega kaasnevast mõjust on vähemolulisem vaid villakiudude puhul. Ühe kilogrammi toormaterjalist uute tekstiilkiudude tootmiseks vajamineva energia- ja veekulu sääst võrreldes tekstiilkiudude taaskasutamiseks kuluva energia- ja veekuluga on hinnanguliselt vastavalt 493 MJ/kg ja 29,890 l/kg (Echeverria et al. 2019).

Kahtlemata aitaks tekstiilijäätmete suurem ringlussevõtt oluliselt panustada mitmete majanduslike, keskkondlike- ja sotsiaalsete probleemide lahendamisse, kuid kiiresti suurenevate mahtude juures on hetkel pigem süvenemas probleem, mida kasutatud rõivaste ja kodutekstiilidega peale hakata.

## 1.2 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemise peamised probleemid

Tekstiilijäätmed on materjal, mida on võimalik erinevaks otstarbeks korduvalt uuesti kasutada (Briga-Sá et al., 2013). Hinnanguliselt saaks kuni 95% tekkivatest tekstiilijäätmetest ringlusesse tagasi suunata (Dissanayake et al. 2018). Ometi on tänane reaalsus see, et ümbertöötlemisse jõuab vaid 15,3% kõigist tekkivatest tekstiilijäätmetest (National overview: facts and figures on materials, wastes and recycling, kuupäev puudub). Suuremates kogustes tekstiilijäätmete taaskasutamist lähteainena uuteks rakendusteks piiravad hetkel veel kasutada olevad ümbertöötlemise tehnoloogiad ja kulutõhususe puudumine (Echeverria et al. 2019).

Tekstiilmaterjalide ümbertöötlemise tehnoloogiate arendamine on olulise tähtsusega, et vähendada uute tekstiilkiudude toormaterjalist tootmist, kasutatud tekstiilijäätmete prügilasse

sattumist ning soodustada väärtuslike ressursside taaskasutamist (Close the Loop, 2019). Hetkel seisneb peamine probleem selles, et tekstiilitooted ei ole kavandatud ümbertöötlemiseks sobivaks. Enamik igal aastal toodetavast 400 miljardist ruutmeetrist kangast ja 80 miljardist rõivaesemest on valmistatud ja disainitud viisil, mis ei ole ringluseks sobilikud (Schuch, 2017). Siiani ei ole seda lähtekohta peetud piisavalt oluliseks ning majandusliku kasusaamise eesmärgil on rõhuasetus pigem soodsa omahinnaga masstoodangu levitamisel. Just toodete omahinna alandamiseks ja kasutusmugavuse tõstmiseks on panustatud ka uute ja segatud tekstiilkiudude arendamisse, mis tekstiilijätmete ringlussevõttu veelgi keerulisemaks muudavad.

Mõistagi on tekstiilmaterjalide ümbertöötlemise kitsaskohti teisigi. Mistra Future Fashion juhtimisel läbiviidud uuringus (Elander & Ljungkvist, 2016) on tootmise ja ümbertöötlemisega tegelevad ettevõtted välja toonud olulisemad tõkked, mis pärsivad tekstiilijätmete tõhusat ringlussevõttu. Ühtekokku toodi uuringus välja 46 erinevat aspekti, millele peaks tekstiili- ja rõivatööstuse toodangu disainimise ja arendusprotsesside juures tähelepanu pöörama, et võimaldada selliste jätmete efektiivsem ümbertöötlemine.

Uuringu kohaselt on peamised kitsaskohad järgmised (*Ibid.*):

- Erinevate materjalide segudest koosnevaid tekstiilijätmeid suunatakse täna ümbertöötlemisse veel väga vähesel määral, sest erineva koostisega tekstiilkiudude eraldamiseks kulub energia ja teadustöö ei ole majanduslikult tasuv. Mida homogeensem on materjal, seda suuremal määral leiab see ka tee tagasi ringlusesse.
- Rõivaesemete muudest materjalidest lisandid, näiteks lukud ja nõöbid, raskendavad ja aeglustavad ringlussevõtu protsessi.
- Rõivamaterjalist erineva koostisega õmblusniitide kasutamine on samuti asjaolu, mis mõjutab ringlusesse suunamise protsessi kiirust ja tõhusust.
- Värv- ja viimistlusainete, trükiste ning toksiliste kemikaalide kasutamine muudab ümbertöötlemisprotsessi keerulisemaks.
- Vajalik on muuta materjalide ringlusesse suunamise ettevalmistamise protsessid (kogumine, koostise identifitseerimine ja sorteerimine) lihtsamaks ja tõhusamaks. Tänapäeval toimub sorteerimisprotsess peamiselt käsitsi ning arvestades tekstiilijätmete hulga kasvavat trendi, ei ole see jätkusuutlik. Lahenduseks on tekstiilitoodete koostise nõuetekohane märgistamine ja ümbertöötlemisprotsessideks ettevalmistavate faaside automatiseerimise arendamine.

- Ümbertöötlemisprotsessid on limiteeritud ning puudub ka laiem motiveeritus vajalike investeeringute tegemiseks. See tingib olukorra, kus suurte koguste tekstiilmaterjalide ümbertöötlemiseks puuduvad tõhusad tööstuslikud protsessid ning materjali olemusringi ei suudeta sulgeda.
- Puudub nõudlus ümbertöödeldud materjalide järele. See on seotud asjaoluga, et toorainest toodetud esmaste materjalide turuhind on endiselt väga madal.

Eeltoodud väljakutsetega tegelemiseks on küll viimastel aastatel tehtud jõupingutusi ning mitmete uuringute tulemustena (Palme et al., 2017; Peterson, 2015) on teatatud ka uutest ümbertöötlemistehnoloogiatest. Näiteks tselluloosi ekstraheerimisest segatud kiududest tekstiilmaterjalides ja tekstiilijäätmete sorteerimise automatiseerimine. Siiski oleks suur osa nendest takistustest juba lahendatavad ka arendustega tekstiilitoodete disainimise protsessides, mille raames on ettevaatavalt võimalik arvestada toodete võimalikult tõhusa ümbertöötlemisega. Küsimus on peamiselt soovis neis etappides midagi muuta, sest see tooks kaasa olulised muutused ka ärimudelites, mis on üles ehitatud võimalikult odavast toorainest masside tootmisele.

### **1.3 Tekstiilijäätmete teke ja probleemistik Eesti Kaitseväes**

Eesti Kaitseväes muutub erinevatel andmetel aastast keskmiselt 30-50 tonni individuaalvarustust kasutuskõlbmatuks. Individuaalvarustuse alla kuuluvad eraldusmärgid, vormiriietus, riidevarustus ja lahinguvarustus (Kaitseväeteenistuse seadus, 2012). Kasutuskõlbmatuks muutunud varustus antakse üle jäätmekäitlejale ning selle utiliseerimise eest tasub Kaitsevägi 0,24 eurot ühe kilogrammi kohta.

Kogutud jäätmed põletatakse energia tootmiseks. Vaid hinnanguliselt 1%-le tekstiilijäätmetele leitakse rakendus organisatsiooni siseselt puhastuslappidena, õppeotstarbeliste mannekeenide täiteainena ja maskeerimisvõrkude valmistamisel. Ülejäänud jäätmete utiliseerimine toimub riigihanke tulemusena parima pakkumuse teinud ettevõtte kaudu, kellele tasutakse teenuse eest Eesti Kaitseväe eelarvest. Selline utiliseerimise viis on valitud just seetõttu, et Kaitseväe tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks on seatud rida piiranguid, et tagada Kaitseväe vormiriietuse ja eraldusmärkide sihtotstarbeline kasutamine. Kaitseväe hinnangul oleks mõistlikum



suunata nimetatud varustus taaskasutusse, säästes sellega loodusressursse ning Kaitseväe eelarvelisi vahendeid.

Hetkel kehtiva õigusliku regulatsiooni kohaselt kehtestab kaitseväelaste riide- ja lahinguvastuse käitlemise ja kandmise korra Kaitseväe juhataja. Samas võeti 29. juunil 2018 vastu Kaitseväeteenistuse seaduse muudatus (Relvaseaduse, strateegilise kauba seaduse, lõhkematerjaliseaduse ja teiste seaduste muutmise seadus, 2018), mille kohaselt on valdkonna eest vastutaval ministril õigus määrusega kehtestada kaitsevälase vormiriietuse demilitariseerimise nõuded. See annab võimaluse sobivate alternatiivsete taaskasutusvõimaluste korral reguleerida kasutuskõlbmatuks muutunud individuaalvarustuse jäätmekäitlust, et suunata see põletamise asemel ümbertöötlemisse.

Tekkivate jäätmete hulk on võrdlemisi suur ning Eesti Kaitsevägi on võtnud eesmärgiks leida lahendusi individuaalvarustuse taaskasutamiseks, lähtudes varustuse valmistamisel kasutatud materjalide erinevast keemilisest koostisest. Ühtlasi ollakse ka huvitatud ettepanekutest kehtiva õigusliku regulatsiooni muutmiseks, et võimaldada Kaitseväl suunata rohkem individuaalvarustust taaskasutusse.

Nii on viimase paari aasta jooksul Eestis läbi viidud mitu uuringut, milles Kaitseväes tekkivate jäätmete hulka on püütud kaardistada ning pakkuda ka lahendusi selliste jäätmete taaskasutamiseks. Viimase kahe aasta jooksul läbiviidud uuringuteks on:

- Alice Andressoo, Tallinna Tehnikaülikool. 2017. „Kaitseväe varustuse ümbertöötlemine ja taaskasutus“. Bakalaureusetöö, mille eesmärgiks oli kaardistada Eesti Kaitseväes tekkivad tekstiiljätmed ja pakkuda välja lahendusi tekkinud jäätmete ümbertöötlemiseks ja taaskasutuseks (Andersoo, 2017).
- Kristi Suup, Tallinna Tehnikakõrgkool. 2018. „Kaitseväe rõivastuse käitlemise võimalused lähtuvalt ringmajanduse mudelist“. Lõputöö, mille eesmärgiks oli anda ülevaade Kaitseväes tekkivatest rõivajääkidest ning selle lahendamiseks vajalikest muudatustest nii regulatsioonide kui organisatsioonide tasandil (Suup, 2018).
- Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku Disaini Labor, Tallinna Ülikooli ja Eesti Kaitsetööstuse Liit. 2018. „Uued tooted tekkivatest jäadetest“. Projekt, mille käigus kaardistati Eesti kaitsetööstuse tootmisjäätmete hulk ja nende käsitlemise viisid ning katsetati jätkusuutlikke disainimeetodeid (Maripuu, 2018).

Eeltoodud uuringute miinuseks on aga väljapakutud lahenduste rakendamise probleem. Kõigi tööde puhul on peamise lahendusena välja toodud jäätmete ümberdisainimine uuteks toodeteks, mis on probleemne just seetõttu, et kasutatakse kokkuvõttes ära vaid väga väike osa aasta jooksul tekkivate jäätmete kogumahust. Käesoleva töö erisuseks on jäätmete ümbertöötlemine kiudude tasandil, mis ühelt poolt lahendab vormiriietuse ja eraldusmärkide väärkasutamise probleemi ning teisalt loob oluliselt rohkem võimalusi jäätmete kasutamiseks uute toodete lähtematerjalina.

## 2. TEKSTIILJÄÄTMETE ÜMBERTÖÖTLEMISE VÕIMALUSED

Tekstiiltoodete kiuline struktuur annab ühest küljest taaskasutamiseks mitmeid võimalusi, kuid teisalt muudab erinev kiuline koostis ümbertöötlemise äärmiselt keeruliseks. Ringlussevõtu kasumlikuks muutmiseks tehakse jätkuvalt jõupingutusi, et arendada tekstiilijäätmete sorteerimissüsteeme ja luua uudseid disainilahendusi (Chavan, 2014) ning regenereerida tekstiilkiude molekulaarsel tasandil. Eesmärgiks on jõuda tekstiiltoodete olelusringi sulgemiseni (ingl k *closing the loop*). Tekstiilmaterjale ümbertöötlemisel suletud olelusringis kasutatakse ringlussevõetud kiude uuesti ja uuesti, kuni need muutuvad lõpuks looduses biolagunevateks jäätmeks (Braham, 2017). Selleks, et liikuda jäätmete prügilapõhiselt lähenemiselt ressursside pideva taaskasutamiseni, on vaja väga täpseid teadmisi nii jäätmete koostisest, kui ka nende kogumise ja rakendusvõimaluste protsessidest (Adeniran, Nubi, & Adelopo, 2017).

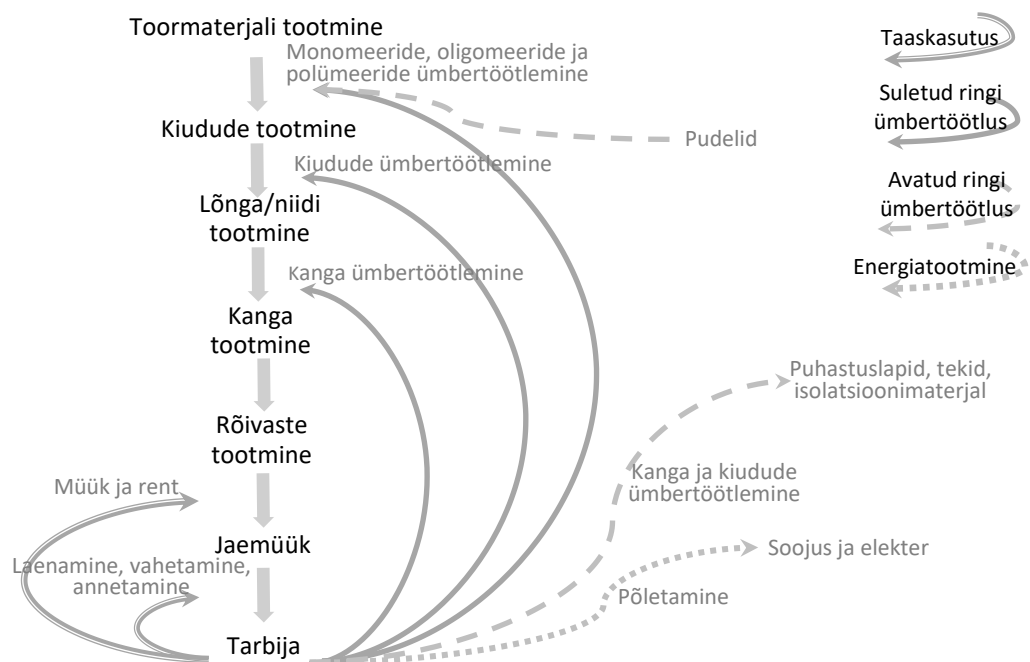
Wang (2006) on jäätmete ringlussevõtu tehnoloogiad jaganud nelja kategooriasse:

- primaarsed ehk jäätmete algse vormis ringlussevõtuga seotud tehnoloogiad;
- sekundaarsed ehk tehnoloogiad, mis on seotud uute, kuid madalamate keemiliste või mehaaniliste omadustega, toodete valmistamisega läbi plastjäätmete sulatamise;
- tertsiaarsed ehk tehnoloogiad, mis hõlmavad pürolüüsi ja hüdrolyüüsi, et muundada plastikul põhinevaid jäätmekemikaalideks, monomeerideks või kütusteks;
- kvaternaarsed ehk tehnoloogiad, mis on seotud põletamisega soojuse tootmiseks.

Sõltuvalt jäätmete koostisest ja tekkimise momendist võivad eelnimetatud tehnoloogiad varieeruda üksikpolümeeri töötlemisest kuni mitmest erinevast materjalist koosnevate jäätmekomplekside töötlemiseni. Seejuures on selge, et ühetüübilisel polümeeril põhinevat jäätmekompleksi on ümber töödelda tunduvalt lihtsam kui polümeerimaterjalide segul põhinevaid jäätmekomplekse (Wang, 2010). Lisaks on suurem osa tekstiilijäätmetest erineva suuruse, kuju, koostise ja omadustega, mistõttu on sellise jäätmeliigi ringlussevõtuks sobivate tehnoloogiate leidmine äärmiselt keeruline (Briga-Sá et al., 2013).

Gustav Sandin ja Greg M. Peters on 2018. aastal koostanud ülevaate, mille raames koguti kokku 41 uuringu tulemused tekstiilmaterjalide taaskasutamise ja ümbertöötlemise valdkonnas. Kokkuvõtte on tellitud Mistra Tulevikumoe uuringute programmi (*Mistra Future Fashion research programme*) Trash-2-Cash raames, et seada eesmärgid tekstiilijäätmete ringlussevõtu edendamiseks vajalike tulevaste uuringute koostamiseks.

Ülevaatesse kaasatud publikatsioonides käsitletud tekstiilide taaskasutamise ja ümbertöötlemise erinevaid suundi iseloomustab joonis 2.1.



Joonis 2.1. Tekstiilide taaskasutamise ja ümbertöötlemise erinevad suunad (Sandin & Peters, 2018)

Ülevaatesse kaasatud publikatsioonide nimekiri koos märkega, kas tegemist on taaskasutuse või ümbertöötlemise uuringuga, ning millist tüüpi materjali on uuringus käsitletud, on toodud lisa 1.

Tulemustest on näha, et ümbertöötlemist käsitlevates uuringutes on põhiliseks teemaks kiudude ümbertöötlemine (57%), sellele järgneb polümeeride/oligomeeride ümbertöötlemine (37%), monomeeride ümbertöötlemine (23%) ja kangaste ümbertöötlemine (14%). Kiudude uurimise sagedus on ilmselt tingitud asjaolust, et see on kõige levinumaks ümbertöötlemise suunaks ja kasutatakse nii madalamale väärtusele (ingl k *downcycling*) ümbertöötlemiseks, kui ka tekstiilist-tekstiiliksi (ingl k *textile-to-textile*) ümbertöötlemiseks (näiteks puuvilla või villa jäätmetest uue lõnga taas-ketramine) (Sandin & Peters, 2018).

Puuvill oli seejuures kõige enam uuritud materjal (käsitletud 76% uuringutes) nii taaskasutuses kui ümbertöötlemises, sellele järgnes polüester (63%), viskoos (25%) ja vill (20%). Polüestri ja puuvilla uuringute ülekaalus peegeldab nende kiude domineerimist turgudel, hõlmates vastavalt 51% ja 24% maailmaturust (Lenzing, 2018; The Fiber Year, 2015).

Uuringute tulemustest saab järeldada, et ümbertöötlemise panus kiudude tootmismahutude kasvu võib globaalses kontekstis aidata lahendada kasvavat kiudude nõudluse probleemi ja seeläbi vähendada ka nende hinda. Teisest küljest võib aga väita, et tekstiilide ümbertöötlemisega loodud

eelised „tasakaalustab“ ära jätkuvalt kasvav tarbimine. Seega sõltub ümbertöötlemise ja taaskasutamise asendumäära piisavus lõppkokkuvõttes ikkagi tekstiilkiudude nõudluse hinnaelastsusest. Samuti selgub vaadeldud publikatsioonide tulemustest, et vajalik on keskenduda erinevate kiudude, materjalide ja toodete asendumäära uurimisele erinevates geograafilistes piirkondades, et tulemusi oleks võimalik üheselt rakendada tekstiilide taaskasutamise ja ümbertöötlemise keskkonnamõju uuringutes. Lisaks juhitakse vaadeldud uuringutega küll tähelepanu mitmetele tekstiilitööstuse keskkonna-alastele probleemidele, mida taaskasutamise ja ümbertöötlemise süsteemide juurutamisel tuleks arvestada, kuid samas peaksid analüütikud arvestama ka tervikuna ümbertöötlemise elutsükleid, kaaluma kogumise ja sorteerimise protsesse ning teisi asjakohaseid mõjusid, ja selle valguses selgemalt kirjeldama analüüsides kasutatavaid meetoodilisi valikuid ja eeldusi. Vastasel juhul ei pruugi analüüside ja uuringute tulemused olla edasiste strateegiate koostamiseks piisava usaldusväärsusega.

Järgnevates alapeatükkides vaadatakse ülaltoodud uuringute baasilt lähemalt erinevaid levinud tekstiilijäätmete ümbertöötlemise tehnoloogiaid ning kirjeldatakse ka alles väljatöötamise faasis olevaid uudseid lähenemisi, mis võiksid aidata lähitulevikus lahendada massiliselt kasvava tekstiilijäätmete olelusringi sulgemise probleemi.

## **2.1 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemisega seonduv terminoloogia ja mõisted**

Tekstiilijäätmete temaatika käsitlemisel on mõistete ja lähenemise selguse huvides oluline võimalikult täpselt eelnevalt määratleda valdkonnaga seonduvad terminid, et erinevate protsesside ja tehnoloogiate kirjeldamisel vältida eksitavaid arusaamasid nii rahvusvaheliselt kui emakeeleliselt kasutusel olevate nimetuste tähendustega. Alljärgnevalt on välja toodud tekstiilijäätmetega seonduvad levinumad terminid ja nende mõistete tähendus antud töö kontekstis.

**Ringlussevõtt, ümbertöötlemine, kordus-, taas- ja uuskasutus.** Tekstiilijäätmete ringlussüsteemis võib eristada kolme erinevat mõistet: ringlussevõtt või ümbertöötlusprotsess (ingl k *recycle*), kordus- või taaskasutus (ingl k *reuse* või *repurpose*) ja väärtust lisav uuskasutus (ingl k *upcycle*). Et vaadelda lähemalt erinevaid tehnoloogiaid ja süsteeme, on vajalik eelnevalt täpsemalt selgitada nende terminite olemust.

Mõiste ringlussevõtt või ümbertöötlus viitab protsessile, mille käigus kogutakse jäätmed, mis sobivad korduskasutamiseks ning suunatakse need edasiseks töötluseks, et valmistada uusi tooteid või materjale. Termin kordus- või taaskasutus on jäätmete algsel kujul taaskasutamine uutel eesmärkidel.

Väärtust lisav uuskasutus tähendab protsessi, mille käigus jäätmetena käsitletavaid esemeid kasutatakse nende algmaterjali koostist muutmata, et luua neist tooteid, mille väärtus on samaväärne või suurem kui kasutuselt kõrvaldatud originaalmaterjalil. Tavaliselt on selleks rõivaesemete või tekstiilmaterjali ümberdisainimine, et pikendada materjali olerusringi seda ümbertöötlemata. See aitab luua uusi tooteid väiksema ressursikuluga võrreldes ressursiga, mis kuulub nende jaoks uute materjalide tootmisele.

Kirjanduses kasutatakse ka terminit väärtust kahandav uuskasutus (ingl k *downcycling*), mille all peetakse silmas tekstiilijäätmete taaskasutamist väärtusahela madalamatel tasemetel, näiteks täitematerjali või isolatsioonina.

**Mehaaniline, keemiline ja termiline ümbertöötlemine.** Tänapäeval on tekstiilmaterjalide ümbertöötlemiseks kaks peamist viisi: mehaaniline (inglise k *mechanical*) ja keemiline (ingl k *chemical*) ümbertöötlemine. Harvemini räägitakse ka termilise (ingl k *thermal*) ümbertöötlemise protsessidest. Enamikel juhtudel on tegemist lihtsustatud klassifitseerimisega, sest tegelikkuses hõlmab ümbertöötlemise protsess sageli nii mehaanilist, keemilist, kui ka termilist etappi. Näiteks keemiline ümbertöötlemine viitab kõige sagedamini ümbertöötlemise protsessile, mille käigus polümeerid depolümeriseeritakse (näiteks polüestri või teiste sünteetiliste polümeerkiudude saamine naftast) või lahustatakse (selliste looduslike või sünteetiliste tsellulooskiudude saamiseks nagu puuvill ja viskoos). Nii viiakse aine molekulaarsele tasandile, monomeerid või oligomeerid repolümeriseeritakse ja polümeerid kedratakse uuteks kiududeks. Enne depolümeriseerimist või lahustamist töödeldakse ümbertööteldavat materjali enamasti ka mehaaniliselt. Mehaanilise ümbertöötlemise alla arvatakse aga näiteks ka polüetüleentereftalaat (PET) helveste või graanulite kiududeks ümbertöötlemist kuumsulatusmeetodil, sest peened helbed, graanulid või laastud on PET-jäätmetest toodetud mehaaniliselt (Shen, Worrell, & Patel, 2010).

Terminit „termiline ümbertöötlemine“ aetakse sageli segamini ka termilise taaskasutamisega, mis on tekstiilijäätmete põletamine soojuse ja/või elektrienergia tootmiseks (Schmidt, Watson, Roos, Askham, & Poulsen, 2016). Veel keerulisemaks muutub olukord, kui ümbertöötlemise termini all räägitakse energia taaskasutamisest, kuigi harjumuspäraselt kasutatakse seda enamasti

materjalide ümbertöötlemise kohta. Seega on ümbertöötlemise protsesside süstematiseerimine ja kategoriseerimine mehaaniliseks, keemiliseks ja termiliseks ebamäärane ja küsitav.

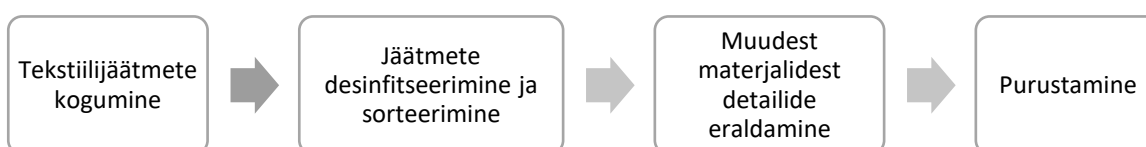
Käesolevas töös lähtutakse protsesside klassifitseerimisel ja kirjeldamisel nende nn „lahtivõtmise“ tasemest. Kui tekstiilmaterjal suunatakse algsel ehk purustamata kujul uuele kasutusele teise tootena, nimetatakse seda taaskasutamiseks. Kui tekstiiliks toodetud materjal võetakse lahti ehk purustatakse, kuid säilitatakse selle originaalkiud, nimetatakse seda mehaaniliseks ümbertöötlemiseks. Kui ümbertöötlemisse suunatud tekstiilmaterjali kiud purustatakse ja lahustatakse, kuid säilitatakse polümeerid või oligomeerid või kui polümeerid/oligomeerid lahustatakse ja säilitatakse monomeerid, nimetatakse seda keemiliseks ümbertöötlemiseks.

**Tekstiilmaterjalide suletud olelusring ja avatud ümbertöötlus.** Üheks võimaluseks tekstiilijäätmete massi vähendada, on nende olelusring sulgeda. Suletud olelusringis on taaskasutamine (ingl k *closed-loop recycling*) toodete katkematu ringlus, hoides korduskasutuse või ümbertöötlemise abil materjalid pidevalt kasutuses.

Mõiste „avatud ümbertöötlus“ (ingl k *open recycling*) on tekstiilijäätmete mehaanilise või keemilise ümbertöötlemise protsess, mille käigus kangas „avatatakse“ ehk purustatakse, et saavutada selle algne, kiuline vorm (Recycling in Textiles, 2006). Taoliste ümbertöötlemise protsesside läbiviimiseks on erinevaid võimalusi ning sageli kombineeritakse selleks omavahel mehaanilised, keemilised ja termilised protsessid. Ka antud töös käsitletakse tekstiilmaterjalide keemilise ümbertöötlemise all otseselt või kaudselt kõiki kolme protsessi.

## 2.2 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks ettevalmistamine

Sõltumata valitud tekstiilijäätmete ümbertöötlemise viisist (mehaaniline või keemiline ümbertöötlemine), on esmatähtsaks jäätmete eeltöötlus ning ümbertöötlemiseks ettevalmistamine. Lihtsustatult võib selle protsessi jagada järgmisteks etappideks:



Joonis 2.2. Tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks ettevalmistamise etapid

Järgnevides alapeatükkides käsitletakse lähemalt protsessi erinevaid etappe ja nende olulisemat probleemistikku.

### 2.2.1 Tekstiilijäätmete kogumine

Tekstiilijäätmete taaskasutamiseks, ümbertöötlemiseks, põletamiseks või prügilatesse ladestamiseks on vajalik need käitluseks eelnevalt kokku koguda. Erinevates riikides üle maailma rakendatakse jäätmete kogumiseks mitmeid erinevaid viise, mis sõltuvad omakorda sellest, kas tegemist on tarbimiseelsete või tarbimisjärgsete tekstiilijäätmetega ning kuidas on jäätmekogumissüsteem õiguslikult reguleeritud. Enamjaolt tegelevad tekstiilijäätmete kogumise ja käitlemisega riigi- või erasektori ettevõtted ning heategevusorganisatsioonid.

Tekstiilitööstuse tootmisjääkide ehk tarbimiseelsete tekstiilijäätmete, mida on hinnanguliselt 12% kogu tootmisetapis kasutatavast materjalist (A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future, 2017), ümbertöötlemiseks kokku kogumine on valdavalt tootmisettevõtete enda korraldada. Sõltuvalt riigist ja selles valitsevast keskkonnateadlikkusest püütakse juba tootmisettevõtte poolt jäätmetele leida uusi rakendusi kõrvaltoodetena või antakse need üle jäätmekäitlusettevõtetele. Tarbimiseelses faasis tekkinud jäätmeid ehk nn „puhtaid tekstiilijäätmeid“ on võrreldes tarbimisjärgsete jäätmetega oluliselt lihtsam ja odavam ümbertöötlemiseks ja -disainimiseks kasutada. Seetõttu on järjest kasvavale tekstiilijäätmete ümbertöötlemise probleemistikule tähelepanu juhtimiseks ja ringmajanduse mudeli juurutamiseks viimastel aastatel tehtud selles sektoris erinevaid algatusi ja arendusi. Nendeks on erinevate veebipõhiste platvormide loomine, koostöövõrgustike stimuleerimine, jäätmevaba (ingl k *zero waste*) tootmismudelite juurutamine, jm., et viia ühelt poolt kokku ülejääkidest vabaneda soovivad tootmisettevõtted ja teisalt disainerid, kes tarbimiseelsetest jääkidest uusi tooteid loovad. Selliselt on ettevõtetel võimalik põletusse suunatava ning prügilatesse ladestatava jäätmete hulka mõnevõrra vähendada.

Tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete levinuimateks kogumise viisideks on tekstiili- ja rõivakogumispunktid ja –konteinerid ning ükselt-uksele kogumine. Ellen McArthur Foundation (A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future, 2017) poolt juhitud uuringus on välja toodud seitse põhilist tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete kokku kogumise viisi (tabel 2.1), mis varieeruvad erinevates riikides üle maailma. Uuringus toodi välja, et kui näiteks Suurbritannias ja Saksamaal on tarbijal võimalik valida vähemal või suuremal määral kõigi tabelis toodud kogumisviiside vahel, siis



paljudes teistes riikides puudub riiklikul tasemel organiseeritud tekstiilijätmete kogumise süsteem täielikult, mis muudab tekstiilijätmete ringlusse suunamise väga keeruliseks või sootuks võimatuks.

Tabel 2.1. Tarbimisjärgsete tekstiilijätmete kogumise viisid (A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future, 2017)

Kogumise viis	Kirjeldus	Näited	Eelised	Puudused
<b>Olmejäätmete kogumine</b>	Rõivaesemed ja tekstiilijätmed kogutakse kokku koos olmejäätmetega	Enamikes riikides	Mugavaim kogumisviis Laialdaselt rakendatav	Tekstiilmaterjal on segatud teiste jäätmeliikidega ning vajab eraldi sorteerimist ja puhastamist
<b>Üksikud teede- ja tänavateäärsed kogumiskampaaniad</b>	Mittevajalikud rõivad jäetakse äravedamiseks teede või tänavate äärde	Mõningad haldusüksused näiteks USAs, Suurbritannias ja Hiinas	Laialdaselt rakendatav	Eraldi logistika
<b>Ukselt-uksele kogumine</b>	Tellitav kullerteenus tekstiilijätmete äraviimiseks	British Heart Foundation	Mugavaim viis tarbijale Võimalik kombineerida renditud riideesemete tagastussüsteemiga	Suur koormus ja keeruline logistika kogujatele
<b>Piirkondlikud kogumiskonteinerid</b>	Piirkondlikud konteinerid tekstiilijätmete äraviskamiseks	Punane Rist, TEXAID, jt	Mugav viis kui konteinerite võrgustik on lai Laialdaselt rakendatav	Eraldi logistika
<b>Firmarõivaste tagastamise võimalused</b>	Tarbijad saavad mittevajalikud firmarõivad tagastada tootjale	Patagonia, Eileen Fisher	Võimalik kombineerida teiste ringmajandust toetavate stiimulitega	Tarbijal tuleb esemed eraldi postitada
<b>Kaupluste tagastuspunktid</b>	Tarbijad saavad mittevajalikud rõivad tagastada müüjale	H&M, Zara	Võimalik kombineerida teiste ringmajandust toetavate stiimulitega Laialdaselt rakendatav	Eraldi logistika
<b>Heategevuskaupluste kogumispunktid</b>	Tarbija annetab esemed heategevuskauplusesse	Oxfam, Punane Rist, British Heart Foundation	Tõhus Laialdaselt rakendatav	Eraldi logistika

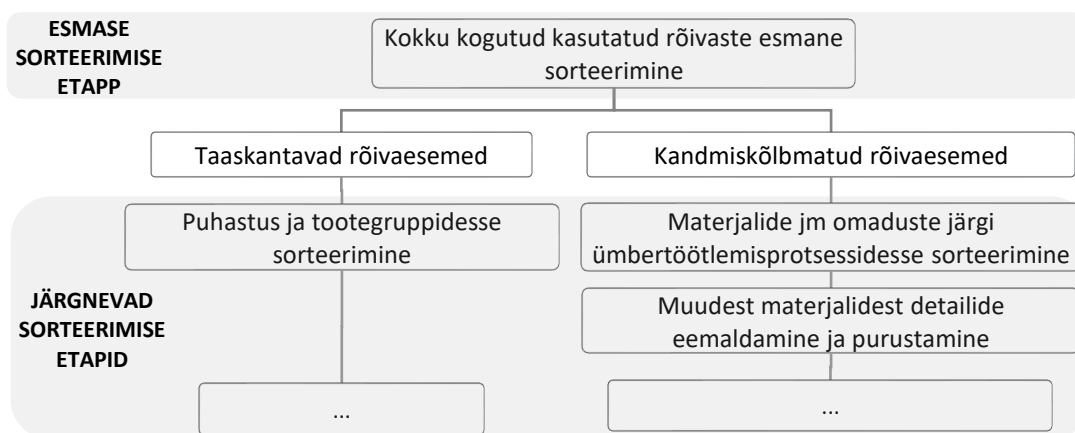
Eestis on riiklikul tasandil reguleeritud kodumajapidamistes tekkivate tekstiilijätmete kogumine olmejäätmetega segatult ning tööstuses tekkivad jäätmed liigitatakse tootmisjäätmete hulka. Seega ei ole hetkel seaduse järgi kohustust tekstiilijätmeid muudest jäätmetest eraldada. Küll aga on Euroopa Komisjon otsustanud tarbimisjärgsete tekstiilijätmete paremaks ringlusesse suunamiseks luua eeldused jäätmeliikide eraldi kogumise reguleerimisega. Selleks kehtestati liikmesriikidele nõude alates 01.01.2025 koguda tekstiilijätmeid olmejäätmetest eraldi. Jäätmeliiki eraldi kogudes püütakse võimalikult suures ulatuses vältida jäätmetöötlust, millega ressursid satuvad jäätmehierarhia madalamatele tasemetele.

Hetkel tegelevad Eestis kasutatud rõivaste ja tekstiilijäätmete kogumisega mitmed mittetulundusühingud ja äriühingud, et panustada taaskasutuse ja ümbertöötlemise määra tõstmisse. Suurimateks on MTÜ Uuskasutuskeskus ja Humana Estonia, kes koguvad tekstiilijäätmeid konteinerite, korjanduspunktide ja kaupluste võrgustiku kaudu. Seadusandlikul tasandil on vastavalt jäätmeseaduse § 73 lg 2-le vajalik tekstiilijäätmete ja kasutatud rõivaste kogumiseks ning ümbertöötlemiseks taotleda jäätmekäitlusluba, mis omakorda seab rea piiranguid ja muudab selliste algatustega tegelemise Eestis keerulisemaks.

## 2.2.2 Kogutud tekstiilijäätmete sorteerimine ja puhastamine

Tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete mass sisaldab erineva värvi, suuruse, koostise ja lisanddetailidega esemeid, mida on vajalik enne taaskasutuseks ja ümbertöötlemiseks suunamist mitmetes etappides sorteerida. Hinnanguliselt on kokku kuni 500 parameetrit, mille järgi on vajalik kokku kogutud kasutatud rõivaid ringlusse suunamiseks identifitseerida (Humpston, Willis, Tyler & Han, 2014). Lisaks on sõltuvalt jäätmete kogumise viisist vajadus ka nende puhastamise ja desinfitseerimise järele, seda eriti olukorras kui tekstiilijäätmeid kogutakse segatult olmejäätmetega.

Kasutatud rõivaste puhul on tavaliselt kogumise järgselt esimeseks sorteerimise etapiks nende jaotamine vastavalt seisukorrale taaskasutusse ja ümbertöötlemisele kuuluvatesse gruppidesse. Seejärel on omakorda vajalik kummaski grupis esemed sorteerida vastavalt kvaliteedile ja kandmisotstarbele või materjali liigile, omadustele ja seisukorrale (joonis 2.3).



Joonis 2.3. Tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete sorteerimisetapid

Tekstiilijäätmete sorteerimiseks on olemas erinevaid tehnoloogiaid. Kõige levinumaks ja tõhusamaks on hetkel veel endiselt manuaalne sorteerimine, mis on ainus viis andmaks sorteeritavatele esemetele ka vajalikku subjektiivset hinnangut. Erinevalt tehisintellektistist, on inimene on võimeline eristama, kas tegemist on kvaliteetse ja väärtusliku rõivaesemega (nn *vintage* rõivad), mida on võimalik suunata taaskasutusse, või on rõivaese sobilik vaid ümbertöötluks (Humpston et al., 2014). Automaatsed sorteerimissüsteemi on keeruline rakendada ka juhul, kui tegemist on mitmest erinevast materjalist koosnevate rõivaesemetega. Seetõttu saadetakse paljudes riikides kogutud tekstiilijäätmed arengumaadesse, kus sorteerimiseks ja ümbertöötlemiseks rakendatav tööjõud on odavam.

Automaatsete süsteemide arendamiseks rakendatakse erinevaid optilisi tehnoloogiaid, millest mõningad näited on toodud tabelis 2.2. Hetkel on üheks levinumaks süsteemiks tekstiilijäätmete selekteerimine kiulise koostise ja värvi järgi infrapunaspektroskoopia abil (Leblanc, 2018). Seesuguse tehnoloogia rakendamine on tõhusam peale esmase, kasutatud rõivaste manuaalselt läbiviidud, sorteerimise faasi.

Tabel 2.2. Tuntumad tekstiilijäätmete automaatsete sorteerimissüsteemide tootjad (Le, 2018)

<b>Ettevõtte/Organisatsioon</b>	<b>Tehnoloogia</b>
Valvan (Belgia, Holland, Suurbritannia)	FIBERSOFT lähi-infrapuna (NIR) spektroskoopia, tööstuslikult kasutatav sorteerimissüsteem kiirusega 1 ese sekundis
IVL Swedish Environmental Institute (Rootsi)	Optilistel sensoritel põhinev sorteerimissüsteem, mis tuvastab kiulise koostise
Telaketju (Soome)	REISKAtex, NIR spektroskoopiaal põhinev väheste parameetritega sorteerimissüsteem
HKRITA (Hongkong)	Sorteerimissüsteem, mis tuvastab värvid ning metallosad koos automatiseeritud ja targa konveierikontrolliga, sorteerimiskiirus 2 sekundit eseme kohta

Kõige efektiivsemaks automatiseeritud sorteerimissüsteemiks on hetkel kiudude tuvastamine lähi-infrapuna (NIR) spektroskoopia abil (Valvan Balin Systems, kuupäev puudub). Süsteemi peetakse võrreldes laialdasemalt kasutusel olevate Fourier infrapunaspektroskoopia (FTIR) seadmetega täpsemaks ning selle sorteerimise kiirus on võrreldes käsitsi sorteerimisega kuni kuus korda suurem. Siiski on operatsioonide läbiviimise eelduseks, et sorteeritavad jäätmed on puhtad ja sisestatakse liinile tuvastamiseks ükshaaval. 2017. aastal hinnati EL rahastatud uurimisprojekti *Trash-2-Cash* raames erinevaid NIR süsteemidel põhinevaid automaatsorteerimise seadmeid. Uuringute tulemustena toodi peamise puudusena välja, et mitte ükski seade ei suutnud tuvastada väiksemas koguses elastaani sisaldust tekstiilis ning erineva kiulise koostisega tekstiilide segusid esemete erinevatelt külgedelt (Wedin et al., 2017). Seetõttu on automaatsete

sorteerimissüsteemide edasiarendamine üheks väga oluliseks lähtekohaks tarbimisjärgsete tekstiilijätmete ringlussevõtu osakaalu suurendamisel.

Veel on olemas võimalused tarbimisjärgsete tekstiilijätmete sorteerimiseks tootja poolt paigaldatud identifitseerimismarkeeringute kaudu. Selleks kasutatakse nutikaid silte, millesse on salvestatud informatsioon toote koostise ja muu vajaliku teabe kohta. Hetkel on kasutusel raadiosagedussalvesti, triip- ja ruutkoodi abil tekstiiltoodete kiulise koostise ja omaduste tuvastamine (Humpston et al., 2014). Triip- ja ruutkoodide (ingl k *Quick Response Code* ehk *QR code*) puhul loetakse kaameraga sildil olev muster, mis dekodeeritakse arvuti abil. Raadiosagedustuvastuse silt (RFID, ingl k *radio-frequency identification*) on väike juhtmevaba kiip, mis kannab digitaalset infot ning erinevalt ribakoodist saadakse informatsioon skaneerimise asemel raadiolainete kaudu. Nanostruktuurseid RFID silte on tänu väikestele mõõtmetele ja uudsetele elastsetele materjalidele võimalik lihtsasti rõivaesemetesse paigaldada (Fibre2Fashion.com, 2018).

Mitmed riigid on kaalumas rõivaesemetele selliste markeeringute paigaldamise muutmist kohustuslikuks. See parandaks oluliselt tekstiilijätmete ringlussevõtu määra ja lihtsustaks ümbertöötlemise protsessi. Lisaks vähendaks ka vajadust infrapunaspetskoopia ja teiste tekstiilmaterjalide kiulise koostise tuvastussüsteemide arendamiseks vajalike investeeringute tegemist.

### **2.2.3 Muude materjalide separeerimine**

Rõivad ja muud tekstiilmaterjalidest prügisse suunatud esemed sisaldavad valdavalt erinevatest materjalidest lisandeid. Peamiselt on selleks rõivaesemete furnituur nagu nõöbid, trukid, lukud, öösid, sildid. Ümbertöötlemiseks suunatud tekstiilmaterjali ettevalmistamise käigus on reeglina vajalik selliste lisandmaterjalide eemaldamine, eriti kui on tegemist tugevatest materjalides detailidega, mis võiksid purustamise etapis kasutatavaid mehhanisme kahjustada või purustatud tekstiilmassi materjalide sisaldust edasiseks töötlemiseks mõjutada.

Selliste osade eemaldamine on jällegi peamiselt vaid manuaalselt teostatav (Humpston et al., 2014) ja aeganõudev protsess, mistõttu saadud materjali kasutamine madalama väärtusega otstarbeks ei ole majanduslikult otstarbekas. Üheks lahenduseks oleks rõivaste disainimine, milles ei kasutata mittetekstiilsest ja biolagunematust materjalist furnituuri või on furnituur rõivastele kinnitatud

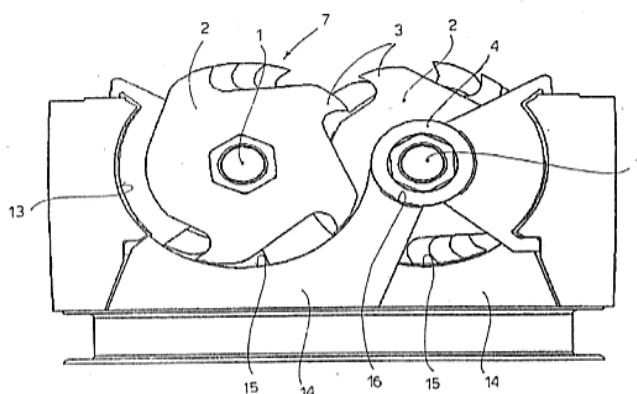
viisil, et seda oleks võimalikult lihtne eemaldada (A New Textiles Economy: redesigning fashion's future, 2017; Watson, Elander, Gylling, Andersson & Heikkilä, 2017; Motte & Palme, 2018).

Lisaks on võimalik muude materjalide eemaldamine ka purustamisprotsessi käigus tsentifugaaljõudu rakendades, kuid hetkel teadaolevalt seesugust meetodit tekstiilijäätmete käitlemisel ei kasutata. Põhjuseks on asjaolu, et spetsiaalselt tekstiilmaterjalide purustamiseks väljatöötatud mehhanismid ei ole samaaegselt rakendatavad erinevate materjalide purustamiseks.

## 2.2.4 Materjalide purustamine ja jahvatamine

Üheks olulisimaks etapiks tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks ettevalmistamise protsessis on jäätmete purustamine. Nii mehaanilise kui ka keemilise ümbertöötlemise juures on vajalik kogutud jäätmeid eelnevalt tükeldada ja purustada. Tulenevalt tekstiilijäätmete erinevast kiulisest koostisest, erinevatest materjalidest lisadetailidest (nööbid, lukud, trukid jne), ei ole tavaliste jäätmepurustitega võimalik tekstiilijäätmeid purustada, sest tekstiiliribad jäävad purusti hammaste külge ja kerivad ennast ümber purusti rullide ning takistavad seeläbi purusti tööd (OÜ Alkranel, 2017).

Tehnoloogiliselt on tekstiilmaterjalide purustamiseks eraldi tööstuslik lahendus olemas, mille purustamise põhimõte on näha joonisel 2.3.



Joonis 2.3. Tööstuslik tekstiilmaterjalide purustamismehhanism (Abdulkarim & Ahmed, 2018)

Mehhanismi töö põhimõte seisneb kahe üksteisega paralleelselt asetsevate võlli (1) külge kinnitatud kettakujuliste labade (2) pöörlemises, mille servades on igal teral üks või mitu hammast (3). Esimese võlli löiketerad ristuvad pööreldes teise võlli löiketeradega, et suruda ülemisse löikekambrisse (7)

sisestatud materjal purustamiseks labade vahele. Fikseeritud ümarate servadega terad (15) töötavad labadega vastamisi, et puhastada need purustatavast materjalist (Abdulkarim & Ahmed, 2018).

Taoline mehhanism on sobiv tarbimiseelsete tootmisjääkide purustamiseks, millel puuduvad muudest materjalidest lisand-detailid. Kasutatud rõivaste käitlemiseks selline tehnoloogia ei sobi, sest lõiketerasid ja kiududeks rebimise seadmeid lõhuks tekstiilile kinnitatud kaunistused (plast, metall, klaas) ning sulgemisvahendid (lukud, nõöbid, trukid). Seega oleks vajalik rõivastelt kõikide võõrkehade eelnevalt eemaldada, mis on kõige paremini teostatav käsitööna, kuid väga tööjõumahukas (OÜ Alkranel, 2017). Universaalne täisautomaatne lahendus täna selliste tekstiilijätmete purustamiseks puudub.

**Desintegraatoritehnoloogia.** Tallinna Tehnikaülikooli desintegraatoritehnoloogia laboris on välja arendatud desintegraatorveskite süsteem erinevate materjalide töötlemiseks ja materjalide taaskasutamise võimaluste loomiseks. Laboratooriumi uurimisvaldkondadeks on desintegraatorite edasiarendus, jahvatusseadmete ja jahvatusprodukti klassifitseerimise efektiivsuse tõstmine ning desintegraatorjahvatuse uute kasutusvaldkondade uurimine. Viimase uurimissuuna põhitähelepanu on suunatud desintegraatoritehnoloogia kasutamisele jäätmetöötlemises (Kulu, kuupäev puudub).

Viimastel aastatel on laboratooriumis keskendunud desintegraatorveskite süsteemide arendamisele erinevate materjalide töötlemiseks, mis võimaldaks neid uuesti kasutada. Selleks uuritakse erinevate materjaligruppide jahvatatavust (joonis 2.4):

- Metallmaterjalid - malmi ja mitterauasulamid, roostevaba teras, nikli- ja kroomisulamid;
- Keraamilised materjalid - mineraalsed maagid;
- Komposiitmaterjalid - plastkomposiitmaterjalid, kõvasulamid, trükiplaadid (metall-klaaskiudplastiga lamineeritud komposiitmaterjal), autorehvid, jm tooted.



Joonis 2.4. Desintegraatorjahvatatud taaskasutatavate materjalide näidised (Goljandin, 2018)

Erinevalt traditsioonilistest jahvatusmeetoditest puruneb materjali desintegreerimisel suure kiirusega löökide seeria toimel, mis tekitavad materjaliosakeste sees kümneid kordi suuremad pinged kui selle tugevus. Võrreldes teiste purustusmehhanismidega omavad desintegraatorid mitmeid eeliseid: need on kompaktsed, võimalik purustada väga erineva kõvadusega materjale ja varieerida purustatavate materjalide töötlemiseks kuluvat erienergiat (Goljandin, 2013).

Enamjaolt kasutatakse desintegraatoreid habraste materjalide töötlemiseks. Kuid asjaolu, et pinged, mis tekivad löögi piirkonnas, on oluliselt suuremad kui materjali tugevus ning töötlemiseks kuluv aeg lühike, lubab desintegraatoreid kasutada põhimõtteliselt ka sitkete materjalide töötlemiseks (Goljandin, 2018).

Desintegraatorveskitel põhinevad löökjahvatamise ja separeerimise kombineeritud süsteemid töötati välja Tallinna Tehnikaülikoolis koos tehnoloogiaga, kus jahvatamine toimub erinevates režiimides (otse-, separatsioon- ja selektiivjahvatus, samuti portsjon- ja pidevjahvatamine). Koos sisseehitatud inertsiaalsepareerimissüsteemiga on võimalik toota ka pulbrilisi materjale (näiteks kumm, plast, kõvasulamid, komposiitmaterjalid jne), mida peetakse üldiselt seda tüüpi veskeid kasutades võimatuks (Goljandin, 2018).

Siiani on laboratoorium keskendunud põhiliselt jäikade materjalide, nagu metall, komposiit- ja keraamilised materjalid, purustamise ja jahvatamise uurimisele ning eraldi tekstiilmaterjalide purustamise kogemus puudub. Elastsemate materjalide purustamisega on kokku puutunud vaid muude materjalide koostises ehk komposiitmaterjalide seas esinevate kangasmaterjalide purustamisega seonduvalt. Samuti ei ole ka varasemast teada, et seesugust tehnoloogiat oleks

tekstiilijäätmete purustamiseks teistes riikides kasutatud, mistõttu on taolise lähenemise ja purustamisvõimaluste kaardistamise uudne ja oluline.

## 2.3 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemise tehnoloogiad

Materjalide ümbertöötlemiseks samaväärse, kõrgema või madalama väärtusega toodeteks on mitmeid erinevaid meetodeid. Tekstiilmaterjalide ringlussevõtu meetodid jagatakse tavaliselt kaheks: mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise tehnoloogiateks (Vadicherla & Saravanan, 2014; Karayannidis & Achilias, 2007). Mõlema tehnoloogia peamistest protsessidest ja kasutusvaldkondadest annab ülevaate tabel 2.3.

Tabel 2.3. Tekstiilmaterjalide ümbertöötlemise tehnoloogiad (Kinden, 2017)

	MEHAANILINE ÜMBERTÖÖTLEMINE	KEEMILINE ÜMBERTÖÖTLEMINE
<b>Protsess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Väärtust vähendav ümbertöötlemine</li> <li>○ Väärtust lisav ümbertöötlemine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Väärtust lisav ümbertöötlemine</li> </ul>
<b>Ümbertöödeldavad materjalid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Taimsed kiud</li> <li>○ Loomsed kiud</li> <li>○ Sünteetilised kiud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Taimsed kiud</li> <li>○ Sünteetilised kiud</li> </ul>
<b>Ümbertöödeldavad kiud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ühekomponentsed</li> <li>○ Kahekomponentsed</li> <li>○ Multikomponentsed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ühekomponentsed</li> <li>○ Kahekomponentsed</li> </ul>
<b>Väljund</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Lausmaterjal</li> <li>○ Uus niit/lõng</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Uus niit/lõng</li> </ul>

Järgnevas alapeatükis vaadeldakse lähemalt tekstiilmaterjalide mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise tehnoloogiaid ning käsitletakse neid eraldi nelja tekstiilmaterjali kontekstis, milleks on polüester, nailon, puuvill ja vill.

### 2.3.1 Tekstiilijäätmete mehaaniline ümbertöötlemine

Enamus tarbijajärgseid tekstiilijäätmeid töödeldakse täna ümber mehaaniliselt. Keemilise ümbertöötlemise tehnoloogiate keerukus, puudulikkus ja kõrge hind jätavad mehaanilise ümbertöötlemise enamike tekstiilkiudude puhul ainsaks valikuks.



Ühtlasi on mehaaniline ümbertöötlemine lihtsaim tekstiilkiudude korduskasutuse viise (Close the Loop, 2019). See protsess tähendab tekstiilmaterjali mehaanilist dekonstrueerimist, et viia see tagasi kiulisele vormile, mis võimaldaks uue lõnga või materjali valmistamist (Björquist, 2017). Selle meetodi oluliseks miinuseks on see, et kiudude kvaliteet ringluse käigus langeb. Iga tsükliga saadakse purustamisel lühemad ja hapramad kiud, mis piirab nende edasisi kasutusvõimalusi. Kiu pikkus on määrava tähtsusega omadus uue lõnga valmistamisel (Gulich, 2006) ning seetõttu on selliste kiudude taaskasutamine vähemalt samal väärtustasemel võimalik vaid juhul, kui ümbertöödeldavad kiud segatakse uute kiududega. Sellepärast on tavaline, et kõrgema kvaliteediga lõnga saamiseks tuleb taaskasutatud kiudusid segada suure hulga uute kiududega (Gulich 2006). Näiteks puuvillakiudude taaskasutamisel on vajalik üldjuhul kuni 80% ulatuses uute kiudude lisamine (Close the Loop, 2019), et saavutada vajalik keskmine kiu pikkus ja kvaliteet uue kanga valmistamiseks.

Kõige levinumate ühekomponentsete tekstiilmaterjalide (polüester, nailon, puuvill ja vill) mehaanilise ümbertöötlemise protsessid on lühidalt ära kirjeldatud tabelis 2.4.

Tabel 2.4. Polüestri, nailoni, puuvilla ja villa mehaanilise ümbertöötlemise võimalused ja protsessid

<p><b>Polüester</b></p>	<p>Protsessiks on sulatamine, mis koosneb järgmistest etappidest (Aguado &amp; Serrano, 2007):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kogumine, sorteerimine, separeerimine ja muudest materjalidest lisandite eemaldamine;</li> <li>• Mõõtmete vähendamine – tükeldamine, purustamine, jahvatamine;</li> <li>• Kuumutamine/sulatamine ja granuleerimine;</li> <li>• Graanulite pressimine kiuks;</li> <li>• Kiududest kanga valmistamine.</li> </ul> <p>Ümbertöötlemisel saadud materjali kasutatakse enamasti madalama kvaliteediga rakendusteks, mis tuleneb füüsikaliste omaduste halvenemisest ümbertöötlemise käigus (Horotan &amp; Mulvihill, 2018). Kasutusvaldkondadeks on näiteks täite- ja lausmaterjal, isolatsiooniks mööbli- ja autotööstuses, matid, madratsid, jm. (Thompson, Willis &amp; Morley, 2012).</p> <p>Meetodi miinuseks ja arenduste väljakutseteks on mehaaniliste omaduste halvenemine ja värvuse muutus ümbertöötlemise käigus (Thiry, 2009)</p>
<p><b>Nailon</b></p>	<p>Protsess koosneb järgmistest etappidest (Le, 2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puhastamine ja lisandite eemaldamine;</li> <li>• Purustamine ja jahvatamine;</li> <li>• Graanuliteks sulatamine, mida on võimalik kasutada uuteks rakendusteks;</li> <li>• Sulatatud graanulitest uute kiudude tootmine.</li> </ul> <p>Protsessi miinuseks on madalamast sulamistemperatuurist (võrreldes PET-ga) tingitud tundlikkus mikroobide, bakterite ja materjalis olevate saasteainete suhtes, mistõttu on nailonit enne ringlussevõttu vaja täiendavalt puhastada/desinfitseerida (Muthu et al., 2012).</p>

Tabel 2.4 järg

<b>Puuvill</b>	Tavapärase puuvilla mehaanilise ümbertöötlemise protsess on purustatud jäätmekiudude uuesti ketramine.  Kuna mehaaniline protsess lühendab ja nõrgendab kiude ja vähendab nende kvaliteeti, on vajalik ümbertöötlemisel segada kiude uute või muudest materjalist kiududega.
<b>Vill</b>	Kõige tavalisem protsess sisaldab mehaanilisel viisil villa viimist kiulisse vormi ning selle kasutamist tööstuslike toodete toorainena.  Enamasti valmistatakse sellisest materjalist lausmaterjali, madratseid ja isolatsiooniplaate (Thompson et al., 2012). Pikemaid kiudusid kasutatakse uue lõnga ketramiseks, millest valmistatakse kvaliteetseid rõivaid (International Wool Textile Organisation, 2018).

Tavapäraste mehaanilise ümbertöötlemise protsesside käigus ei ole võimalik eraldada koostisosi erinevate kiudude segudest valmistatud materjalides ning värv- ja teisi materjali töötlemiseks kasutatud aineid, mistõttu enamikel juhtudel kasutatakse tehnoloogiat siiski madalama väärtusega toodete ja materjalide valmistamisel (A New Textiles Economy: redesigning fashion's future, 2017) nagu laus- ja täitematerjalid, akustiline tekstiil, isolatsioon, katusematerjal, filtrid, jne (Burns, 2016).

Samaväärse ja kõrgema kvaliteediga toodete ja materjalide valmistamiseks on mehaanilise ümbertöötlemise tehnoloogia kasutamine lihtsam tarbimiseelsete tekstiilijäätmete puhul. Sellisel juhul kasutatakse erinevatest tekstiilitööstusest pärinevad jäätmed, mis sorteeritakse vastavalt nende tüübile ja värvile ning töödeldakse kvaliteetseks kangakiuks (Burns, 2016), ning millest omakorda valmistatakse hea kvaliteediga uusi kangaid (Martexfiber, kuupäev puudub). Heaks näiteks on *Thread International* poolt loodud materjal, mis kombineerib tarbimiseelsetest ülejääkidest taasväärtustatud puuvillakiu tarbimisjärgse polüestriga ning tulemuseks on täiesti uus kiud ja kangas (Thread, kuupäev puudub).

Üheks mehaanilise ümbertöötlemise viisiks loetakse ka termoplastsete polümeeride ümbertöötlemist, et plastjäätmetest uusi kiude formeerida. Peamiselt peetakse selle all silmas polüetüleentereftalaat(PET)-helveste või graanulite kuumsulatusmeetodil kiududeks ümbertöötlemist, sest peened helbed, graanulid või laastud toodetakse PET-jäätmetest mehaaniliselt (Shen et al., 2010). Sellisel viisil saab uuesti sulatada erinevat tüüpi termoplastseid polümeere, kuid kõige tuntum näide tekstiilmaterjalide valdkonnast on plastikpudelite ümbertöötlemine polüesterkiududeks (Vadicherla & Saravanan, 2014). Sellise meetodiga on ümbertöötlemise tsüklite arv siiski piiratud, sest termo-mehaanilise töötlemise käigus materjali omadused halvnevad (Grigore, 2017).

### 2.3.2 Tekstiiljätmete keemiline ümbertöötlemine

Nagu eelnevas alapeatükis selgitatud, ei ole paljusid tekstiilmaterjale võimalik samal või kõrgemal väärtustasemel mehaaniliselt ümber töödelda. Eriti keeruline on see just erineva kiulise koostisega tekstiilide puhul. Väga suur osa ringluses olevatest rõivatekstiilidest on toodetud erinevate kiudude segudest. Kiudude segamist kasutatakse seetõttu, et anda materjalile vajalikud omadused, mis vastaksid erinevatele nõudmistele ja otstarvetele.

Üheks kõige levinumaks tekstiilkiudude seguks rõivatööstuses on puuvilla ja polüestri kombinatsioon. See on ka põhjus, miks selle materjali ümbertöötlemise võimalusi on viimastel aastatel kõige enam uuritud. Ümbertöötlemisel on enne taastootmise protsessi oluline puuvilla eraldamine polüestrist ning see on võimalik vaid keemilisi ümbertöötlemistehnoloogiaid kasutades.

Keemilise ümbertöötlemise protsess hõlmab tekstiilkiudude polümeeride keemilist töötlemist. Peamiselt kasutatakse tekstiilkiudude eraldamiseks erinevaid lahusteid või depolümeriseerimist (ensüümne, termiline, glükolüüsil ja metanolüüsil põhinevad meetodid) (Björquist, 2017). Polümeeride depolümeriseerimine sobib naftast toodetud sünteetiliste polümeerkiudude ümbertöötlemiseks, näiteks polüester ja nailon (Muthu, 2016). Lahustamine sobib tselluloosil põhinevate looduslike või tehiskiudude töötlemiseks, nagu puuvill ja viskoos (Sandin & Peters, 2018). Keerulisem on aga olukord erineva kiusisaldusega tekstiiljätmete keemilisel ümbertöötlemisel, sest kiudude keemilised ja füüsikalised omadused on erinevad ning vajavad erinevaid abiaineid ja meetodeid. Selliste tekstiiljätmete ümbertöötlemisel eraldatakse kiud esmalt osalise degradeerumise teel ning seejärel parendatakse saadud kiudude omadusi (Muthu, 2016). Protsesside tulemusena saadud monomeeride puhtus ja kvaliteet sõltuvad erinevatest teguritest nagu lagundamiseks kasutatud lisaainete ja kemikaalide sisaldus (Björquist, 2017).

Teoorias põhiliselt uuritud polüestri depolümeriseerimisprotsess jaguneb glükolüüsiks, hüdroolüüsiks ja metanolüüsiks. Neis protsessides depolümeriseeritakse polüester vastavalt glükoolis, vees või metanoolis (Motte & Palme, 2018).

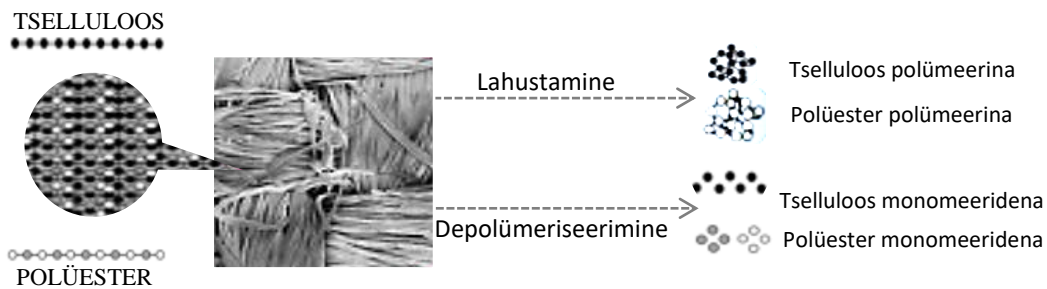
Glükolüüs on tööstuslikes protsessides võrdlemisi levinud. Polüestermaterjalist jäätmed muudetakse bishüdroksüültereftalaadiks (BHET) ja selle oligomeerideks. Polüestri depolümerisatsiooni ulatus oleneb etüleenglükooli ülejäägist glükolüüsis (Bartolome, Imran, Cho, Al-Masr, & Kim, 2012). Glükolüüsi protsess saab toimida temperatuuridel 180 °C – 250 °C ajavahemikus 0,5-8 tundi.

Metanolüüs on polüestri degradeerumine kõrgetel temperatuuridel ja rõhkudel metanooli abil dimetüültereftalaadiks ja etüleenglükooliks. Polüestri metanolüüs toimub tavaliselt temperatuurivahemikus 180 °C – 280 °C ja rõhu 2-4 MPa juures (Bartolome et al, 2012).

Hüdrolüüs viitab mistahes keemilisele reaktsioonile, kus vee lisamine viib ühendi keemiliste sidemete lõhustumiseni. Polüestri hüdrolüüsimiseks võib kasutada kas happelist, neutraalset või leeliselist keskkonda. Reaktsiooni tulemusena toimub polüestri depolümeerimine tereftaalhappe ja etüleenglükooli monomeerideks. Neutraalses keskkonnas läbiviidava depolümeerimisprotsessi soodustamiseks kasutatakse auru või sooja vett. Happelises keskkonnas läbiviidavate protsesside jaoks on vaja suures koguses hapet. Protsessi käigus peavad materjalid vastu pidama ka väga madalale pH-le, mistõttu ei ole happega hüdrolüüs sobilik viis polüestri lagundamiseks polüestri ja puuvilla segust tekstiilide puhul, sest tselluloos on happele väga tundlik. Kuna tselluloos on leeliselises keskkonnas suhteliselt vähe reageeriv, võib polüestri depolümeerimiseks olla sobilik just leeliseline hüdrolüüs. Lisaks on vee ja energia kulu leeliselises protsessis madalam kui neutraalse hüdrolüüsi korral (Karayannidis & Achilias, 2007).

Kõikide nende protsesside eesmärk on lõhustada funktsionaalse rühma estrit polüestris ning sõltuvalt reaktsioonist, saadakse erinevad monomeerid või oligomeerid. Saadud aineid saab kasutada polüestri uuesti sünteesimiseks ja uute tekstiilkiudude tootmiseks (Koo et al., 2013). Polüestri keemilise ümbertöötlemise protsessi on küll viimaste aastate jooksul küllalt palju uuritud, kuid väga vähesed uuringud on keskendunud seejuures eraldi polüesterjätmete ümbertöötlemisele. Neist enamike avaldatud uuringute keskmeks on laialtkasutatavate plastikpudelite ümbertöötlemise uurimine (Björquist, 2017).

Kui arvestada, et teiseks keemilise ümbertöötlemise viisiks on ümbertöödeldavate polümeeride lahustamine, on puuvilla ja polüestri segust tekstiili koostisosade eraldamiseks tänaste teadmiste juures kaks võimalikku viisi: lahustamine ja depolümeerimine. Sõltuvalt sellest, kas eeltoodud variante rakendatakse puuvillale või polüestriks, on neli võimalust polüestri ja puuvilla segust tekstiilide ümbertöötlemisel (joonis 2.5):



Joonis 2.5. Kootud tselluloosi ja polüestri segust tekstiili koostise eraldamise erinevad viisid (Björquist, 2017)

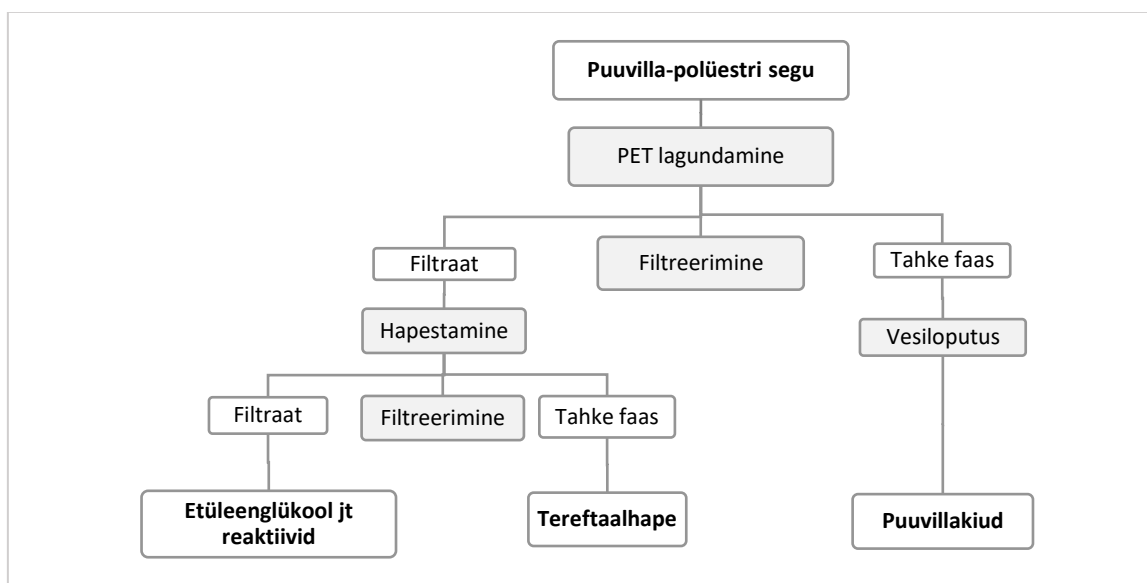
Isegi kui iga staapelkiud koosneb ainult ühest polümeeri tüübist, on kiud tekstiilides omavahel segatud juhuslikult. Seega on seesuguse keerulise võrgu eraldamiseks tarvis rakendada erinevaid keemilisi tehnoloogiaid.

Teise lähenemisviisi ehk polüestri lahustamise osas ei ole siiani ükski katsetatud protsess kaubanduslikus mõttes läbimurret saavutanud (Björquist, 2017). Ühendkuningriigis asuv ettevõtte Worn Again, kes töötab koos suurte kaubamärkidega nagu Nike ja H&M, on seadnud eesmärgiks turule tuua tehnoloogia polüestri eraldamiseks polüestri ja puuvilla segust tekstiilides (Gullingsrud, 2017). Nende esimeses patenditaotluses kirjeldatakse polüestri lahustamise abil selle ekstraheerimise meetodit erinevatest tootest. Lahustamise all viidatakse mistahes homogeensetele või heterogeensetele lahustitele (Walker, 2014).

Ouchi jt. (2010) kirjeldab polüestri ja puuvillaseguste kangaste ümbertöötlemiseks rakendatavat kaheastmelist meetodit, mille juures kasutatakse happega eeltöötlemist, millele järgneb tekstiilide mehaaniline töötlemine. Väidetavalt on selle meetodi puhul võimalik puuvill polüestrist eraldada pulbrina.

Puuvilla sisaldavatest kangatükkidest polüestri depolümeriseerimiseks kasutatakse leeliselisest hüdrolüüsi. Puuvill lahustatakse N-metüülmorfoliin-N-oksiidis (NMMO), millest on võimalik keldrata lyocell kiude. Ka Palme jt. (2017) kasutasid puuvilla ja polüestri segust valmistatud voodilinate lõhustamisel, polüestri monomeerideks ning puuvilla jääkideks, leeliselisest hüdrolüüsi. Uute ümbertöötlemise kontseptsioonidega püütakse säilitada tekstiilides nii polüestri kui puuvilla osakesed nende omadusi mõjutamata ning koguda kokku ka tekstiilis sisalduvad värvained, et neid taaskasutada. Läbimurret polüestri- ja puuvillasegust valmistatud tekstiilmaterjalide laiaulatuslikuks ringlussevõtuks ei ole veel tehtud, mistõttu on eesmärgiks kontseptsioone edasi arendada, kasutades leeliselisest hüdrolüüsi polüestri depolümeriseerimiseks (Björquist, 2017).

Björquist (2017) on oma uurimistöös lähemalt selgitanud, kuidas puuvilla ja polüestri segust tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete ümbertöötlemisel (et kasutada puuvillas sisalduvat tselluloosi näiteks viskoosi tootmiseks) on võimalik tselluloosi käidelda nii, et selle omadused saaksid võimalikult vähe mõjutatud. Selle saavutamiseks eraldatakse kiududes keemilise protsessi abil polüester nn „ehitusplokkideks“. Tema töö aluseks oli Palme jt (2017) uurimus „Efektiivse protsessi väljatöötamine polüetüleentereftalaadi ja puuvillaseguste kangaste ringlussevõtuks“, milles kirjeldatakse üksikasjalikult polüetüleentereftalaadi (PET) puuvillast eraldamise meetodit. Ülevaade koostisosade eraldamise protsessist on näha joonisel 2.6.



Joonis 2.6. Ülevaade polüestri ja puuvilla seguga tekstiili koostisainete eraldamise protsessist (Palme et al., 2017)

Protsess algab PET degradeerimisega naatriumtereftalaadiks ja etüleenglükooliks. Lagundamisprotsessi järel on võimalik puuvill segust välja filtreerida. Filtraat koosneb kahest PET komponendist - naatriumtereftalaadist ja etüleenglükoolist. Peale hapestamist moodustub tereftaalhapest protoneeritud kujul sade, mis samuti välja filtreeritakse. Seega saadakse protsessi tulemusena kolm ainet: puuvill, tereftaalhape ja filtraat (Palme et al., 2017).

Kokkuvõttes leidsid uuringu autorid, et antud meetodil on potentsiaali eraldamiseks polüestri ja puuvilla segust valmistatud tekstiilidest polüestri monomeerid, samaaegselt kahjustamata segus sisalduvaid puuvilla jääke. Björquist (2017) töö keskmeks oli jätkata uurimisprotsessi ja leida võimalus koostisosade eraldamiseks ilma katalüsaatorit lisamata.

Järgnevalt on kokkuvõtlikult ära toodud polüestri, nailoni, puuvilla ja villa ning nendega segatud teiste kiudude keemiliseks ümbertöötlemiseks kasutuselolevad meetodid (tabel 2.5).

Tabel 2.5. Polüestri, nailoni, puuvilla ja villa keemilise ümbertöötlemise protsessid

<p><b>Polüester</b></p>	<p>Protsess koosneb erinevatest depolümeriseerimisprotsessidest, mis lagundavad polümeeri selle komponentideks (monomeerid, oligomeerid, muud ühendid). Peamisteks on hüdroolüüs, metanalüüs, glükolüüs ja nende kombinatsioonid (Hollins, 2014).</p> <p>Sõltuvalt valitud depolümeriseerimise viisist, võib moodustada erinevaid lõpptooteid (Aguado &amp; Serrano, 2007).</p> <p>Täiendav keemiline töötlemine ümbertöötlemisprotsessi käigus võimaldab ka segatud kiudude puhul polüestri eraldamist teistest materjalidest (näiteks elastaanist või puuvillast) või värvainetest ja muudest keemilistest viimistlusmaterjalidest (<i>ibid.</i>).</p> <p>Meetodi väljakutseteks on segatud kiududest (puuvill, elastaani segud) kangaste ümbertöötlemise keerukus. Lisaks muudavad värvainete ja muude lisandite kasutamine tekstiilmaterjalides degradeerimise keeruliseks, sest nende eraldamine võib põhjustada polüestri soovimatut lagunemist. Ka on endiselt küsitav meetodi majanduslik otstarbekus, sest toorainest uue kiu tootmine on võrreldes ümbertöötlemisega endiselt odavam (Le, 2018)</p>
<p><b>Nailon</b></p>	<p>Nailoni (6 ja 6,6) keemiline ümbertöötlemine hõlmab depolümerisatsiooniprotsessi, millele järgneb destilleerimine, et taastada nende monomeersed komponendid: kaprolaktaam (Nailon 6), heksametüleendiamiin ja adipiinhape (Le, 2018).</p> <p>Välja on arendatud erinevaid lahendusi nailoni keemiliseks ümbertöötlemiseks, kuid nende ulatuslikumat rakendamist takistab endiselt protsesside kulukus ja materjali erinevad töötlemise etapid, mis vajaksid tõhusamaid tehnoloogiaid ja uuendusi (Hollins, 2014).</p> <p>Hetkel kasutatakse nii Nailon-6 kui ka Nailon-6,6 keemilise ümbertöötlemise protsessides peamiselt DuPont'i poolt loodud ammonolüüsi meetodit ning Nailon-6 puhul ka TORAY - CYCLEAD™, Aquafil ja Hyosung patenteeritud keemilise ümbertöötlemise protsessi (Hollins, 2014; Textile Exchange, 2016).</p>
<p><b>Puuvill</b></p>	<p>Protsess põhineb tselluloosi lahustamisel. Peamisteks ümbertöötlemise viisideks on glükoosi monomeeride depolümerisatsioon, et kasutada seda muudeks rakendusteks, ning polümeeri lahustamine, kus tsellulooskiudude eraldamine ja regenererimine toimub lahustite abil (Li-Carrillo, Orr, Ford &amp; Nadella, 2016). Viimase protsessi tulemusena on võimalik saada keemiliselt modifitseeritud või puhtaid tsellulooskiude (Rengel, 2017).</p> <p>Lyocell-meetod ja ioonvedeliku abil lahustamine on kaks peamist meetodit, mida on uuritud ja arendatud (Le, 2018). Lyocell-meetodiga saab ümber töödelda 100% puuvillasisaldusega kangaid, kasutades lahustamiseks metüülmorfoliin-N-oksiidi. Ioonvedeliku abil lahustamist saab kasutada puuvilla ja muude materjalide segudest kangaste ümbertöötlemisel. Aalto ja Helsingi Ülikooli teadlased töötasid välja <i>Ioncell-F</i> protsessi, milles kasutatakse puuvillkiududest tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks ioonset vedelat lahustit, 1,5 diasabitsüklo [4.3.0] non-5-ene atsetaati ([DBNH][OAc]). Tulemus võimaldab toota kiudusid, mille tõmbetugevus ületab naturaalsest puuvillast kiudude oma (Schuch, 2017).</p>
<p><b>Vill</b></p>	<p>Villasest materjalist tekstiilide keemilist ümbertöötlemist ei praktiseerita. Uuritud on keratiinvalgu taaskasutamine tarbimiseelsete ja -järgsete tekstiilijäätmete baasilt (Le, 2018).</p>

### 2.3.3 Uudseimad lahendused

Eelpool selgitatud tekstiilmaterjalide ringlussevõtu tehnoloogiate arendamiseks on teadlased üle maailma teinud palju tööd, et leida viise ümbertöödeldava tekstiili ja/või tekstiilkiudude omaduste säilitamiseks suletud olelusringis ning kasutada ümbertöötlemise protsesside läbiviimiseks vajalikke lisaressursside võimalikult tõhusalt. Kõige keerukamaks väljakutseks on just kiusegude ümbertöötlemine. Alljärgnevalt on välja toodud mõningad uudseimad lahendused. Enamik neist on siiski alles arendusfaasis ja laiemalt tööstuses ei rakendata.

Veebruaris, 2017. aastal avalikustas Euroopa üks prominentsemaid tehiskiudude tootjaid, Lenzing AG, oma uue kiudude kaubamärgi TENCEL® sarjast. Kiud nimega Refibra™ on toodetud puidust ja puuvillajääkidest valmistatud massist. Puuvillajäägid pärinevad tekstiiltootmise protsessidest ehk nn tarbimiseelsed jäätmed (Lenzing AG, kuupäev puudub).

Teadlased Aalto Ülikoolist ja Soome Helsingi Ülikoolist on esitanud patenditaotluse ioonilisest vedelikust tselluloosikiudude valmistamise protsessile (Michaud et al., 2014). Sama uurimisrühm on ka hiljuti avaldanud artikli selle kohta, kuidas keemiliselt on võimalik ümber töödelda 100% puuvillasisaldusega voodilinasid. See saavutati ioonilise vedeliku, 1,5 diasabitsüklo [4.3.0] non-5-ene atsetaadi ([DBNH][OAc]), abil otsese lahustumisega. Lahustatud tselluloosist saadakse seejärel kiud kuivketruse abil. Tõmbekatsetuste põhjal on tõestatud, et selline puuvillajääkidest saadud uus tselluloosikiud on tavalisest puuvillast toodetud kiududest tunduvalt tugevam, seda nii kuivas kui ka märjas olekus (Björquist, 2017).

Soome Aalto Ülikooli teadlaste grupp on hiljuti välja arendanud tehnoloogia, mis võimaldab puuvillase polüesterkanga muuta lyocelli-taolisteks kiududeks. Viie aasta eest leidsid ülikooli teadlased ioonvedeliku, mis suudab puidumassist lahustada tselluloosi.

Nüüdseks on selle meetodi täiendamisega jõutud lahenduseni, mil vedeliku kandmisel polüestri ja puuvilla segule, lahustab see vaid puuvilla ja mitte polüestri. Lahustunud puuvillast on võimalik lihtsasti polüester välja filtreerida ja kasutada lahustatud tselluloosi tugevamate kiudude valmistamiseks. Katsetuste tulemused on näidanud, et sellisel teel valmistatud kiud võivad isegi olla tugevamad kui viskoos. Kiud sarnanevad lyocelli või Tencel kiududele, mis on paljude keskkonnasõbralikke materjale eelistavate disainerite lemmikud. Meetodi täiustamisega jätkatakse tööd. Eesmärgiks on teha kindlaks, kas järelejäänud polüestrit on võimalik kangaste tootmiseks taaskedrata ning leida ühtlasi ka võimalusi ümbertöödeldud kangastest eraldatud värvainete uuesti kasutamiseks. Püüdluste õnnestumisel võiks sellest saada suurim arenguhüpe tekstiilijäätmete ringlussevõtus (New Clothing Recycling Technology Aims to Reduce Clothing Waste, 2017).



Teise samalaadse puuvilla ümbertöötlemise lahendusega on välja tulnud ka Rootsi tekstiilide taaskasutamise tegelev ettevõtte re:newcell. Tehnoloogia võimaldab samuti lahustada puuvilla ja teisi naturaalseid kiude uudeks biolagunevaks toormaterjaliks. Ettevõtte sõnul on nad jõudnud lahenduseni, mis võimaldavad tekstiilitööstuse jäätmetest toota uut kiudmassi, mida on võimalik kasutada uute ja kõrgekvaliteediliste tekstiilide tootmiseks, täites sellega puuduva lüli taaskasutuse tsükklis. Ettevõtte nimetab tulemust moetööstuse ja- tarbimise katkematuks olelusringiks (re:newcell AB, kuupäev puudub).

2017. aasta septembris teatas H&M sihtasutus läbimurdest kombineeritud kiududest tekstiilide ümbertöötlemisel. Nelja aastase töö tulemusena koostöös Hongkongi Tekstiili- ja Rõivatööstuse Uurimisinstituudiga (*Hong Kong Research Institute of Textiles and Apparel – HKRITA*) jõuti lahenduseni, mis võimaldab hüdrotermaalse protsessi abil erineva kiulise koostisega tekstiile kvaliteedikadudeta ümber töödelda. HKRITA koostöös Ehime ja Shinshu ülikoolidega Jaapanist arendasid välja hüdrotermaalse protsessi, mille abil on võimalik täielikult eraldada ringlussevõetud puuvill ja polüester. Protsessis kasutatakse vaid soojust, vett ja alla 5% biolagunevat kemikaali, mis aitab puuvilla polüestrist eraldada. Saadud polüestrit on võimalik sama kvaliteediga uuesti kasutada (*A New Textiles Economy: redesigning fashion's future, 2017*). Antud meetod on kuluefektiivne ja välditakse keskkonnale teise reostuse teket, mis tähendab ringlussevõetud materjali eluea pikendamist jätkusuutlikul viisil. Tehnoloogia on kavas teha kättesaadavaks ülemaailmsele moetööstusele, mis on suur läbimurre tekstiilmaterjalide suletud olelusringi suunas. Koostööprojekt on üheks osaks H&M sihtasutuse tähelepanuvaldkonna Planet saavutamisel, mille eesmärgiks on kaitsta elanike ja kogukondade elutingimusi üle maailma (*Technological Breakthrough: successful method found for recycling blend textiles into new fibres, 2017*).

Siiski tuleb tõdeda, et nii kaua kui keemilise ümbertöötlemise tehnoloogiad on alles arendamisel ja nende kättesaadavus piiratud kalliduse tõttu, on kõige levinumaks endiselt tekstiilkiudude mehaaniline ümbertöötlemine. Uute praktikate rakendamine aitab meid suunata kontrollitud katkematu ressursside pakkumise ahelani, milles taaskasutatakse materjale uuesti ja uuesti, ning liikuda seeläbi jätkusuutlikuma tuleviku suunas. Selleks aga on vajalik esmalt alustada tekstiilmaterjalide ja toodete disainist, mis võimaldaksid tõhusamat ringlussevõttu.

### 3. ÜMBERTÖÖDELDUD TEKSTIILIJÄÄTMETE KASUTUSVÕIMALUSED

Eelnevates peatükkides on olnud juttu tekstiilijäätmete taaskasutamise ja ümbertöötlemise võimalustest. Aasta-aastalt on kasutatud rõivaste ja tootmisjääkide korduskasutus ehk ümberdisainimine uuteks rõivasteks ja toodeteks populaarsust kogunud. Ka Eestis on kangajääkide taaskasutamise võtnud eesmärgiks mitmed moeloojad, eesotsas Reet Ausi ja Kristi Kuusk'iga. Lisaks areneb ja leiab üha enam rakendust ka keemiliste meetoditega kangastest uute kiudude tootmine. Siiski piirab vajalikul määral taaskasutust ja ümbertöötlemist veel puudulik ringlussevõtutehnoloogia ja majanduslik tasuvus.

Samas jääb korduskasutuse ja keemilise ümbertöötlemise vahele veel hulgaliselt teisi võimalusi, kuidas suuremates kogustes tekstiilijäätmeid prügilatesse ladestamise ja põletamise asemel rakendada. On iseenesest mõistetav, et kogu jäätmetesse suunatud tekstiilimassi ei ole võimalik samaväärsel või kõrgemal väärtustasemel rakendada, kuid ka madalamal väärtustasemel kasutamiseks on palju võimalusi, milles võiks toorainena just tekstiilijäätmete kaasamist senisest rohkem kaaluda.

Tabelis 3.1 on toodud ülevaade erinevatest tekstiilijäätmete rakendusvaldkondadest nende kasutamise sageduse järgi.

Tabel 3.1. Ümbertöödeldud tekstiilmaterjalide rakendusvaldkonnad

Levinud rakendusvaldkonnad	Vähemlevinud rakendusvaldkonnad	Uued rakendusvõimalused
<ul style="list-style-type: none"><li>– Lausmaterjalid</li><li>– Mehaaniliselt purustatud kiududest uued niidid, lõngad ja tekstiilid</li><li>– Täitematerjal, termovatiin</li><li>– Mööbli ja autotööstuse polsterdus</li><li>– Isolatsioonimaterjalid</li><li>– Geotekstiil</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Keemiliselt ümbertöödeldud kiududest uued niidid, lõngad, ja tekstiilid</li><li>– Paberi valmistamine</li><li>– Süsinikkiud</li><li>– Komposiitmaterjalid, sh betooni ja plasti armeerimine</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Elektrokedratud nanostruktuursed materjalid</li><li>– Peeneks jahvatatud kiutolmu kasutamine, sh näiteks 3D printimise lähteainena</li></ul>

Kõige levinumateks rakendusvaldkondadeks on mehaaniliselt ümbertöödeldud materjalidest laus- täite- ja isolatsioonimaterjalide tootmine. Põhiliselt kasutatakse selleks tarbimiseelseid tootmisjääke, vähem tarbimisjärgseid jäätmeid. Ka Eestis tegelevad tootmisjääkide ümbertöötlemisega AS Toom Tekstiil ümbertöötlemistehas Viljandis ja Wendre AS Pärnus. Purustatud tekstiilijäätmeid kasutatakse täitematerjalidena ning toodetakse mittekootud termoliimitud materjale isolatsiooniks, polsterduseks, jm. Siiski ei ole reaalsed ümbertöötlemise

mahud märkimisväärsed ning lisaks ei tegele need ettevõtted tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete ümbertöötlemisega.

Tekstiilijäätmete väärtust isolatsioonimaterjalina nii heli- kui soojuse isoleerimiseks on palju uuritud ning siinkohal on tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete suuremates kogustes kasutamise takistuseks just nende eeltöötlemisele kuluv ressurss, mis muudab ümbertöötlemise kokkuvõttes majanduslikul mitteotstarbekaks.

Täna veel on ümbertöödeldud tekstiilijäätmete vähemlevinumateks rakendusvaldkondadeks näiteks keemiliselt regenereeritud kiudude tootmine ja nanostruktuursete materjalide valmistamine. Suuremates kogustes rakendamise potentsiaali oleks ka komposiitmaterjalides ümbertöödeldud kiudude väärimiseks. Echeverria jt. (2019) on välja toonud erinevad ressursitõhusa ümbertöötlemise viisiga tekstiilijäätmete rakendused. Nendeks on tsellulooskiudude kasutamine paberi valmistamisel või nanokristallilise tselluloosi tootmiseks, lausmaterjal vaipade ja isolatsioonimaterjali valmistamiseks, täiteaine soojus- ja akustiliseks isolatsiooniks, süsinikkiudude, filtrite ja nonostruktuursete materjalide valmistamine.

**Tekstiilijäätmete kasutamine komposiitmaterjalides.** Komposiitmaterjalideks (ingl k *composite material*) nimetatakse kahest või enamast osast (faasist) koosnevaid materjale, kusjuures faaside omadused ja orientatsioon on erinevad ja kontrollitavad. Komposiitmaterjal on heterogeenne, selle omadused (korrosiooni- ja kuumuskindlus, magnetilised omadused, jäikus, tugevus, jm.) on määratud tema koostisse kuuluvate faasidega. Tavaliselt on üks faasidest kõva ja tugev ning teine plastne ja elastne. Kõva faasi nimetatakse armatuuriks (sarruseks) ja plastset maatriksiks. Armatuur ehk sarrus (ingl k *reinforcement*) annab komposiitmaterjalile tugevuse, jäikuse ja tagab mehaaniliste omaduste säilimise tööolukordades (kõrgel või madalal temperatuuril, agressiivses keskkonnas, jne). Maatriks annab materjalile vormi ja monoliitsuse ning tagab koormuse ümberjaotumise armatuuri elementide (kiudude) vahel (Arensburger, 2005).

Armeerivate elementide kuju järgi liigitatakse komposiidid pulbrilise armatuuriga, diskreetse või katkematu kiudarmatuuriga ning kihtstruktuuriga komposiitideks. Kõikide nende armeeringute valmistamiseks on võimalik kasutada ka tekstiilijäätmeid. Viimastel aastatel on mitmed uuringud keskendunud tekstiilkiududega tugevdatud komposiitmaterjalide rakendustele ehitussektoris (Araújo et al., 2017; Broda and Brachaczek, 2015; Miao et al., 2000; Pickering et al., 2016; Tasdemir et al., 2010 via Echeverria et al., 2019). Uuritud on tekstiilkiudude potentsiaali polümeer- ja betoonkomposiitmaterjalide armeerimiseks. Tekstiilkiude kasutatakse nii sarrus- kui kiudbetooni tugevdamiseks. Võrreldes metallsarrusega, tekstiil ei korrodeeru ning ei muuda struktuuri raskeks.

Kiudbetoonis kasutatakse tekstiilmaterjalidest enamasti sünteetilisi kiude, mis tagavad suurema tugevuse. Peamiselt on nendeks akrüül- ja nailonkiud, aga ka süsinik-, grafiit-, klaas-, aramiid- ja teised kiud. Aramiidkiud on näiteks kaks ja pool korda tugevam kui klaaskiud ning viis korda tugevam kui rauast kiud ühe massiühiku kohta (Mägi, 2017).

Ka muude komposiitmaterjalid valmistamisel on tekstiilmaterjali kasutamisel võrreldes paljude teiste materjalidega olulisi eeliseid. Näiteks puitkomposiitmaterjalide koostises tõstab tekstiilmaterjal soojus- ja helikindluse taset. Erinevates uuringutes on välja toodud, et näiteks villase kanga jääkidest valmistatud paneeli (tihedusega  $440 \text{ kg/m}^3$ ) soojusjuhtivuseks (U-arv) on  $0,044 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (Briga-Sa et al., 2013) ja puuvillase kanga jääkidest valmistatud paneeli (tihedusega  $20\text{-}25 \text{ kg/m}^3$ ) soojusjuhtivuseks  $0,039 - 0,044 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (Hadded, Benltoufa, Fayala, & Jemmi, 2016; BondedLogic, kuupäev puudub).

**Elektroketrusse kasutamine tekstiilijäätmete ümbertöötlemisprotsessides.** Elektroketrusmeetodi kasutamine tekstiilijäätmete ümbertöötlemisprotsessides ei ole samuti veel väga laialdaselt levinud. Üheks teguriks on kindlasti selle meetodi abil toodetud materjali suhteliselt kõrge omahind. Samas võiks just elektroketrus olla üheks võimalikuks viisiks tekstiilmaterjalide taastootmisel, kuna see meetod ei eelda kiudude ketramiseks väga kõrge puhtusastmega toormaterjalist, mis vähendab eeltöötlemise mahtu ringlussevõetud toorme puhastamiseks (Teo, 2018).

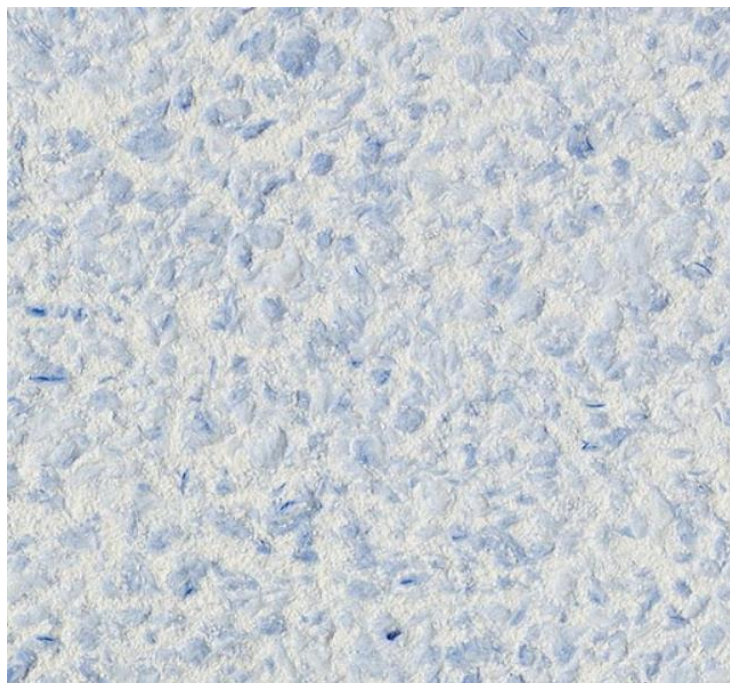
India Amrita Vishwa Vidyapeetham University uurimisrühm (Josep, Nair, & Menon, 2015) kirjeldab unikaalset meetodit, kus kolmedimensiooniliste biolagunevate struktuuride loomiseks integreeritakse elektroketrusse protsessi tekstiiltehnoloogiaga. Uurimisrühm töötas välja uudse kollektori, mis toodab surve abil puuvilla-villa seguse struktuuri, millest on võimalik välja tõmmata suure tugevusega pikad lõngad. Autorite hinnangul võiks seesugusel meetodil olla potentsiaali nanotekstiilide tootmiseks erinevate biomeditsiiniliste kasutusvaldkondade tarbeks.

Valdav enamus antud valdkonna uuringutest keskenduvad lahusest ketramise protsessile, kus polümeeri lahus töödeldakse kiududeks. Vaid mõningad uurimisrühmad on tähelepanu pööranud lahustivabale elektroketrusse protsessile, näiteks sulamitest elektroketrussele, mis aitaks vältida lahustijääkide õhku paiskumist. Veelgi olulisemaks aga on see, et lahustijääkideta elektrokedratud kiud annavad võimaluse kasutada saadud materjali sellistes valdkondades nagu koetehnoloogia või haavandite sidemed (Zhang et al., 2017). Samas on sulamist elektroketrusel ka omad puudused võrreldes elektroketrusprotsessiga lahuselise algainest. Nimelt on sulamist elektrokedratud kiud

paksemad ning lisaks eeldab sulamist kiudude ketrusprotsess polümeerisulami kõrget temperatuuri ning suurt viskoossust (Nayak, Padhye, & Arnold, 2011).

**Tekstiilijäätmete rakendamine dekoratiivmaterjalide valmistamisel.** Üheks odavamaks ja lihtsaimaks võimaluseks on tekstiilijäätmete kasutamine lausmaterjalina dekoratiivse pinnakatte ehk vedeltapeedi lähteainena, milleks tänini kasutatakse veel peamiselt ümbertöötlemata kiudusid. Vedeltapeet on tavapäraselt tervisesõbralik (allergiavaba) siseviimistlusmaterjal, mis sobib kuivade ruumide seinte ja lagede katmiseks. Enamike turulolevate vedeltapeetide puhul on tegemist 100% loodusliku dekoratiivkrohviga, mille koosseisu kuuluvad taimsed ja mineraalsed toormaterjalid nagu puuvill ja siid (Fiestadesign, kuupäev puudub).

Näiteks puuvilla baasil valmistatud naturaalne vedeltapeet jääb seinal pehme ja struktuurne (joonis 3.1) ning isoleerib hästi soojust ja akustikat. Samuti on see hingav ja vabastab ülemäärase niiskuse, aidates luua tervislikuma elukeskkonna.



Joonis 3.1. Vedeltapeet Silk Plaster - Relief 326 (Fiestadesign)

Vedeltapeeti on võimalik kanda kõikidele pindadele. Pealekandmiseks silutakse massi plastikust siluriga mööda seina ühtlaselt laiali. Lisaks on ka võimalus kate vanalt seinalt niisutamise teel eemaldada ja vajadusel kanda järgmisele seinale (Värvikeskuse Grupp OÜ, kuupäev puudub).

**Tekstiilijäätmete kasutamise võimalused 3D printimise algmaterjalina.** Viimaste aastate kiired arengud 3D printimise valdkonnas on elektroketrusmeetodi haaranud moetööstuse ja 3D printimise vahelisse lülisse. Materjalide taaskasutamise valdkonnas püütakse leida võimalusi ümbertöödeldavate materjalide rõivatööstuses kasutamiseks just 3D printimise kaasabil ning elektroketruse meetod on samuti ühe võimalusena olnud debateerimisel. Nii elektroketruse kui *spray*tehnikaga abil toodetud mittekootud materjale on võimalik kanda sobivale vormile, mis annab võimaluse disainitehnoloogia abil kujundada õmblustevabasid tooteid (Grain, 2016). See võimalus on siiski alles väga vähe uuritud, kuid samas ringmajanduse vaatenurgast äärmiselt võimalusterohke moetööstuse tulevikusuundumuste juurutamisel.

Kihtlisandustehnoloogiad võimaldavad toota kergekaalulisi ja keerukaid tooteid, mida traditsiooniliste meetoditega (treimine, freesimine jt.) ei ole võimalik või on äärmiselt aja- ja ressursimahukas. Selles valdkonnas on viimaste aastate jooksul toimunud tähelepanuväärseid arenguid ning jätkatakse uute tehnoloogiate ja materjalide väljatöötamisega.

Plastmaterjalide 3D printimisel kasutatakse valdavalt sulatatud materjali sadestumise (ingl k *fused deposition modelling, FDM* või *fused filament fabrication, FFF*) tehnoloogiat. Selleks sulatatakse plastikut ~230°C juures ning järgides soovitud mudeli läbilõikeid luuakse kiht-kihi haaval läbi peene otsiku soovitud detail. Sellise tehnoloogia abil printimine on võrdlemisi kiire ja töökindel ning lubab luua keerulisi ja vastupidavaid detaile. Tehnoloogia on peamine, mida kasutatakse kiirprototüüpimises, sest toormaterjal on võrdlemisi odav ja mudeli valmistamise aeg lühike. Materjaliks kasutatakse põhiliselt polüakrülonitriilbutadieenstüreeni (ABS) või polülaktiidi (PLA), mille keskmine omahind 1 cm<sup>2</sup> kohta on 0,05 € (3D printimine – kasutusala ja erinevad tehnoloogiad, kuupäev puudub).

Hetkel põhinevadki turul kõigest 3D printimise materjalidest ligikaudu 88% plastikul. Siiski toimuvad arendused ka teiste materjalide kasutamisel 3D printimise lähteainena. Näiteks on 3CULAR OÜ seadnud eesmärgiks ressurside efektiivse kasutamise ning arendanud välja 3D saepuru printeri, mis aitab väärtustada puidujääke. Selle tehnoloogia abil püütakse teha võimalikuks puidust 3D printimine ning keeruliste disainide ja detailide loomine, mis tavatöövõtteid kasutades (käsitöö, CNC) nõuaksid liiga palju aega ja ressursse (joonis 3.2). Selline lähenemine võimaldaks mööblitootjatel ja disaineritel toota uusi puittooteid lihtsamalt ja kiiremini ning säästa ressursse ja keskkonda (Ülevaade idufirmadest ..., 2018).



Joonis 3.2. 3CULAR saepurust 3D printimisel valmistatud tootenäidis (3CULAR 3D saepuru printer, 2018)

Seesuguse innovaatilise tehnoloogiaga soovitakse pakkuda jätkusuutlikku alternatiivi plastikule 3D printimise materjalina (3CULAR 3D saepuru printer, 2018) ning ühtlasi luua teed ka muude materjalide kasutamise võimalusele 3D printimise valdkonnas, sealhulgas ka tekstiilijäätmetele.

Eeltoodud näited tekstiilijäätmete rakendamiseks on vaid osa kõigist võimalikest lahendustest. Tehnoloogiate arenguga muutub alternatiivsete materjalide kasutamine erinevateks rakendusteks ajapikku ka majandusliku tasuvuse mõttes konkurentsivõimelisemaks. Ka antud töö eesmärgi täitmiseks on praktilisteks katsetusteks valitud lahendused nii traditsiooniliste rakenduste kui ka uudemate võimaluste testimiseks, et avada tee olemasolevate ressursside efektiivsemaks kasutuseks siiani ebatraditsioonilistes valdkondades.

## 4. EESTI KAITSEVÄE TEKSTIILIJÄÄTMETE ÜMBERTÖÖTLEMINE JA UUTE MATERJALIDE VALMISTAMINE

Magistritöö empiirilise osa eesmärgiks oli Eesti kaitsevälase individuaalvarustuse kuuluva vormirõivaste näitel kaardistada erineva kiulise koostisega tekstiilijäätmete ümbertöötlemise võimalused koos praktiliste katsetustega, hinnata saadud materjalide omadusi ning pakkuda traditsioonilisemate rakenduste kõrval välja ka uudsemaid lahendusi ümbertöödeldud tekstiilmaterjalide kasutamiseks, arvestades seejuures jäätmete tervikliku ringlusse suunamise võimalusega, sõltumata nende kiulisest koostisest või seisukorrast. Lisaks lähtuti uue otstarbe kavandamisel materjalide ja toodete suletud olelusringi printsibist, et uued materjalid oleksid omakorda hõlpsasti korduskasutatavad, ümbertöödeldavad või võimalikult pika kasutusajaga. Katsetuste valikul oli erilise tähelepanu all just Eesti kaitsevälaste individuaalvarustuse tekstiilijäätmete terviklik ringlussevõtt, mistõttu välistati töös jäätmete ümberdisainimine uuteks toodeteks, mida on varasemalt juba erinevate tööde ja projektide raames (vt ptk 1.3) uuritud.

Töö eelnevates osades käsitletud mehaaniliste ja keemiliste ümbertöötlemise võimaluste ja ümbertöödeldud materjalide rakenduste baasilt oleks kõikide töösse valitud kaitsevälase individuaalvarustuse erineva koostisega materjalide katsetuste kombinatsioonide arv kujunenud ebamõistlikult suureks, mida magistritöö koostamiseks etteantud ajaraamistik läbi viia ei võimalda. Samas oli autorile oluline, et katsetusi saaks läbi viia erineva kiulise koostisega materjalidega, et töö tulemusi oleks võimalik lisaks Eesti kaitsevälase individuaalvarustusele laiendada ka tekstiilijäätmetele üldisemalt. Lisaks oli eesmärgiks leida rakendus ka väga peeneks ja ebahürtlase struktuuriga massiks purustatud tekstiilijäätmetele, et tuua välja universaalseid rakendusi, mida ei piiraks jäätmete kiuline koostis ja seisukord. Seetõttu sai läbiviidavate katsetuste valiku osas määravaks vajalike seadmete, lisamaterjalide ja abivahendite olemasolu ning kättesaadavus, suletud olelusringi põhimõte ja rakenduste universaalsus, sõltumata jäätmete seisukorrast, kiulisest koostisest ja purustusastmest.







## 4.1 Katsetuste läbiviimiseks valitud tekstiilijäätmed

Kaitseväelase riidevarustuse elementide loetelu ja kogused on määratletud kaitseministri 28.06.2006. aasta määruse lisaga nr 1 (Riidevarustuse elementide loetelu ja kogused, 2007). Selle hulka kuuluvad väga erineva materjali ja otstarbega esemed, alates vormiriietuse juurde kuuluvast aluspesust kuni kaitseväelase tunnusplaatide ja söögiriistade komplektini.

Tekstiilijäätmete ümbertöötlemise katsetuste läbiviimiseks oli tarvilik teha valik varustusesemete osas, mis võimaldaks läbi viia testimisi nii ühekomponentsete kui ka erineva kiulise koostisega jäätmeteks arvatud rõivaesemetega. Seega sai kiulisest koostisest lähtuvalt valitud maa- ja õhuväe ajateenija vormiriietuse elementide hulgast tabelis 4.1 toodud esemed.

Tabel 4.1. Katsetuste läbiviimiseks valitud vormiriietuse elemendid

Materjali nr	Vormiriietuse element	Põhi-materjal	Abimaterjal
1	<p>T-särk</p> 	100% CO*	Kaeluse soonik (90% CO*, 10% EA*); Õmblusniit (100% PES*)
2	<p>T-särk</p> 	100% PES*	
3	<p>Välivormi jakk/välivormi püksid</p> 	50% CO*, 50% PES*	Õmblusniit (100% PES*); Tõmblukud (PES*, tsink emaleeritud või galvaniseeritud pinnakattega); Öösid (messing); Nööbid (PA*/POM*/TPE*); Tripipael (100% PES*); Takjapael (100% PA*)
4	<p>Sviiter</p> 	50% WO*, 50% PAN*	Kumminiit; Markeerimissilt (100% PES*)

\*CO - puuvill, EA - elastaan, PES - polüester, PA - polüamiid, POM - polüoksümetüleenatsetaal, TPE - termoplastne elastomeer, WO - vill, PAN - akrüül

Kokku valiti katsetamiseks nelja erineva kiulise koostisega rõivajäätmed, et katsetuste tulemusi oleks võimalik laiendada ka suuremale hulgale erineva kiulise koostisega tekstiilijäätmetele ning välja pakutud lahendused oleksid rakendatavad kogu Eesti Kaitseväge tekstiilmaterjalidest jäätmetele tervikuna. Erinevate kiulise koostistega materjalidele viitamise lihtsustamiseks anti igale koostisele oma number. Nii on töös edaspidi kasutusel 100 % puuvillasele materjalile viide Materjal nr 1, 100% polüestermaterjalile viide Materjal nr 2, 50% puuvilla ja 50% polüestri seguga materjalile viide Materjal nr 3 ning 50% villa ja 50% akrüüli seguga materjalile viide Materjal nr 4.

Valitud rõivaesemete seisukord oli väga erinev. Valiku seas oli nii vähekasutatud ja visuaalsete kulumismärkideta esemeid kui ka määrdunud ja rebenenud rõivaid. Mitmed esemed sisaldasid lisaks erinevale kiulisele koostisele ka erinevatest materjalidest furnituuri. Näiteks on välivormi jakil öösid, nõöbid, lukk, takjapael (joonis 4.1); pükstel lukk, kumm, paelad, nõöbid, jm. Ka ühekomponentse puuvillase materjaliga esemetel on õmblustes kasutatud vähesel määral polüesterniiti.



Joonis 4.1. Maa- ja õhuväe ajateenija välivormi jakk koos furnituuriga

Materjalide koostisest lähtuvalt oli oluline jäätmete eeltöötlemise etapis kaardistada ka valitud seadmete võimekus purustada samaaegselt erinevaid materjale.

## 4.2 Lähtematerjali ettevalmistamine

Katsetamiseks valitud tekstiiljätmed olid kahjuritevabad ja seisukorras, mis välistas vajaduse neid eelnevalt desinfitseerida. Seetõttu elimineeriti eeltöötlemise juures need etapid ja alustati jäätmete sorteerimisest, jagades need manuaalselt vastavalt tekstiilmaterjalide koostisele. Jäätmete kiulise koostise määramisel oli abiks rõivastel säilinud etiketid, mis on Kaitseväel viimaste aastate riidevarustuse hankega palutud pakkujal varustada märkega „SILDI EEMALDAMINE KEELATUD“. Nende paikapidavuse ja õigsuse kontrollimiseks paluti Kaitseväel esitada ka vastavate vormirõivaste hankimise aluseks koostatud dokumentatsioon. Selle abil tuvastati etiketidel esitatud andmete õigus ja vastavus materjalide kiulisele koostisele.

Edasi liiguti jäätmete purustamise etappi. Tekstiiljätmete purustamiseks pöördui Tallinna Tehnikaülikooli desintegraatortehnoloogia labori poole. Nagu ka peatükis 2.2.4 kirjeldatud, on laboratoorium siiani keskendunud põhiliselt jäikade materjalide, nagu metall, komposiit- ja keraamilised materjalid, purustamise ja jahvatamise uurimisele ning eraldi tekstiilmaterjalide purustamise kogemus puudub. Elastsemate materjalide purustamisega on kokku puutunud vaid muude materjalide koostises ehk komposiitmaterjalide seas esinevate kangasmaterjalide purustamisega seonduvalt. Samuti ei ole ka varasemast teada, et seesugust tehnoloogiat oleks tekstiiljätmete purustamiseks teistes riikides kasutatud, mistõttu on taolise lähenemise ja purustamisvõimaluste kaardistamise uudne ja oluline. Seda just seetõttu, et elastsete ja sitkete materjalide töötlemisel võib peenestamise efektiivsus oluliselt alaneda, sest löökide kineetiline energia kulutatakse mitte purustamisele, vaid deformeerimisele ja soojendamisele. Nii on selliste materjalide peenestamine toatemperatuuril energiakulu mõttes sageli ebaratsionaalne. Efektiivsuse tõstmiseks kasutatakse sellistel juhtudel näiteks lämmastikuga jahutamist, mis muudab materjali hapramaks.

Desintegraatortehnoloogia labori poolt välja arendatud aparatuuril on olemas ka separeerimissüsteem, mis võimaldab purustamise käigus erinevate tsüklite raames materjale üksteisest eraldada. Siiski, antud töö raames ei keskendutud aja- ja ressursimahukuse tõttu eraldi separeerimisvõimaluste katsetustele ja piirduti vaid erineva koostisega tekstiilmaterjalide purustamisvõimaluste kaardistamisega. Tekstiilmaterjalidest erineva koostisega materjalide separeerimisvõimaluste põhjalikku uurimist jätkatakse eraldi projekti raames. Magistritöoga seonduvalt oli purustamise etapis eesmärgiks katsetada desintegraatortehnoloogia labori olemasolevate seadmete suutlikkust tekstiilmaterjalide purustamiseks ja jahvatamiseks, et kaardistada tulemused ja teha järeldused vajalikeks arendusteks spetsiaalselt erineva koostisega

tekstiilmaterjalide purustamise tehnoloogia väljatöötamiseks. Ühtlasi oli muidugi eesmärgiks ka purustada vajalik kogus erineva koostisega valitud tekstiilijäätmeid planeeritud mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise katsetuste läbiviimiseks.

Olemasoleva tehnoloogia ja aparatuuri seadistamiseks ning erinevate löikamistüüpide ja jahvatusviiside katsetamiseks lõigati esmalt käsitsi materjalidest nr 1 ja nr 3 ligikaudu 40 x 20 cm suurused tükid. Purustamisel oli soov katsetada just erineva paksuse ja furnituuriga rõivajäätmete osi (tagasipööratud servad, õmblused, taskud, jne), et selgitada välja, milliste meetoditega on võimalik erinevate tulemusteni jõuda. Seetõttu lõigati tükke eelkõige just nimetatud osi sisaldavatest detailidest (joonis 4.2).



Joonis 4.2. Purustamiseks ettevalmistatud erineva paksuse ja furnituuriga tekstiilitükid materjalist nr 3 ja purustatud materjal.

Esimesena katsetati toatemperatuuril materjale purustamist pooltööstuslikul desintegraatorveskil DSL-115, mille tehnilised andmed on toodud lisa 2. Tulemuseks oli vatitaoline, purustatud kiududest materjal, mida oli keeruline separeerida (joonis 4.2). Sellest sai järeldada, et antud meetod on küllaltki väheefektiivne, sest lagunemine toimus löökide asemel materjali kihtide hõõrdumisel üksteise vastu. Vedela lämmastiku abil materjali jahutamine ning tõhusamaks purustamiseks hapramaks muutmine oleks tekstiilijäätmete purustamiseks liigselt kulukas ja ebaratsionaalne, mistõttu otsustati selle katsetamisest loobuda.

Laboril oli varasemast kogemus selliste keerulisemate materjalide purustamisel nagu õhukesed plastikpudelikud, lambavill, tekstiili ja kummi sisaldavad komposiitmaterjalid. Seetõttu otsustati järgnevat katsetada löikeprotsessi kombineerimist tekstiilmaterjali eelneva deformeerimisega. Deformeerimiseks oli purustatava tekstiili keeramine tihedaks rulliks, mille ideoloogia pärines varasemalt katsetatud kummi töötlemisest, kus hõõrdumise ja deformeerumise kombinatsiooni

kasutamine andis võrreldes lõikamisega energiasäästu 30-70% ning ei vigastatud materjali lõikeservasid.

Tekstiiliga samalaadse katsetuse läbiviimiseks kasutati kahe kaskaadiga eksperimentaalpurustit PP-1 (lisa 3). Purustamiseks konstrueeriti spetsiaalne tekstiili peenestamiseks mõeldud eksperimentaalsõlm, milles toimus tihedasse, ligikaudu 4 cm läbimõõduga, rulli keeratud tekstiilmaterjali etteandmine kõrgel kiirusel pöörlevale peenestavate elementidega völliile.

Kasutatud mooduli konstruktsioon ja protsessi tehnoloogilised parameetrid ei olnud küll tekstiili purustamiseks optimaalsed, kuid purustamine samaaegselt koos tekstiili deformeerimisega osutus paljulubavaks. Sõltuvalt peenestatavate elementide pöörlemiskiirusest ja eelneva deformeerumise tasemest ning purustamistsüklite arvust, moodustusid erineva pikkusega kiudude mass.

Järgnevatel fotodel (joonised 4.3 ja 4.4) on näha kirjeldatud meetodil saavutatud tekstiilijätmete erinevad purustamisastmed.



Joonis 4.3. Materjal nr 1 purustatud tulemused erinevatel peenestuselementide pöörlemiskiirustel



Joonis 4.4. Materjal nr 3 purustatud tulemused erinevatel peenestuselementide pöörlemiskiirustel

Eelkatsetuste tulemused näitasid, et kõige keerulisem on polüestrit sisaldava materjali purustamine, sest sünteetiline kiud hakkab erinevate aparatuuride purustus- ja peenestusmehhanismide temperatuuri tõustes sulama. Optimaalse tulemuse saavutamiseks oli erineva kiulise koostisega materjalide purustamisel vajalik kombineerida erinevaid löikamistüüpe, mis aga eraldi seadmete kasutamise vajaduse puhul osutus kokkuvõttes küllaltki ajamahukaks. Seetõttu otsustati ümbertöötlemise katsetuste jaoks vajaliku koguse purustamiseks kasutada igast materjalist vaid ühe purustusastmega lähtematerjali. Planeeritud katsetuste läbiviimiseks oli universaalse sobivusega kõige peenemaks jahvatatud, nn pulbrilaadne tulemus, mida nimetatakse ka kiutolmuks. Praktikas ei ole kiutolmule leitud muud rakendust kui põletamine (Niiler, 2014) või betooniga segamine.

Järgnevatel joonistel 4.5, 4.6, ja 4.7 on näha materjalide edasisteks katsetusteks ettevalmistatud purustatud lähteaine.



Joonis 4.5. Katsetamiseks valitud kaitsevälase individuaalvarustuse tekstiilijätmed ja nende purustamise tulemusena saadud materjalid

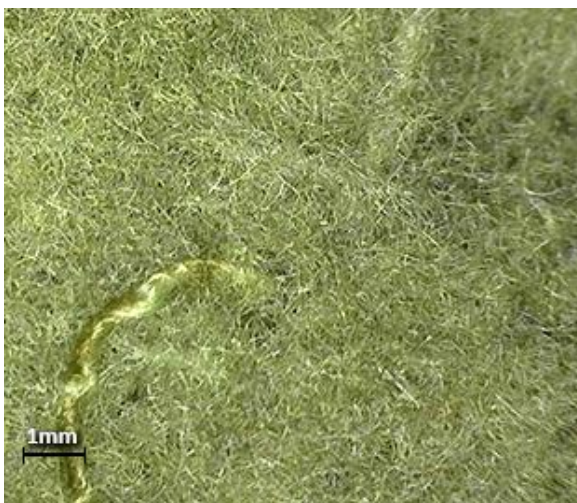
Purustatud tekstiilmassi tulemus oli siiski küllaltki ebahütlane ja sisaldas ka pikemaid kiudusid ning nendest moodustunud kiutombud (vt joonis 4.6), mistõttu on kvaliteetsemate toodete valmistamiseks vajalik purustusmetoodikat kindlasti parendada. Parema ülevaate katsetusteks kasutatud lähteaine struktuurist annavad alljärgnevad digitaalse mikroskoobiga *Dino-Light* salvestatud mikrofotod.



Materjal nr 1



Materjal nr 2



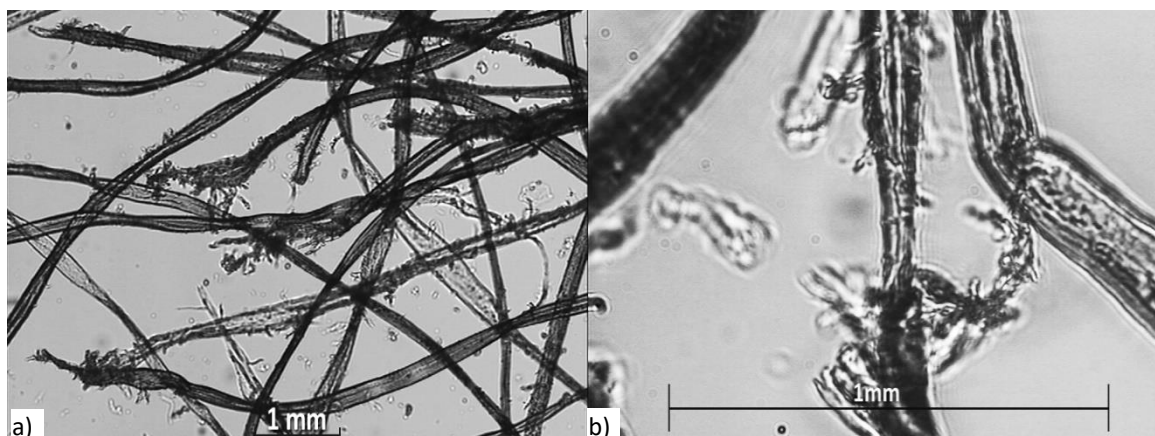
Materjal nr 3



Materjal nr 4

Joonis 4.6. Katsetusteks kasutatud purustatud kiudude 25-kordne suurendus

Joonisel 4.7 on Zeiss Axioskop 2 valgusmikroskoobi digitaalfotod 100- ja 500-kordse suurendusega puuvilla ja polüestri purustatud kiudude segust. Fotodelt on hästi näha, et mehaanilise purustamise käigus on tekstiilkiud rebestatud ja saanud kahjustada, mistõttu ei ole kasutatud purustamise meetodid sobilikud, kui soovitakse säilitada võimalikult pikad ja kahjustamata kiud uue lõnga või materjali valmistamiseks.



Joonis 4.7. Materjal nr 3 purustatud kiudude mikrofotod 100- (a) ja 500- (b) kordse suurendusega

Teisalt on aga kiud võrdlemisi pikad, kui eesmärgiks on tekstiilijätmetest valmistada pulbrilist lähteainet. Seetõttu vajab kvaliteetse ja ühtlase purustatud lähteaine saavutamise protsessi parendamist.

Purustamisetapi jooksul kaardistatud tulemustest saab kokkuvõttes järeldada, et elastsemate materjalide purustamine ja jahvatamine kasutuseloleva tehnoloogia abil vajab täiendamist. Väljatöötatud aparaat on mõeldud eelkõige kõvade materjalide purustamiseks, mis tänu kõrgemale sulamistemperatuurile taluvad hästi purustamisel tekkivat mehhanismide kuumenemist. Olemasoleva desintegraatorveskite süsteemi baasilt on vajalik edasi arendada spetsiaalselt tekstiilmaterjalide purustamiseks ja jahvatamiseks sobilik tehnoloogia, mida oleks võimalik rakendada erineva kiulise koostise ja furnituuriga tekstiilijätmete ümbertöötlemise ettevalmistamiseks. Töö koostamise ja katsetuste läbiviimise käigus on nende tegevuste elluviimiseks koostatud ka eraldi projekt „Tekstiilijätmete purustamistehnoloogia ja uudsete materjalide arendamine tekstiilijätmete väärimiseks ning ringmajanduse toetamiseks”, millele nii Keskkonnaministeerium kui ka MTÜ Uuskasutuskeskus on esitanud vastavasisulised kinnituskirjad tehnoloogia väljaarendamise vajalikkuse toetamiseks. MTÜ Uuskasutuskeskus on oma kirjas ka selgitanud, et Eestis ja selle lähiriikides puudub hetkel suuremates kogustes madala kvaliteediga tekstiilijätmete korduvkasutuseks ja ümbertöötlemiseks võimekus ning see on valdkond, mis vajab arenguid ja investeeringuid, mistõttu projektiga kavandatud lahenduste järele on tugev sisuline vajadus.



## 4.3 Tekstiilijäätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise protsessid ja selle tulemusena saadud materjalid

Valitud tekstiilijäätmete mehaanilise ja keemilise ümbertöötlemise katsetuste planeerimisel sai lähtunud eesmärgist leida rakendus tekstiilijäätmetele tervikuna, sõltumata nende kiulisest koostisest ja seisukorrast. Lisaks oli soov levinud rakenduste kõrval katsetada ka võimalikke uudsemaid lahendusi. Selleks kavandati erineva kiulise koostisega purustatud tekstiilmassist:

- lausmaterjalide valmistamine,
- vedeltapeedi ehk dekoratiivkrohvi valmistamine,
- vineer- ja puitkiudplaatide isolatsioonikihi valmistamine,
- tekstiilipurust 3D printeri filamendi valmistamine,
- uute kiudude formeerimine materjali lahustamise teel.

Erineva kiulise koostisega materjalide katsetuste kombinatsioonide arv oli väga suur. Seetõttu oli möödapääsmatu teha testitavate materjalide osas valik selliselt, et tulemusi oleks võimalik laiendada ka teistele materjalidele.

### 4.3.1 Lausmaterjalide valmistamine

Purustatud tekstiilmassist katsetati lausmaterjalide valmistamist kahel erineval meetodil. Üheks katsetusviisiks oli purustatud tekstiilmassist lausmaterjali valmistamine kraasimise ja kuumpressimise teel (edaspidi *Lausmaterjal 1*) ning teiseks katsetusviisiks lausmaterjali valmistamine polüvinüülatsetaadi vesiemulsiooniga (edaspidi *Lausmaterjal 2*).

**Lausmaterjal 1.** Lausmaterjali 1 valmistamiseks oli esmaseks etapiks purustatud tekstiilkiudude kraasimine. Selleks kasutati *Louet* trummelkraasi (joonis 4.8). Tegemist on käsikraasiga, mille trumli laiuks on 10 cm. Katsekehade valmistamiseks segati purustatud tekstiilkiudude mass polülaktiid (PLA), et tagada väga väikese pikkusega purustatud kiududele sidusus nii kraasimisel, kui ka hiljem kuumpressimisel lausmaterjaliks vormimisel. PLA kiudude spetsifikatsioon on toodud lisa 4.



Joonis 4.8. Materjali nr 4 ja PLA segu kraasimine trummelkraasiga

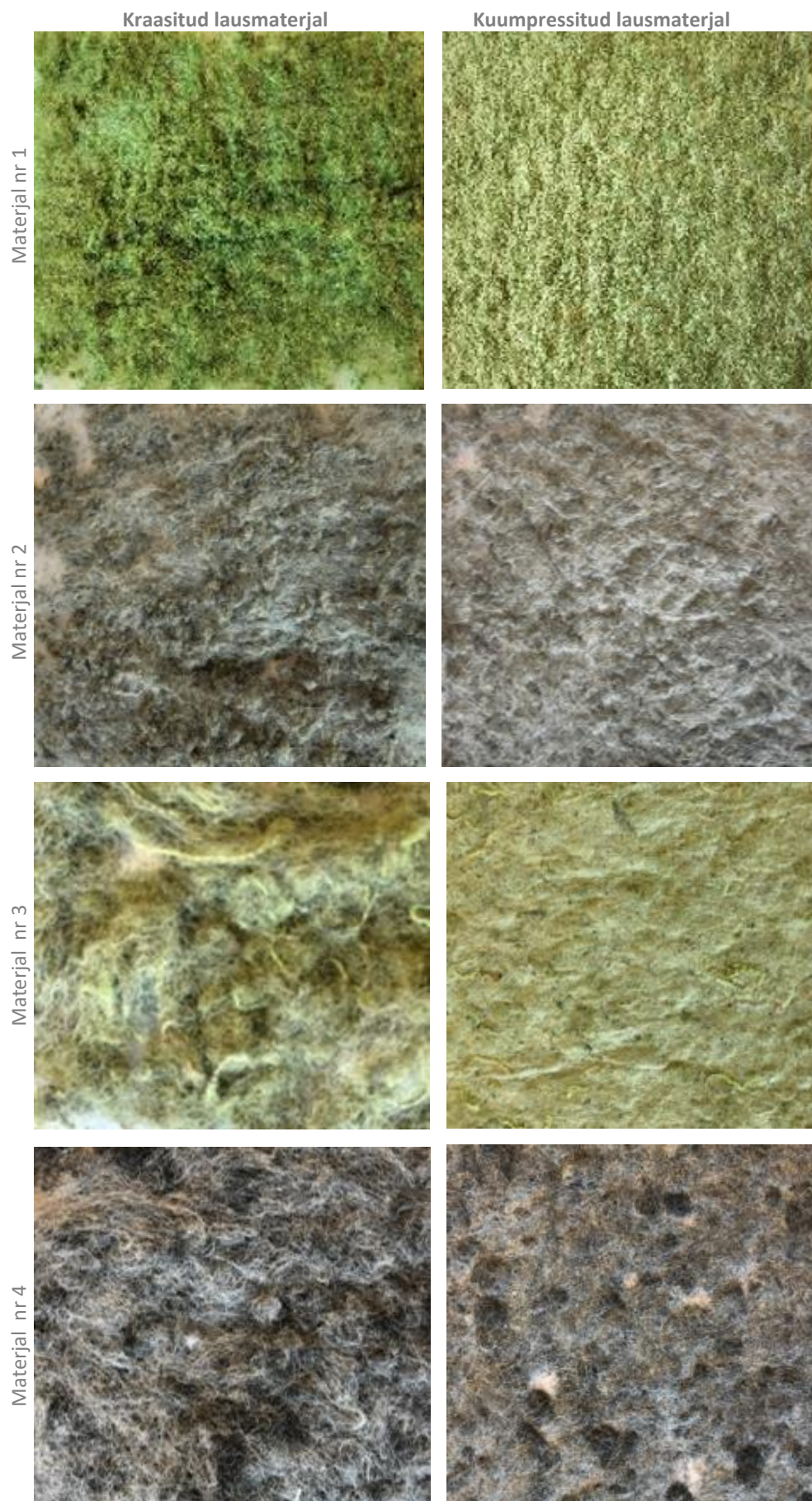
PLA kasuks osutus valik eelkõige seetõttu, et tegemist on sünteeskiuga, mida saadakse 100% taastuvatest ressurssidest ning mis on biolagunev. PLA-d toodetakse kääritamise teel fermenteeritud maisitärklisest või suhkruroost. Välimuselt ja omadustelt sarnaneb materjal puuvillaga ning on tugevuselt võrreldav nailoniga. Ometi on PLA hüdrofiilne ja hea vastupanuvõimega süttimisele, kõrge UV-kiirguse taluvusega, paindlik, sileduselt võrreldav siidkiududega ning ei kortsu (Tuulik, 2010). Need omadused on olulised, et tagada valmistavate uute materjalide ja toodete katkematu ringlus ka hilisemate ümbertöötlemiste faasis.

Lausmaterjali 1 katsekehad valmistati kõigist valitud materjalist, et selgitada välja nende materjalide omadused ja erisused, mis aitaksid hinnata nende sobivust erinevateks otstarveteks. Katsekehade valmistamiseks segatud purustatud materjalide vahekord PLA kiududega on toodud tabelis 4.2.

Tabel 4.2. Lausmaterjali 1 valmistamisel kasutatud PLA kiudude ja purustatud tekstiilmaterjalide vahekord

Materjal	Purustatud kiudude mass, g	PLA mass, g	Vahekord
1	23,48	8,28	74/26
2	62,35	13,55	82/18
3	42,91	10,92	80/20
4	31,88	15,08	68/32

Arvestades PLA sulamistemperatuuri, pressiti kahe erineva paksusega katsekehasid dubleerpressiga Meyer RPS-Mini temperatuuridel vahemikus 100 – 130 °C. Tulemuseks olid erineva jäikuse ja tihedusega materjalid (joonis 4.9).



Joonis 4.9. Erinevatest materjalidest valmistatud lausmaterjali näidised

Kuumpressitud katsekehade omaduste selgitamiseks leiti katsekehade pindtihedus ja viidi läbi tõmbekatsed. Pindtiheduse leidmiseks on kasutatud valemit (Plamus, 2018):

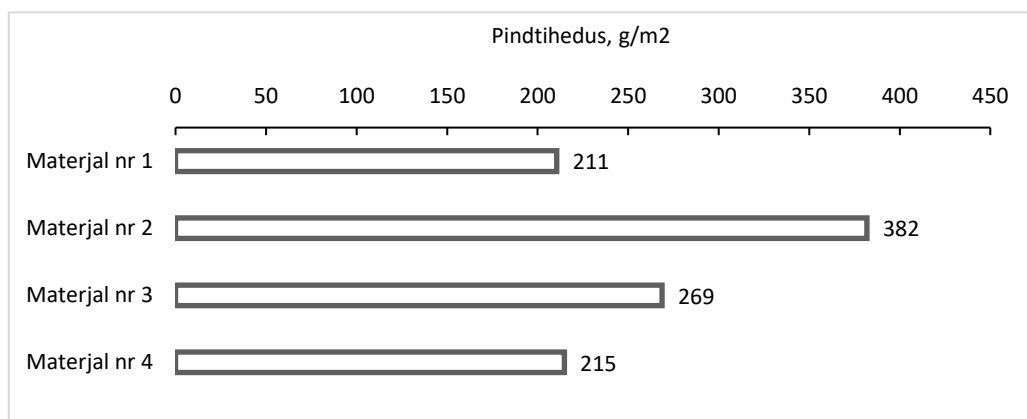
$$G_s = \frac{m \cdot 10\,000}{A}, \quad (4.1)$$

kus  $G_s$  - materjali pindtihedus, g/m<sup>2</sup>,

$m$  - katsekeha kaal, g,

$A$  - katsekeha pindala, cm<sup>2</sup>.

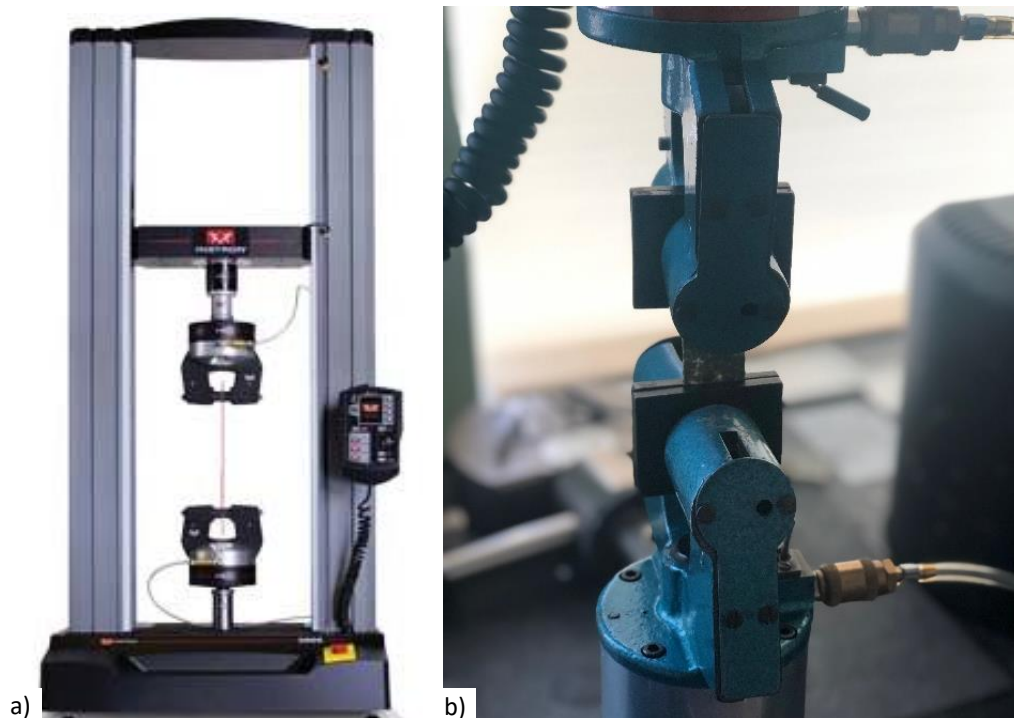
Käsikraasiga valmistatud materjali paksus oli võrdlemisi ebaühtlane, mistõttu kasutati keskmise tulemuse kalkuleerimiseks igal temperatuuril pressitud kahe erineva paksusega katsekehasid. Katsekehade detailsed andmed on toodud lisan 5, keskmised tulemused on näha joonisel 4.10.



Joonis 4.10. Lausmaterjali 1 erineva kiulise koostisega katsekehade keskmised pindtihedused

Järgmiseks viidi katsekehade läbi tõmbekatsed. Tõmbekatsesega on võimalik määrata materjali võimet osutada vastupanu pidevalt toimivale välisjõule, hinnates materjali venitamisel katkemiseni materjali tugevust ja deformatsiooni karakteristikuid. Kõigi tekstiilmaterjalide jaoks on katkekoormus ja katkevenivus tähtsateks normatiivseteks näitajateks. Katkekoormus, mis määratakse vahetult katkemismomendil on põhiline kriteerium riide mehaaniliste omaduste hindamisel ja kvaliteedi standardnäitaja. Selle järgi on võimalik prognoosida materjali kulumiskindlust ja kestvust. Katkekoormuse ja katkevenivuse näitajate tegelike väärtuste mittevastavus normatiivsetele on materjalide mittekvaliteetsuse tunnuseks (Plamus, 2018).

Tõmbekatsete läbiviimiseks kasutati universaalset mehaaniliste katsetuste seadet *Instron 5866* (joonis 4.11), mille maksimaalne tõmbejõud on 10 kN. Seadmele oli tekstiilmaterjali kinnitamiseks paigaldatud metallist haaratsid, vahekaugusega 30 mm. Ülemise haaratsi liikumiskiiruseks oli 100 mm/min. Vastavalt testitava materjali keskmisele pindtihedusele, mis jäi 200 ja 500 g/m<sup>2</sup> vahele, määrati katsetuste keskmiseks eelkoormuseks 5 N.



Joonis 4.11. Tõmbekatseseade Instron 5866 (Instron veebileht) (a) ja katsetuste läbiviimiseks kasutatud pneumaatilised haaratsid (b)

Sarnaselt pindtiheduse arvutamisele, kasutati keskmise tulemuse saavutamiseks igal temperatuuril pressitud katsekehadest kahe erineva paksusega materjali, millest igaühega viidi läbi kolm katset. Katsekehade laiuks oli 20 mm ja pikkuseks 70 mm. Antud materjalide puhul oli katkemise momenti teatud juhtudel raske määrata ning seetõttu kasutati tulemusi maksimaalse jõu juures. Suhtelise venivuse määramiseks maksimaalse jõu juures lähtuti järgmisest valemist (Plamus, 2018):

$$\varepsilon_t = \frac{l_t \cdot 100}{L_0},$$

kus  $\varepsilon_t$  - suhteline venivus maksimaalse jõu juures, %,

$l_t$  - absoluutne venivus maksimaalse jõu juures, mm,

$L_0$  - katsekeha algpikkus, mm.

(4.2)

Absoluutse venivuse ( $l_t$ ), mis on katsekeha pikkuse muutumine maksimaalse jõu juures, saamiseks lähtuti valemist (*ibid.*):

$$l_t = L_k - L_0,$$

kus  $l_t$  - absoluutne venivus maksimaalse jõu juures, mm,

$L_k$  - katsekeha pikkus maksimaalse jõu juures, mm,

$L_0$  - katsekeha algpikkus, mm.

(4.3)

Saadud lausmaterjalide tugevusomadusi hinnati suhtelise koormusega ( $P_0$ ), mis leiti maksimaalse jõu juures. Suhtelise koormuse valemis on lisaks maksimaalsele jõule arvesse võetud ka pindtihedust, mis annab võimaluse võrrelda omavahel erineva pindtihedusega materjalide tugevust (Plamus, 2018):

$$P_0 = \frac{P_t \cdot 1000}{B \cdot G_s}, \quad (4.4)$$

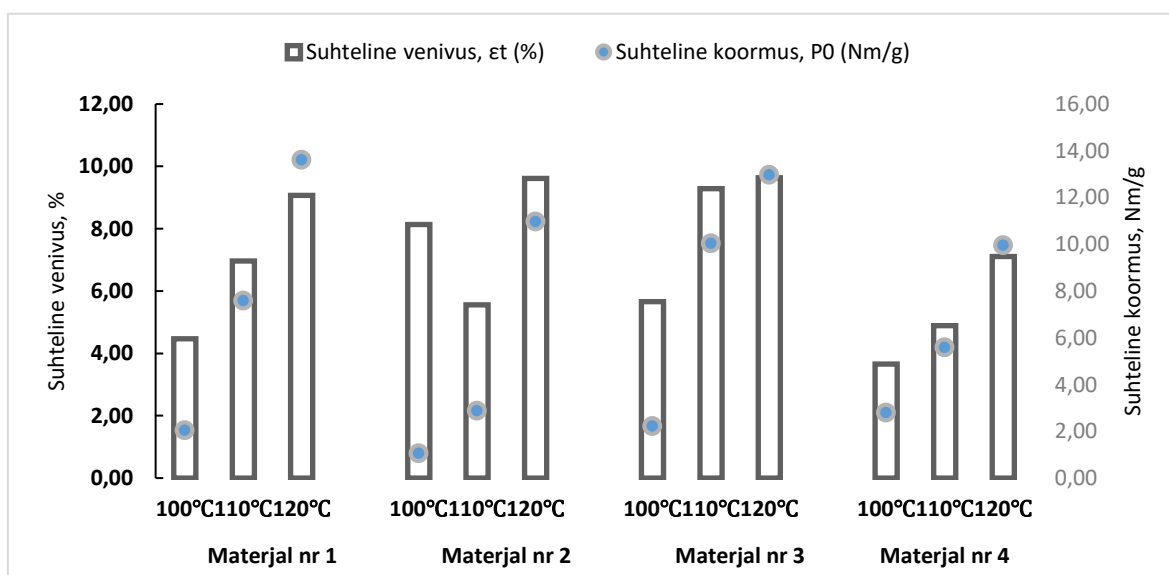
kus  $P_0$  - suhteline koormus maksimaalse jõu juures, Nm/g,

$P_t$  - maksimaalne jõud, N,

$G_s$  - pindtihedus, g/m<sup>2</sup>,

$B$  - katsekeha laius, mm.

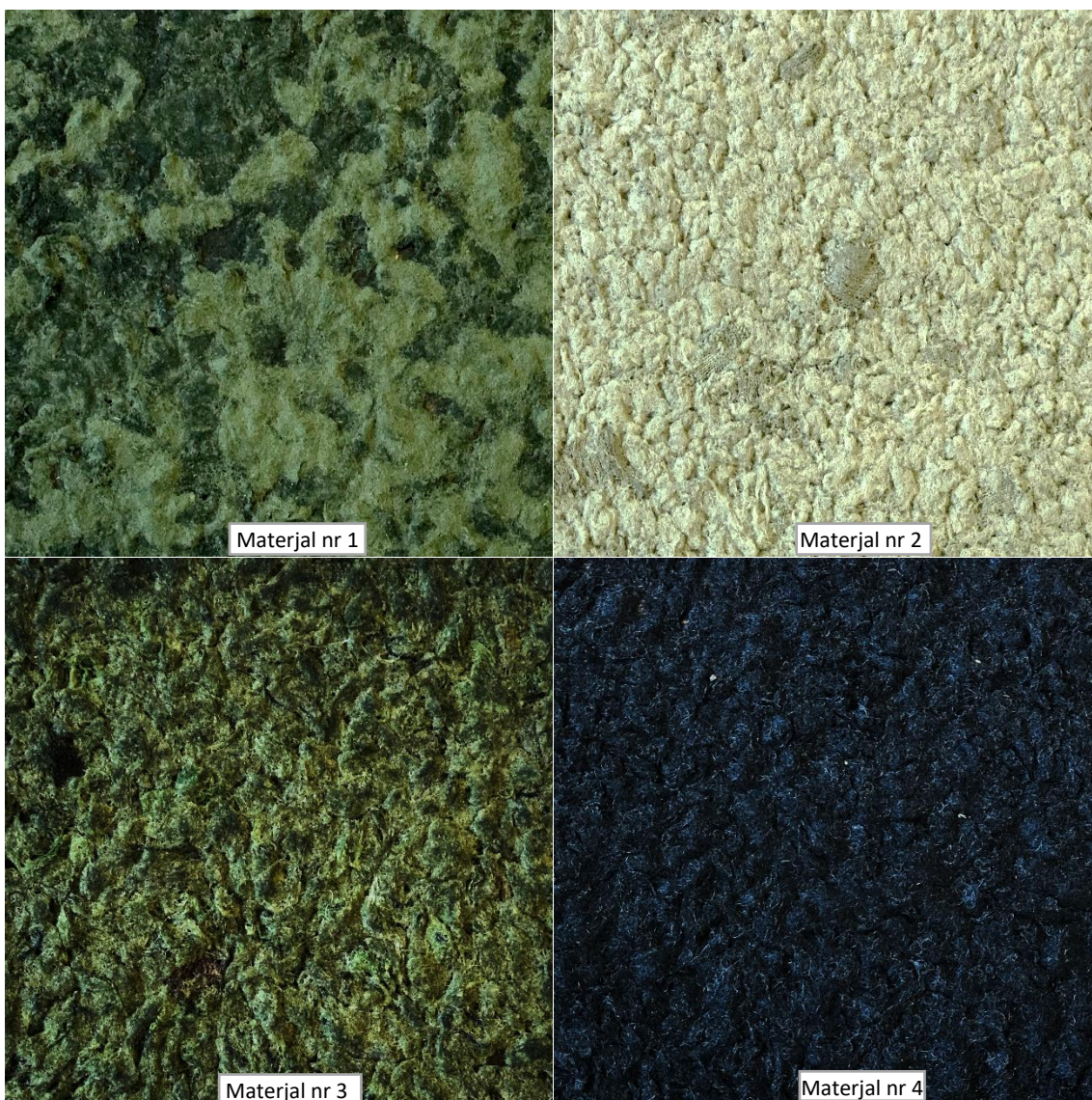
Katsetuste tulemused on toodud lisa 4. Suhtelise venivuse ja koormuse keskmised tulemused erinevatel temperatuuridel töötlemise järgselt on näha joonisel 4.12.

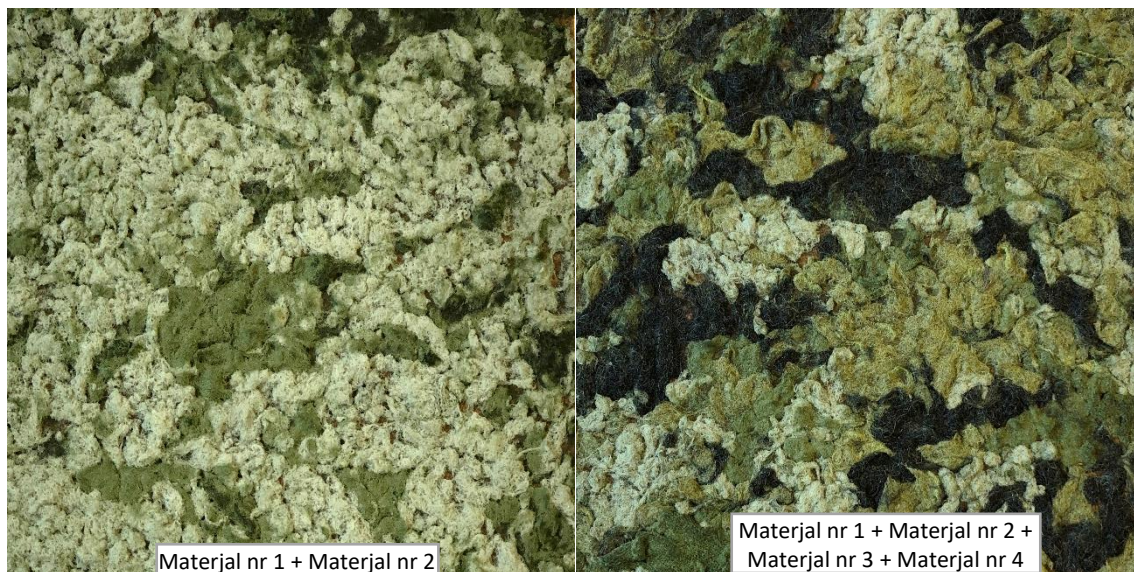


Joonis 4.12. Lausmaterjal 1 tõmbekatsete tulemused

Katsetuse tulemused näitasid, et kõrgemal temperatuuril töödeldud materjal talus suuremat koormust. Ka suhteline venivus temperatuuri tõustes suurenes. Lausmaterjali omadusi ei ole otstarbekas võrrelda rõivastele kehtestatud standardite miinimumnõuetega. Seetõttu saab vaid suhtelise koormuse keskmiste näitajate järgi hinnata valmistatud materjali vastupidavaks, mis sobib lisaks dekoratiivsetele otstarvetele ka mõningate tarbetoote valmistamiseks.

**Lausmaterjal 2.** Lausmaterjali 2 valmistamiseks kasutati samuti kõiki purustatud tekstiilmaterjale. Eesmärgiks oli sidusaine polüvinüülatsetaadi vesiemulsiooni (PVA) kaasabil struktuurse dekoratiivkrohvi valmistamine. Purustatud tekstiilmaterjalid segati ühekomponentse vesialuselise Eskaro PVA liimiga, mida lahjendati veega vahekorras 1:2. Iga purustatud tekstiilmaterjali 1 grammi kohta lisati 10 ml lahjendatud PVAd ning segati käsitsi tekstiilmaterjali täieliku märgumiseni. Pinnale nakkuvuse testimiseks kanti segu pahtlilabidaga puitkiudplaadile (Soome papp), mida krunditi eelnevalt lahjendamata PVAg. Materjalidel lasti toatemperatuuril kuivada 24 tundi. Kuivanud dekoratiivkrohv erinevate materjalide koostistega on näha joonisel 4.13.





Joonis 4.13. Erineva kiulise koostisega tekstiiljätmetest valmistatud dekoratiivkrohvi näidised

Kuivamise järgselt testiti ka materjali eemaldatavust aluspinnalt. Selleks pihustati krohvitud pinnale vett ning lasti seista 25 minutit, et pinnakate ühtlaselt märguks. Niisutatud kattekihi eemaldamine pahtlilabida abil ei valmistanud raskusi. Puuduseks oli vaid kuivanud aluspinna (puitkiudplaadi) määrdunud ilme peale krohvi eemaldamist. PVA liimist tekkinud jälgi on tumedalt ja niiskust imavalt pinnalt keeruline eemaldada, et taastata viimistlemata kujul esialgne väljanägemine. Pind vajab lisatöötlust või uuesti katmist. Eemaldatud materjali on võimalik kasutada uuesti samaks otstarbeks või isolatsiooni- või täitematerjalina.

### 4.3.2 Komposiitmaterjali valmistamine

Kolmandaks mehaanilise ümbertöötlemise katsetuste viisiks oli purustatud tekstiiljätmetest vineer- ja puitkiudplaatidele isolatsioonikihi valmistamine. Katsekehade valmistamiseks kasutati sidusainena samuti PVA lahust ning külmpressimise meetodit. Testimiseks valiti kolme erineva koostisega ehituses ja siseviimistluses kõige enam kasutatavat plaati: vineer, OSB ehk suunatud laastuga puitplaat ja puitlaastplaat. Plaatidest lõigati 10 cm x 10 cm suurused katsekehad. Iga erineva katsekeha kahe plaadi vahele segati erineva kiulise koostisega tekstiilmaterjalidest ja PVA segust isolatsioonikiht, mille kogused on näha tabelis 4.3.



Tabel 4.3. Komposiitmaterjalide valmistamiseks kasutatud koostisosad ja kogused

Plaat	Kahe plaadi kaal kokku	Purustatud tekstiilmaterjal	Sideaine
OSB	135,85 g	Materjal nr 1 – 3,31 g Materjal nr 2 – 3,31 g Materjal nr 3 – 3,30 g Materjal nr 4 – 3,31 g	25 g PVA-d + 50 ml vett
Puitlaast	207,61 g	Materjal nr 4 – 10 g	15 g PVA-d + 5 ml vett
Vineer	226,30 g	Materjal nr 1 – 2,5 g Materjal nr 2 – 2,5 g Materjal nr 3 – 2,5 g Materjal nr 4 – 2,5 g	18 g PVA-d + 5 ml vett
Vineer	224,38 g	Materjal nr 2 – 15 g	15 g PVA-d



Kahe katteplaadi vahele paigutatud tekstiilmass asetati 25 minutiks pressi alla. Pressimiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Puidutehnoloogia laboris asuvat hüdraulilist külmpressi, survemassiga 75 kg/cm<sup>2</sup>. Peale pressimist jäeti katsekehad 24 tunniks toatemperatuurile 25 kg raskuse alla kuivama. Saadud materjalid on ära toodud allolevatel fotodel (joonis 4.14).



Joonis 4.14. Erineva kiulise koostisega tekstiiljätmetest valmistatud komposiitmaterjalide näidised

Tekstiiljätmetest saadud soojus- ja heliisolatsiooni materjali omadused ja lisandväärtus sõltuvad täitematerjali koostisest, tihedusest ja paksusest. Vastavalt otstarbele on võimalik valmistada erineva tiheduse ja paksusega isolatsioonikihte ning valida vajadusest lähtuvalt kasutatavate materjalide koostis.

### 4.3.3 Tekstiiljätmete lahustamine ja uute kiudude formeerimine

Valitud tekstiiljätmete keemilise ümbertöötlemise katsetuste planeerimisel seadis olulisi piiranguid uute kiudude ketramiseks kasutada olevad seadmed ja abivahendid. Lahusest uute kiudude formeerimisel on Tallinna Tehnikaülikooli Polümeeride ja tekstiilitehnoloogia laboris olemas elektroketrusseadmed, mis võimaldavad toota nanokiulist õhukest lausmaterjali. Märgetruse ehk emulsioonmeetodil kiudude formeerimise katsetamiseks vajalikud seadmed Eesti ülikoolides ja teadusasutustes puuduvad.

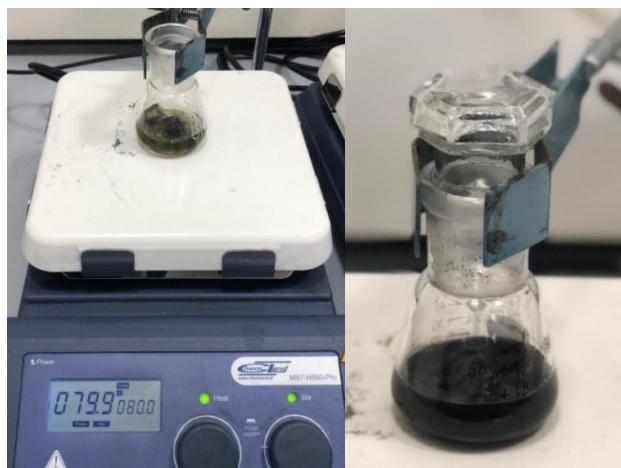
Tekstiiljätmete lahustamise katsetusteks valiti kahe erineva kiulise koostisega tekstiilmaterjalid ehk materjalid nr 1 ja nr 4, mis võimaldaksid läbi viia testimised erinevate lahustitega. Materjali nr 1 lahustamiseks kasutati ionvedelikku 1-etüül-3-metüülimidasoolium bromiid ([EMIm]Br). Materjali nr 4 lahustamiseks valiti orgaaniline lahusti dimetüülsulfoksiid (DMSO). Lahustite valik põhines kasutatud tekstiilmaterjalide lahustuvusel.

Kirjanduse põhjal seati eesmärgiks valmistada lahus kontsentratsiooniga 5%. Kontsentratsiooni kalkuleerimisel lähtuti massikontsentratsiooni võrrandist:

$$C = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot 100, \quad (4.5)$$

kus  $C$  – kontsentratsioon, %,  
 $m_1$  – purustatud tekstiilisegu, g,  
 $m_2$  - lahusti, g.

Enne lahustamisprotsessi tekstiilkiud ja ionvedelik kuivatati 105°C juures. Järgmiseks mõõdeti koonilisse kolbi lahusti ning seejärel lisati anumasse vähehaaval purustatud tekstiilkiude. Lahustamiseks segati massi anum magnetseguri abil mehaaniliselt 24 tundi 80°C juures (joonis 4.15).



Joonis 4.15. Tekstiilkiudude lahustamise protsess magnetseguri abil

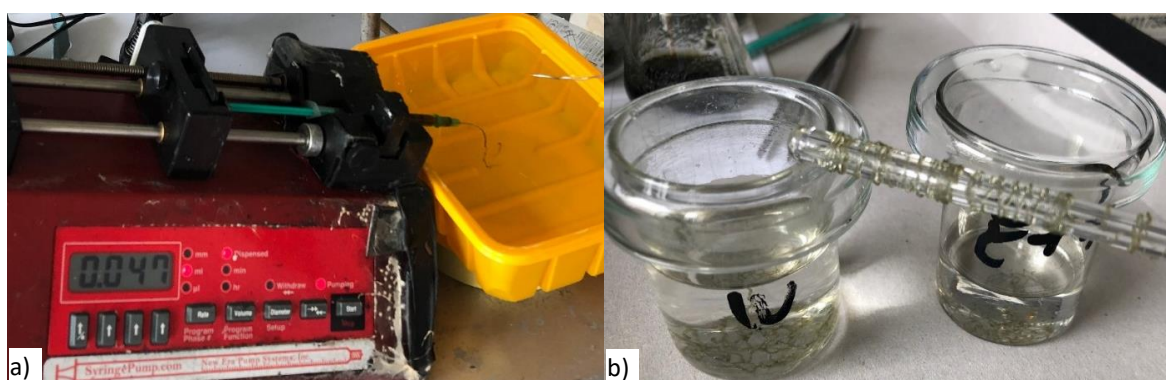
Erineva koostisega tekstiilkiudude mass on väga erinev, mistõttu erines kahe kasutatud materjaliga tegelikult saavutatud lahuse kontsentratsioon oluliselt. Materjali nr 1 kiud on väga kerged, mistõttu on vajaliku kontsentratsiooni saavutamiseks lisatavate kiudude ruumala suurem. Suure hulga kiudude lisamine ioonvedelikule ei võimalda nende täielikku lahustumist, sest protsessi käivitamiseks on vaja kiudude täielik märgumine ioonvedelikus. Kui lisatavate kiudude hulk on väga suur, muutub massi viskoosseks ning seda ei ole võimalik enam magnetseguri abil segada. Kuigi kiudusid lisati mitme tunni jooksul vähehaaval, saavutas mass oma maksimaalse segatava viskoossuse enne eesmärgiks seatud kontsentratsiooni saavutamist. Lahuste tegelikult saavutatud kontsentratsioon oli seega järgmine:

Tabel 4.4. Tekstiilkiudude lahuse kontsentratsioon

Materjali nr	Lahusti	Kontsentratsioon
1	[EMI]Br	1,93 %
4	DMSO	4,92 %

Enne märg- ja elektroketruse katsetusi jahutati lahus toatemperatuurini. Saadud lahusest uute kiudude moodustamist testiti filtreerimata kujul ehk lahusest ei eemaldatud tekstiilijätmetes sisalduvaid värv- ja lisaaineid.

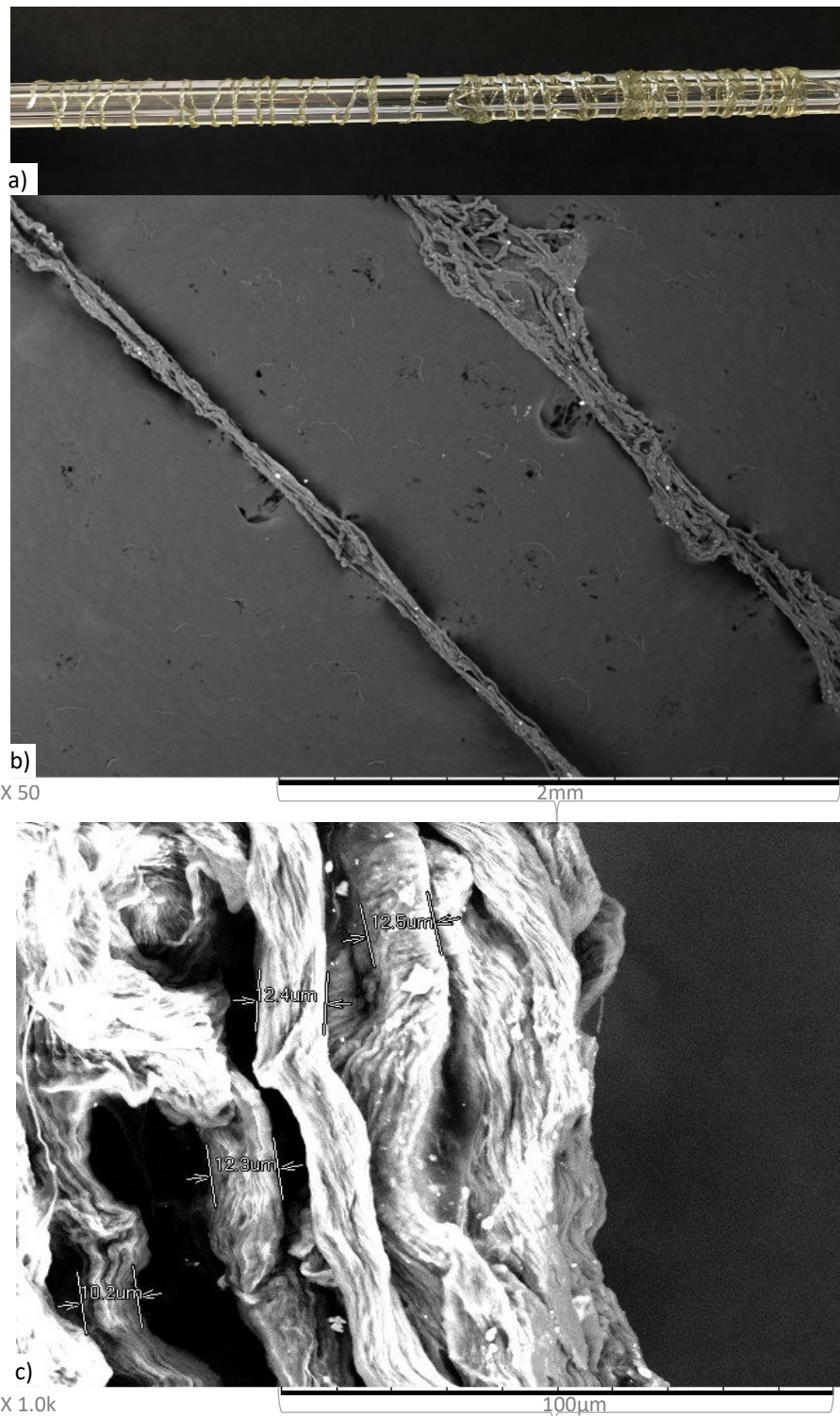
Märgketruse protsessi imiteerimiseks konstrueeriti eraldi lihtne agregaat (joonis 4.16), mis koosnes süstlapumbast (*New Area Pump System*), süstlast (nõela läbimõõduga 0,6 mm) ja destilleeritud veega anumast.



Joonis 4.16. Märgketrusprotsessi läbiviimiseks konstrueeritud agregaat (a) ja klaaspulgale keerutatud kiud lähtematerjalist nr 1 (b)

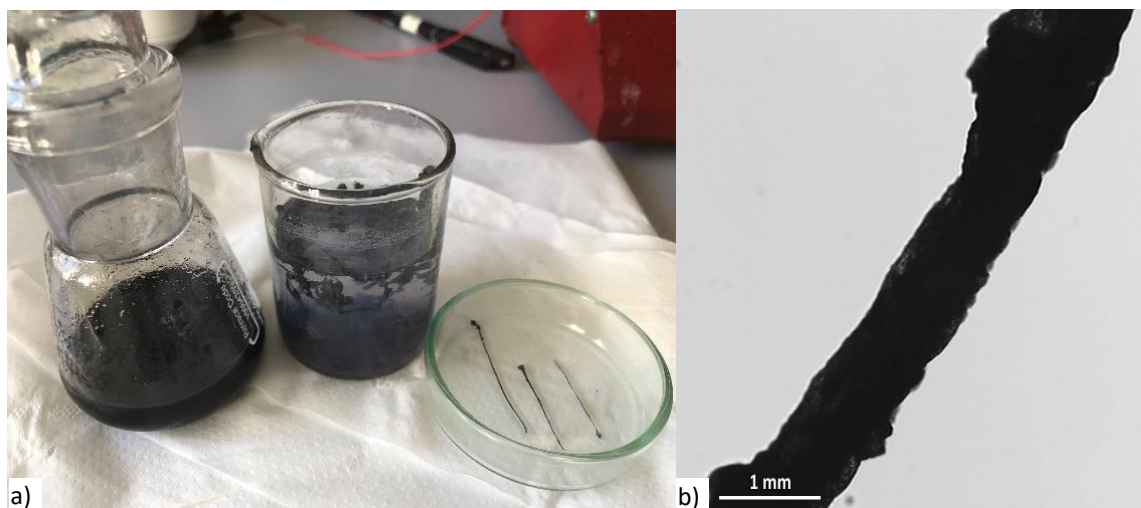
Kiudude formeerimiseks suruti lahus läbi süstlanõela destilleeritud vette pumpamiskiirusel 0,5 ml/min. Saadud kiudude kogumiseks oli agregaadile kinnitatud ka pöörlev seade, mille abil vette moodustunud kiude kollektorit asendanud klaaspulgale kerida.

Materjalist nr 1 valmistatud lahusest kedratud kiud olid märjalt väga haprad. Saadud kiudusid oli võimalik vaid väga ettevaatlikult ja aeglaselt käsitsi veest kokku koguda. Kuivades muutus kiudude vastupanuvõime survele suuremaks. Materjalist nr 1 saadud kiudude skaneeriva elektronmikroskoobiga (SEM) *Hitachi TM1000* salvestatud 50- ja 1000- kordsed suurendused on näha joonisel 4.17.



Joonis 4.17. Materjali nr 1 lahusest märgketruse abil saadud kiud (a) ning nende 50- (b) ja 1000- (c) kordsed suurendused SEM-iga

Materjalist nr 4 valmistatud lahuse kontsentratsioon oli oluliselt kõrgem, mistõttu olid ka moodustunud kiud tugevamad. Samas oli filtreerimata lahust keeruline läbi 0,6 mm läbimõõduga süstlanõela suruda. Nõela ava ummistus ja vajab pidevat puhastamist. Katset korrati 0,8 mm läbimõõduga süstlanõelaga, kuid automaatse süstlapumba kasutamine osutus endiselt pideva ummistuse tõttu võimatuks. Seetõttu tuli piirduda vaid käsitsi läbi 0,8 mm läbimõõduga süstlanõelast pressitud kiududega. Tulemus on näha joonisel 4.18.



Joonis 4.18. Materjali nr 4 lahusest märgketruise abil moodustunud kiud (a) ning selle 100-kordne suurendus valgusmikroskoobiga (b)

Elektroketruise läbiviimiseks kasutati horisontaalset elektroketruise seadet (joonis 4.19), mis koosneb kõrgepinge toiteplokiist (*Gamma High Voltage Research Ormond Beach*, ulatusvahemikuga pingega 0-30 kV), pöörlevast trummelkollektorist ja süstlapumbast. Kasutatud süstla nõela diameeter oli 0,6 mm ning pumpamiskiiruseks 0,3-1,2 ml/h. Ketrusel oli süstla nõelaotsa ja kollektori vaheliseks kauguseks 10 cm ning kasutatav pinge oli vahemikus 16-25 kV. Materjalist nr 1 valmistatud lahuse elektroketrusel asendati pöörlev kollektor koagulatsioonivanniga, mille põhja oli kinnitatud foolium. Elektroketrusmeetodi katsetamiseks otsustati Materjalist nr 1 valmistatud lahus filtreerida keraamilise filtriga.



Joonis 4.19. Materjalidest nr 1 ja nr 4 valmistatud lahuse elektroketruise katsed

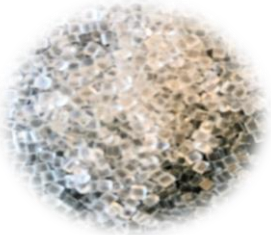
Nagu jooniselt näha, ei õnnestunud lahusest ühtlaseid kiude ega sidusat lausmaterjali valmistada. Põhjuseks võis olla Materjalist nr 1 valmistatud lahuse madal kontsentratsioon, mis ei taganud kiudude moodustumiseks piisavat viskoossust ning Materjalist nr 4 valmistatud lahuses olev sade ja mittelahustunud kiud, mis ummistasid süstlanõelad.

Kokkuvõttes saab katsetuste tulemusena järeldada, et antud kontsentratsiooni ja mittetekstiilsete lisanditega lahusest elektroketruse abil kvaliteetsete kiudude ja lausmaterjali valmistamine ei õnnestunud. Lahuse kontsentratsioon ja mittetekstiilsete lisandite filtreerimine vajavad korrigeerimist, et ühelt poolt saavutada sobiva viskoossusega lahus ning teisalt vältida kiudude formeerimisel düüsi ummistumist. Siiski sai tõestatud, et nii puuvilla kui ka villa ja akrüüli segust on võimalik ioonvedelike abil uusi kiude ja materjali lihtsustatud meetodil toota, kuid kvaliteetsete kiudude saamiseks vajab protsess täiustamist.

#### 4.2.4 Filamendi ja graanulite valmistamine

Jahvatatud tekstiilijäätmete kiutolmust graanulite tootmiseks kasutati samuti abiainena PLAd. PLA on üheks populaarseimaks 3D printimise juures kasutatavaks plastiks, eelkõige just biolagunevuse ning suhteliselt madala sulamistemperatuuri tõttu. Kasutatud PLA graanuliteks olid *Purapol LX175* läbipaistvad 3D printimise filamendi tootmiseks mõeldud graanulid, mille füüsikalised ja mehaanilised omadused on toodud tabelis 4.5.

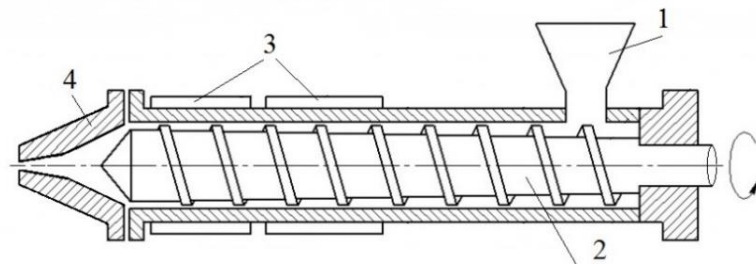
Tabel 4.5. Purapol LX175 PLA graanulid ja nende omadused (Purapol LX175 Product Data)

Suhteline tihedus	1,24 g/cm <sup>3</sup>	
Viskoossuse indeks (ISO 1133-A 210°C/2,16 kg)	8 g /10 min	
Stereokeemiline puhtus	960 (% L-isomer)	
Visuaalne väljanägemine	Kristallvalged graanulid	
Monomeeride jääk	Max. 0,3%	
Veesisaldus	Max. 400 ppm	
Sulamistemperatuur	155 °C	
Klaasiirdetemperatuur	55-60 °C	
Tõmbetugevus (ISO 527-1)	45 MPa	
Tõmbemoodul (ISO 527-1)	3500 MPa	
Katkevenivus (ISO 527-1)	Max. 5%	
Löögikindlus, 23°C (ISO 179-1eA)	Max. 5kJ/m <sup>2</sup>	

Valik sai PLA kasuks langetatud samuti just selle materjali taastuvressurssidel põhineva tooraine ja tootmisega kaasneva väiksema ökoloogilise jalajälje tõttu võrreldes mittetaastuvatest toorainetest plastmaterjalidega. Lisaks on materjal biolagunev ja ei ole toksiline.

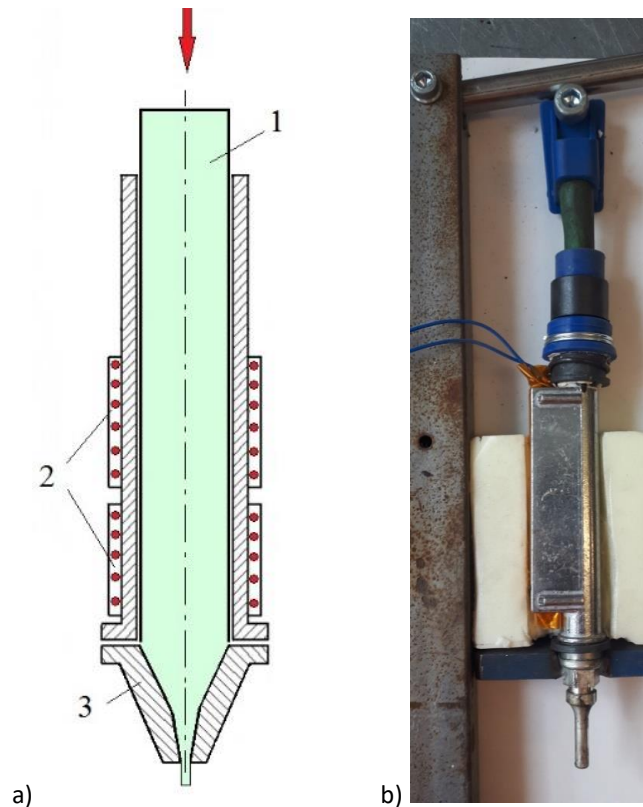
Eesmärgiks oli testida 3D printeri filamendi tootmise võimalikkust tekstiilipulbrist ehk jahvatatud tekstiilijäätmete kiutolmust. Katsetamiseks valiti Materjal nr 1 ja Materjal nr 2, sest nende jahvatatud tulemus oli valikutest kõige peenema ja ühtlasema struktuuriga ning sisaldas nii looduslikke kui sünteetilisi kiudusid.

3D printerile filamendi tootmine on võrdlemisi lihtne protsess, kuid tähtis on jälgida komponentide töötlemise temperatuuri ja koostisainete vahekordi. Filamendi tootmiseks kasutatakse ekstruuderit, mille täitemahutis segu soojeneb ning seguneb, homogeenseks massiks sulades pressitakse segu läbi vajaliku diameetriga düüsi tigumehhanismi (vt. joonis 4.20).



Joonis 4.20. Ekstruuderit skeem: 1–täitemahuti, 2–tigu, 3–küttekeha, 4–düüs (roscacil.com veebileht)

Katsetuste läbiviimiseks oli võimalik kasutada Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja metroloogia katselabori ekstruuderit. Katsetusmooduli skeem koos rakisega on toodud joonisel 4.21.



Joonis 4.21. Katsetusmooduli skeem (a): 1 – komposiitmaterjal, 2 – küttekeha, 3 – düüs; Rakis (b) (Goljandin, 2018)

Jahvatatud tekstiilkiudude ja PLA komposiidist filamendi ja graanulite valmistamise katsetused koosnesid järgmistest etappidest:

- PLA kuumutamine sulamistemperatuurini ( ~230°C),
- vajaliku koguse jahvatatud tekstiilkiudude lisamine sulatatud PLA-le,
- PLA ja kiudude mehaaniline segamine,
- komposiitfilamendi ekstrusioon,
- graanulite lõikamine.

Esiolgu katsetati mõlemast materjalist 15-20%-lise kiutolmu sisaldusega filamendi valmistamist. Jahvatatud tekstiilkiudude maht on aga oluliselt suurem võrreldes sama massiga sulatatud PLA-ga, mistõttu osutus suurema kontsentratsiooniga jahvatatud tekstiilmassi kvaliteetne segamine problemaatiliseks. Esmaste katsetuste tulemusena sai järeldada järgmist:

- osa kiududest jäi sulatatud PLA massiga segunemata (vt. joonis 4.22),
- saadud komposiitmassi viskoossus oli väga kõrge,
- ebaühtlaselt segunenud tekstiilmassist moodustunud tükid tingisid väljasurutava filamendi koostise ja diameetri suure erinevuse,
- mittehomoogeense segu kasutamine võib tingida düüsi ummistumise ja ekstrusioonil rakendatava surve kõikumise,
- sõltuvalt materjali kiulisest koostisest ja kontsentratsioonist komposiidis, on massi ekstruuderist väljasurumiseks tarvis rakendada keskmiselt 30% suuremat rõhku kui puhta PLA korral.

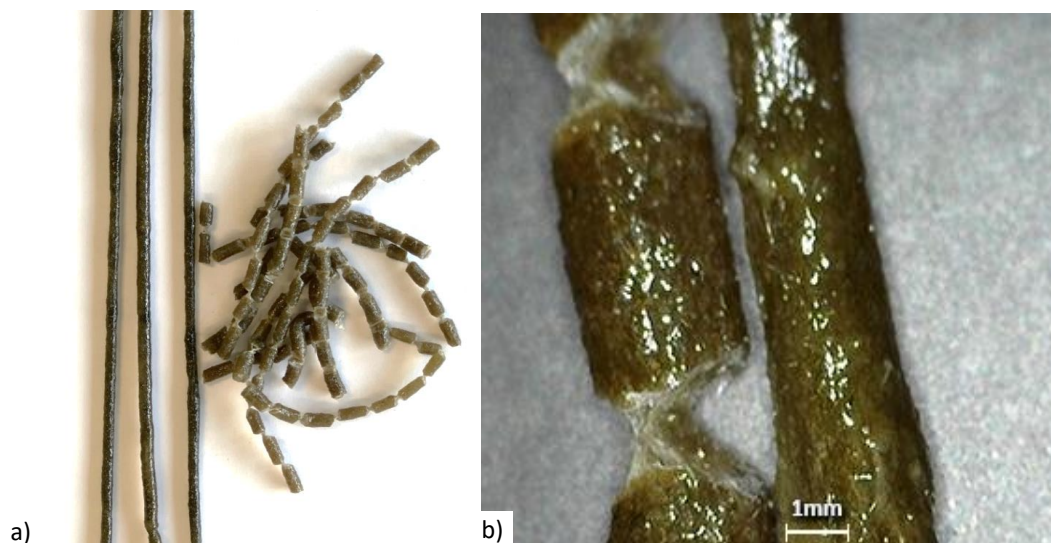


Joonis 4.22. Esmase katsetuse tulemusena moodustunud defektid filamendis (segunemata kiud)

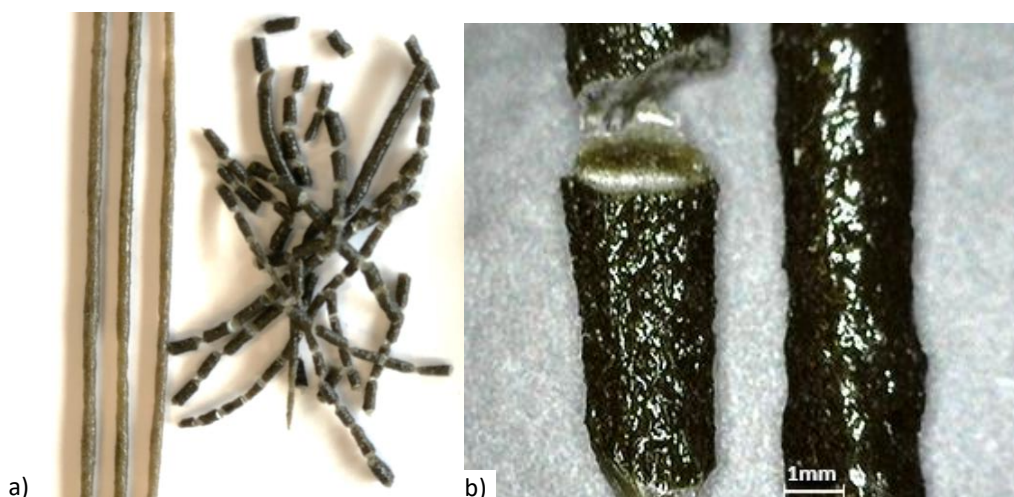
Järgnevate katsetuste käigus otsustati järjestikku 3-5% võrra alandada PLA-ga segatava kiutolmu kontsentratsiooni massist. Parim tulemus saavutati kiutolmu kontsentratsiooniga 5-8% massist.



Valmistatud filament oli keskmiselt 1,5 – 1,75 mm läbimõõduga (joonised 4.23 ja 4.24), mis on sobiv edasisteks katsetusteks 3D printerile *Wanhao Duplicator 4*.



Joonis 4.23. Materjalist nr 1 valmistatud filament ja graanulid (a) ning nende 25-kordne suurendus (b)



Joonis 4.24. Materjalist nr 2 valmistatud filament ja graanulid (a) ning nende 25-kordne suurendus (b)

Valmistatud filamenti struktuuris on näha kiutolmu ja PLA ebaühtlast segunemist. Edasiste eksperimentide käigus on selle vältimiseks vajalik materjali PLA-ga kokkusegamisel lisada kiutolmu klombistumist takistav sõelumisprotsess.

Eksperimenti tulemusena leidis kinnitust, et jahvatatud tekstiilijäätmete kiutolmust on võimalik valmistada 3D printimiseks sobilikku komposiitmaterjali. Kvaliteetse tulemuse saavutamiseks vajavad mitmed tehnoloogilised parameetrid optimeerimist. Lisaks vajab arendamist jahvatatud kiutolmu ja sidusaine kokkusegamisel tolmu klombistumist takistav sõelumissüsteem, misjärel on võimalik jätkata reaalsete katsetustega 3D printeril. Info sarnaste eksperimentide läbiviimise kohta nii Eestis kui ka teistes riikides puudub, mistõttu peab autor oluliseks uurimistööd jätkata.

## 5. ÜMBERTÖÖDELDUD MATERJALIDE SOBIVUS UUTEKS RAKENDUSTEKS

Eesti kaitsevaelase individuaalvarustuse tekstiilmaterjalidest jäätmeid on võimalik põletusse suunamise asemel kasutada väga erinevaks otstarbeks. Töös läbiviidud katsetused on vaid väike osa võimalikest lahendustest. Järgnevalt on ära toodud soovitud katsetuste tulemusel valmistatud materjalide rakendamiseks (tabel 5.1) ning lisatud on ülevaade ka võimalikest muudest kasutusvaldkondadest, mida käesoleva töö praktilise osa raames ei olnud võimalik katsetada.

Tabel 5.1. Praktiliste katsetuste tulemusena saadud materjalide omadused ning nende sobivus erinevateks uuteks rakendusteks

Materjal	Omadused	Soovitav rakendusvaldkond
<b>Lausmaterjal 1</b>	<p>Materjal talub hästi koormust ning on piisavalt vastupidav ka lisaks dekoratiivsele otstarbele mõningate tarbetoodete valmistamiseks.</p> <p>Lausmaterjal on hõlpsasti ümbertöeldav madalama väärustasemega kasutusotstarbeks, näiteks täite- ja isolatsioonimaterjal. Peeneks purustatud kiududena ning segatult biolaguneva PLA-ga on tooted ka looduses ka kiiremini lagunevad.</p>	<p>Valmistatud lausmaterjal on sobilik kasutamiseks:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- dekoratiivmaterjalina sein- ja aknakatete valmistamiseks;</li> <li>- mitmekihilise täitena mattide, madratsite jm polsterduste valmistamiseks;</li> <li>- isolatsioonikihiks ja vooderduseks erinevatel otstarvetel;</li> <li>- dekoratiivsete suveniirtoodete valmistamiseks;</li> <li>- katte- ja istutusmattidena aianduses ja põllumajanduses.</li> </ul>
<b>Lausmaterjal 2</b>	<p>Valmistatud materjal isoleerib võrreldes värvi ja pabertapeediga hästi soojust ja heliakustikat. Materjal vabastab ülemäärase niiskuse, mis aitab luua tervislikuma elukeskkonna, on lihtsasti eemaldatav ja uuesti kasutatav või võimalik kasutusjärgselt rakendada isolatsioonimaterjalina.</p>	<p>Dekoratiivmaterjal sobib erinevate pindade katmiseks mitteniisketes ruumides.</p>
<b>Komposiitmaterjal</b>	<p>Tekstiiljäätmest valmistatud isolatsioonikiht tõstab puitlaast-, vineer- ja OSB plaatide lisandväärtust. Võrreldes isolatsioonikihita plaatide omadustega on purustatud tekstiiljäätmest lisakihiga plaadid soojust ning heli isoleerivad.</p>	<p>Valmistatud komposiitmaterjal sobib kasutamiseks konstruktsioonelementidena ehitusvaldkonnas</p>

Tabel 5.1 järg

<b>Filament ja graanulid</b>	Purustatud tekstiilijäätmete kiutolm võimaldab koos sideainega toota tekstiilmaterjalil põhinevat filamenti, mis võrreldes enamike sünteetiliste materjalidega on keskkonnasõbralikumad ning biolagunevate ainetega segatult ka eluringi lõppedes lihtsamini käideldavad.	Eksperimendi tulemusena sai tõestatud, et kiutolmuks jahvatatud tekstiilijäätmeid on võimalik kasutada 3D printimiseks sobiliku filamenti valmistamiseks. Hetkel ei ole teada, et taolist lahendust oleks teistes riikides katsetatud, mistõttu vajab valdkond lähemat uurimist.
<b>Keemiliselt ümbertöödeldud kiud</b>	Keemiliselt lahustatud tekstiilijäätmetest on võimalik korduvalt toota uusi kiude. Katsetuste tulemusena saadud kiudude kvaliteet ei ole sobilik kvaliteetse materjali tootmiseks, kuid parendatud kontsentratsiooni ja tööstusliku ketrusmehhanismiga on võimalik tagada vajalik kvaliteet.	Kvaliteetsetest kiududest on võimalik toota uusi tekstiilmaterjale.

Lähtuvalt eelkõige just militaarsest rakendusvaldkonnast on Eesti kaitseväelaste individuaalvarustuse tekstiilijäätmeid võimalik purustamise järgselt kasutada veel näiteks järgmisteks otstarveteks:

- **Süsinikkiudude tootmiseks.** Süsinikkiudude tootmiseks sobib hästi Materjal nr 4. Süsinikkiudude kõrgelt hinnatud omadusteks on keemiline vastupidavus, kõrge jäikusaste, väike soojuspaisuvus, kõrge temperatuuritaluvus ja hea venivus. Nende omaduste tõttu leiavad süsinikkiududega materjalid rakendust kosmosetehnoloogias, ehituses, sõjatehnikas ja motosportis.
- **Betooni ja plasti armeerimiseks.** Selleks sobivad kõik katsetamiseks valitud materjalid. Tekstiilkiududega armeerimist kasutatakse komposiidi tugevuse või jäikuse tagamiseks. Näiteks on võimalik purustatud tekstiilkiude rakendada erineva koostise ja sulamistemperatuuriga termoplastsetes komposiitides nii kuumpressimise kui survevalu meetodil.
- **Geotekstiilide valmistamiseks.** Kõik katsetamiseks valitud materjalid sobivad sõltuvalt rakendusotstarbest ka geotekstiilide valmistamiseks. Kõige enam oleks rakendusi Materjal nr 2 valmistatud geotekstiilidele. Samas on osadel otstarvetel eelistatud ka just looduslikest materjalidest geotekstiilid, kui eesmärgiks on näiteks pinnase armeerimine sellest taimestiku läbikasvamise perioodiks.

- **Polsterduseks.** Kõiki kaitsevaelase individuaalvarustuse ümbertöödeldud tekstiilmaterjale on võimalik kasutada erinevateks polsterdusteks. Sõltuvalt rakendusest on vajalik valida purustamise aste ja vajadusel ka segude kiuline koostis.
- Kaitsevaelase individuaalvarustuse elementide hulka kuuluvad lisaks tekstiilmaterjalist rõivastele ka kummikud, saapad, alusmatid, jm. Selliste materjalide purustamine võimaldab saadud massi rakendada näiteks Kaitseväe harjutusväljakute varustuse lähtematerjalidena (kunstmuru kummigraanulid, spordiväljaku aluskiht, matid, jm).

Rakendusi on oluliselt rohkem, kuid eelkõige lähtub nende detailsem uurimine ja sobivuse ning kuluanalüüsi läbiviimine Kaitseväe vajadustest tekstiilijätmeid enda otstarbeks rakendada. Sellest tulenevalt on vajalik eelnevalt kaardistada Kaitseväe sisseostetavad materjalid ja tooted ning hinnata, kas ja milliste toodete lähteainetena oleks võimalik kasutada tekkivaid tekstiilijätmeid.

## JÄRELDUSED

Töö käigus läbiviidud katsetuste tulemusena pakuti Eesti Kaitseväele erinevad lahendused kaitsevälase individuaalvarustuse tekstiilijätmete terviklikuks ümbertöötlemiseks. Lahendusi on võimalik kombineerida nii erineva kiulise koostisega materjalide kui ka ühekomponentsete tekstiilide ümbertöötlemiseks. Eesti kaitsevälaste individuaalvarustuse tekstiilijätmete ümbertöötlemise valikute osas on võimaluste arv oluliselt suurem kui seda näiteks tarbimisjärgsete tekstiilijätmete üldise massi puhul, sest materjalide kiuline koostis on väga täpselt teada ning erinevatest materjalidest esemete variatsioonid ei ole suured. See teeb selliste jätmete sorteerimise lihtsamaks ja lisab rohkem võimalusi jätmete samal või kõrgemal väärtustasemel ümbertöötlemiseks. Siiski on sobivate valikute tegemiseks oluline esmalt hinnata, kas ja millised on Kaitseväe enda vajadused ümbertöödeldud materjale ning nendest valmistatud tooteid uuesti kasutada. Sõltuvalt sellest on võimalik ka kirjeldada ümbertöötlemise ülesanne ning leida sobiv teenusepakkuja protsesside läbiviimiseks.

Lisaks töös püstitatud eesmärkide täitmisele saab läbiviidud katsetuste tulemustest veel järeldada:

- **Erineva koostise ja lisanddetailidega tekstiilijätmete purustamistehnoloogia vajab täiendamist.** Tekstiilijätmete purustamise tehnoloogia arendamine selliselt, et samaaegselt oleks võimalik purustada erineva koostisega jätmeid neilt muudest materjalidest furnituuri ja lisanddetailide eemaldamata, on äärmiselt oluline. Katsetuste käigus oli võimalik veenduda, et sellise tehnoloogia väljatöötamine on realselt teostatav ning nende arenduste elluviimiseks koostati projekt „Tekstiilijätmete purustamistehnoloogia ja uudsete materjalide arendamine tekstiilijätmete väärindamiseks ning ringmajanduse toetamiseks.” Vajalikeks arendusteks on eelkõige erineva sulamistemperatuuriga materjalidele sobiva universaalse mehhanismi kohandamine, muudest materjalide separeerimise süsteem purustamistsükli käigus ning materjali edasiseks töötlemiseks sobiva ühtlasema struktuuri ja purustusastmetega tulemuse saavutamine.
- **Purustatud erineva kiulise koostisega tekstiilimassi on võimalik keskkonnasõbralike materjalidega kombineerides kasutada hõlpsasti ümbertöödeldavate toodete ja materjalide valmistamisel.** Ka ebahõlpsalt ja erineva pikkusega kiududeks purustatud tekstiilijätmete massist on võimalik sõltumata nende koostisest, esialgsest seisukorrast või otstarbest, toota mitmesuguste omadustega lausmaterjali, mis sobivad rakendamiseks väga erineval otstarbel. Katsetuste tulemused tõestasid, et vastupidiselt enamlevinud mehaaniliselt ümbertöödeldud

ja uute kiudude kasutamise vahekorrale (vastavalt 20/80), on võimalik saavutada häid tulemusi ka ümbertöödeldud kiudude osakaaluga uues materjalis 68-82%. Lausmaterjali on võimalik valmistada mitmesuguste biolagunevatel ja taastuvatel ressurssidel põhinevate materjalide lisamisel. Nii tagatakse vajadusel tekstiilijäätmetest valmistatud toodete ja materjalide lihtsam ümbertöötlus või keskkonnasõbralikum käitlusprotsess.

- **Purustatud erineva kiulise koostisega tekstiilmassi samal ja kõrgemal väärtustasemel rakendamise võimalusi on vajalik edasi uurida.** Purustatud tekstiilkiudude täiendavaid rakendusvõimalusi ning nende lisandväärtust uute materjalide ja toodete valmistamisel on vajalik edasi uurida. Osaliselt on kavandatud need tegevused läbi viia projekti „Tekstiilijäätmete purustamistehnoloogia ja uudsete materjalide arendamine tekstiilijäätmete väärimiseks ning ringmajanduse toetamiseks” raames. Planeeritud tegevused on:
  - Tekstiilmaterjalide purustamisel saadud lühikeste kiudude (< 1 cm) kasutamine täiteainena erineva koostise ja sulamistemperatuuriga termoplastsetes komposiitides: täiteaine omaduste ja tehnoloogiliste protsesside mõju selgitamine. Selgitatakse kiudude kasutamise võimalusi kahte tüüpi protsessides: kuumpressimine ja survevalu. Leitakse täiteaine ja maatrikspolümeeri optimaalsed omadused, sobivad tehnoloogilised parameetrid ja toodete füüsikalised omadused sõltuvalt koostisest.
  - Tekstiilmaterjalide purustamisel saadud pikemate kiudude (>1 cm) kasutamine lausmaterjalide ja erinevate muude tekstiilmaterjalide valmistamiseks, saadud materjalide struktuuri ning omaduste analüüs ning kiudude omaduste ja tehnoloogiliste protsesside mõju selgitamine.

Täiendavalt vajab uurimist ka kiutolmu kasutamine täite- ja lisandainetena mitmesuguste kõrgema lisandväärtusega materjalide valmistamiseks, nagu 3D printimise filament ja nanostruktuursed materjalid.

Eesti kaitsevaelase individuaalvarustuse valitud rõivajäätmete baasilt on võimalik teha üldisemaid järeldusi valdavale osale tekstiilijäätmete massile ja kasutada töös toodud näiteid laiemalt, kui vaid individuaalvarustuse tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks. Pakutud lahendused sobivad ka jäätmekäitlejate ja ringmajandust edendavate organisatsioonide poolt kogutud tekstiilijäätmete ümbertöötlemiseks ja taaskasutamiseks.

## KOKKUVÕTE

Tekstiilijäätmete massilise tekke probleemistikuga seatakse aasta-aastalt järjest teravam fookuse alla jäätmete ümbertöötlemise tehnoloogilised võimalused. Tekstiilitooted ja rõivad on disainitud suletud ringis taaskasutamiseks sobimatuks. Nende koostis ja omadused on väga erinevad, mis muudab ümbertöötlemise keeruliseks ja kulukaks. Lahenduste kavandamine materjalide disainimisetapis aitaks oluliselt vähendada investeeringuid ja pingutusi selle jäätmeliigi ümbertöötlemiseks. Kuid senikaua kui uued tehnoloogiad on alles arendamisfaasis, tuleb võimalikult leidlikult ja tõhusalt kasutada olemasolevaid lahendusi, et suunata tekkivaid tekstiilijäätmeid uuesti ringlusesse.

Avaliku sektori organisatsioonide initsiatiiv on suurepäraseks algatuseks, et muuta nii tarbijate kui tootjate mõtteviisi ja käitumismustrit. Sellest lähenemisest on sündinud ka antud magistritöö teemakäsitus, mille algatajaks oli Eesti Kaitsevägi, et leida lahendusi kaitseväelaste individuaalvarustuse tekstiilijäätmete ringlusesse tagasi suunamiseks. Nii seati töö eesmärgiks pakkuda teoreetilise ja praktilise uurimistöö tulemusena välja alternatiivseid võimalusi kaitseväelaste individuaalvarustuse tekstiilijäätmete terviklikuks ringlusesse suunamiseks, sõltumata nende kiulisest koostisest ja seisukorrast ning lähtudes seejuures loodavate toodete ja materjalide korduvkasutatavuse printsiibist. Ühtlasi oli sooviks viia katsetused läbi erineva kiulise koostisega materjalidega, et tulemusi oleks võimalik laiendada ka valdavale osale tekstiilijäätmete massile üldisemalt.

Tekstiilijäätmetele rakenduste leidmiseks nii madalamal kui ka samal ja kõrgemal väärtustasemel, valiti levinumate ümbertöötlemise katsetuste kõrvale ka uudsemaid lahendusi. Purustatud erineva kiulise koostisega jäätmetele pakuti rakendusi mitmesuguste laus- ja komposiitmaterjalide valmistamisel, ionvedelike abil lahustamist ja uute kiudude formeerimist ning kiutolmuks jahvatatud tekstiilimassist filamendi ja graanulite valmistamist, mida on võimalik kasutada 3D printimise lähtematerjalina.

Kaardistatud võimalustest saab järeldada, et Eesti kaitseväelaste individuaalvarustuse tekstiilijäätmete ümbertöötlemise valikute osas on alternatiivide arv oluliselt suurem, kui seda näiteks tarbimisjärgsete tekstiilijäätmete üldise massi puhul, sest materjalide kiuline koostis on väga täpselt teada ning erinevatest materjalidest esemete variatsioonid ei ole suured. Selliste jäätmete sorteerimine on lihtsam ja loob rohkem võimalusi jäätmete samal või kõrgemal väärtustasemel ümbertöötlemiseks. Siiski on valikute tegemisel soovitusena Eesti Kaitseväel esmalt hinnata, kas ja millised on Kaitseväe enda vajadused ümbertööteldud materjale ning nendest

valmistatud tooteid uuesti kasutada. Sõltuvalt sellest on võimalik ka kirjeldada ümbertöötlemise täpsem ülesanne ning leida sobiv teenusepakkuja protsesside läbiviimiseks. Eesti Kaitseväel on olemas võimalus korraldatavate riigihangete juures osaliselt loobuda odavaima hinna kriteeriumist ja väärtustada ümbertöödeldud materjalidest tooteid, milles kasutada lähteainena organisatsioonis tekkivad tekstiilijätmed.

Autori hinnangul on kvaliteetsete materjalide ja toodete valmistamiseks oluline tekstiilijätmete samal või kõrgemal väärtustasemel kasutusvõimaluste uurimistega kindlasti jätkata. Väga tähtsaks on siinjuures ka purustamistehnoloogia arendamine, mis võimaldaks erineva koostise ja lisanddetailidega tarbimisjärgset tekstiilimassi liigse ressursikuluta purustada.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- A New Textiles Economy: redesigning fashion's future. (2017). Ellen MacArthur Foundation. Loetud aadressil <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/A-New-Textiles-Economy.pdf>
- Abdulkarim, J. M., Ahmed, S. B. (2018). Design of Shredder and textile waste clothes recycling machine. *International Journal of Mechanical Engineering*, 6 (1), 001-017
- Adeniran, A.E., Nubi, A.T., & Adelopo, A.O. (2017). Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. *Waste Management*, 67, 3–10
- Aguado, J. & Serrano, D. (2007). Feedstock Recycling of Plastic Wastes. Cambridge: Royal Society of Chemistry. Loetud aadressil <https://ebookcentral.proquest.com>
- Andersoo, A. (2017). Kaitseväe varustuse ümbertöötlemine ja taaskasutus. (Bakalaureusetöö). Tallinna Tehnikaülikool. Tallinn
- Arensburger, D. (2005). Komposiitmaterjalid. Tallinna Tehnikaülikool, Materjalitehnika instituut, TTÜ Kirjastus
- Bartolome, L., Imran, M., Cho, B-G., Al-Masry, W., & Kim, D. (2012). Recent Developments in the Chemical Recycling of PET, Material Recycling, Trends and Perspectives. *Korean Advanced Institute of Science and Technology*. Loetud aadressil <https://www.intechopen.com/books/-material-recycling-trends-and-perspectives/recent-developments-in-the-chemical-recycling-of-pet>
- Bell, N.C., Lee, P., Riley, K., & Slater, S. (2018). Tackling Problematic Textile Waste Streams. RESYNTEX. Loetud aadressil [http://www.resyntex.eu/images/downloads/NiaCBell\\_-TACKLING\\_PROBLEMATIC\\_TEXTILE\\_WASTE\\_STREAMS.pdf](http://www.resyntex.eu/images/downloads/NiaCBell_-TACKLING_PROBLEMATIC_TEXTILE_WASTE_STREAMS.pdf)
- Björquist, S. (2017). Separation for regeneration - Chemical recycling of cotton and polyester textiles. The Swedish School of Textiles. Report no. 2017.14.04.
- BondedLogic veebileht. (kuupäev puudub). Denim Insulation. Loetud aadressil <http://www.bondedlogic.com/ultratouch-denim-insulation/>
- Braham, E. (2017). Closing The Loop On Sustainable Fashion. *Forbes webmagazine*. Loetud aadressil <https://www.forbes.com/sites/ashoka/2017/05/08/closing-the-loop-on-sustainable-fashion/#1ad849032f3f>
- Briga-Sá, A., Nascimento, D., Teixeira, N., Pinto, J., Caldeira, F., Varum, H., & Paiva, A. (2013). Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials*, 38, 155–160
- Burns, L. (2016). Tackling Textile Waste. *Responsible Global Fashion LLC*. Loetud aadressil <http://www.responsibleglobalfashion.com/blog/2016/7/tackling-textile-waste>
- Carrillo, C. Orr, W., Ford, P., & Nadella, B. (2016). Recycled Cotton for Gap Inc. MIT Sloan School of Management, Boston. Loetud aadressil <https://mitsloan.mit.edu/sites/default/files/inline-files/Gap-Report-2016.pdf>
- Caulfield, K. (2009). Discussion Paper: Sources of Textile Waste in Australia. *Apical International Pty Ltd*. Loetud aadressil <https://studylib.net/doc/18791293/sources-of-textile-waste-in-australia>
- Chapman, D.A., & Hollins, O. (2010). Mistra Future Fashion – Review of Life Cycle Assessments of Clothing

- Chavan, R. (2014). Environmental Sustainability through Textile Recycling. *Journal of Textile Science & Engineering*, S2: 007
- Close the Loop. (2019). Design for Longevity. Danish Fashion Institute. Loetud aadressil <https://designforlongevity.com/articles/close-the-loop>
- Dissanayake, D.G.K., Weerasinghe, D.U., Wijesinghe, K.A.P., & Kalpage, K.M.D.M.P. (2018). Developing a compression moulded thermal insulation panel using postindustrial textile waste. *Waste Management*, 79, 356-361
- Drew, D., Yehounme, G. (2017). The Apparel Industry's Environmental Impact in 6 Graphics. *World Resources Institute*. Loetud aadressil <https://www.wri.org/blog/2017/07/apparel-industrys-environmental-impact-6-graphics>
- Echeverria, C., Handoko, W., Pahlevani, F., & Sahajwalla, V. (2019). Cascading use of textile waste for the advancement of fibre reinforced composites for building applications. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1524-1536
- Elander M., Ljungkvist, H. (2016). Critical aspects in design for fiber-to-fiber recycling of textiles. Mistra Future Fashion report 2016:1. Loetud aadressil <http://mistrafuturefashion.com/wp-content/uploads/2016/06/MFF-report-2016-1-Critical-aspects.pdf>
- EP ja nõukogu direktiiv (EL) 2018/851. (2018). Euroopa Liidu Teataja. Eestikeelne väljaanne 14.06.2018. Loetud aadressil <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2018:150:FULL&from=EN>
- Ferro, S. (2017). New Recycling Method Could Make Fast Fashion Less Wasteful. Loetud aadressil <http://mentalfloss.com/article/94123/new-recycling-method-could-make-fast-fashion-less-wasteful>
- Fibre2Fashion.com. (2018). RFID applications in textile and apparel Industry. Fibre2Fashion Pvt. Ltd. Loetud aadressil <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/7346/rfid-applications-in-textile-and-apparel-industry>
- Fiestadesign veebileht. (kuupäev puudub). AVDS Group OÜ. <https://fiestadesign.ee/vedeltapeet/>
- Gadkar, R., & Burji, M.C. (2015). Textiles waste recycling. DKTE Society's Textile & Engineering Institute. Loetud aadressil <http://www.textilevaluechain.com/index.php/article/technical/-item/273-textiles-waste-recycling>
- Ghaly, A.E., Ananthashankar, R., Alhattab, M., & Ramakrishnan, V. (2014). Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 5, 182
- Goljandin, D. (2013). Desintegrator Milling System Development and Milling Technologies of Different Materials. Tallinn University of Technology.
- Goljandin, D. (2018). Desintegraatoritehnoloogia. Mehaanika ja tööstustehnika instituut, 64-65
- Grain, E. (2016). 3D Printing Fashion with Recycled Polyester: A Sustainable Journey. IFFTI - BIFT 2016 International Conference, 18.02.2016, Beijing BIFT
- Grigore, M. E. (2017). Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, 2(4), 24
- Gulich, B. (2006). Designing textile products that are easy to recycle. Saxon Textile Research Institute, Germany. Woodhead
- Gullingsrud, A. (2017). Fashion fibers: designing for sustainability. *Bloomsbury Publishing Inc*

- Hadded, A., Benltoufa, S., Fayala, F., & Jemmi, A. (2016). Thermo physical characterisation of recycled textile materials used for building insulation. *Journal of Building Engineering*, 5, 34-40
- Hall, M. (2017). Fast Fashion: The Second Largest Polluter In The World. Loetud aadressil <http://theemergingdesigner.com/fast-fashion-the-second-largest-polluter-in-the-world/>
- Hollins, O. (2014). Apparel and Footwear Recycling Innovation. Sustainable Apparel Coalition.
- Horotan, A., & Mulvihill, M. (2018). Safer Made. Safer Chemistry Innovation in the Textile and Apparel Industry. Fashion for Good. Loetud aadressil [https://biomarketinsights.com/wp-content/uploads/2018/06/dcb253\\_bee8ca24afb1405bbd7c731b0885fdc6.pdf](https://biomarketinsights.com/wp-content/uploads/2018/06/dcb253_bee8ca24afb1405bbd7c731b0885fdc6.pdf)
- Humpston, G., Willis, P., Tyler, D., & Han, S. (2014). Technologies for sorting end of life textiles. WRAP, Textile tagging, Prepared by Oakdene Hollins Ltd
- Instron veebileht. (kuupäev puudub). Loetud aadressil <https://www.instron.co.uk/en-gb/>
- International Wool Textile Organization. (kuupäev puudub). The Wool Industry Supply Chain. Loetud aadressil <https://www.iwto.org/wool-supply-chain>
- International Wool Textile Organization. (kuupäev puudub). Wool. Loetud aadressil <https://www.iwto.org/wool>
- Joseph, J., Nair, S.V., & Menon, D. (2015). Integrating Substrateless Electrospinning with Textile Technology for Creating Biodegradable Three-Dimensional Structures. Amrita Centre for Nanosciences and Molecular Medicine, Amrita Vishwa Vidyapeetham University. *Nano Lett.*, 2015, 15 (8), 5420–5426.
- Kaitsevääetenistuse seadus. (2012). RT I, 10.07.2012, 1. Loetud aadressil <https://www.riigi-teataja.ee/akt/113032019073>
- Karayannidis, G. P. & Achilias, D. S. (2007). Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate). *Macromolecular Materials and Engineering*, 292(2), 128-146
- Kinden, T. (2017). Revolve Waste B. V., Loetud aadressil <http://revolvewaste.com>
- Koo, H. J., Chang, G. S., Kim, S. H., Hahm, W. G. & Park, S. Y. (2013). Effects of recycling processes on physical, mechanical and degradation properties of PET yarns. *Fibers and Polymers*, 14(12), 2083-2087
- Kulu, P. (kuupäev puudub). Materjalide ja materjalitehnoloogiaalastest uuringutest Tallinna Tehnikaülikoolis. Loetud aadressil <https://www.digar.ee/arhiiv/et/download/232550>
- Köksal, D., Strähle, J., Müller, M., & Freise, M. (2017). Social sustainable supply chain management in the textile and apparel Industry — a literature review. *Sustainability* 9(1), 100
- Le, K. (2018). Textile Recycling Technologies, Colouring and Finishing Methods.
- Leblanc, R. (2018). Technologies for Automated Sorting of Textiles for Recycling. Sustainable Businesses. The Balance. Loetud aadressil <https://www.thebalancesmb.com/automated-sorting-for-textiles-recycling-2878011>
- Lenzing AG. (2018). Lenzing Investor Presentation 19.04.2018. Innsbruck. Loetud aadressil <https://www.wienerbourse.at/uploads/u/cms/files/service/wertpapierberater/lenzing-bit-innsbruck-042018.pdf>
- Lenzing AG veebileht. (kuupäev puudub). Loetud aadressil <http://www.lenzing.com/en/-investors/equity-story/global-fiber-market.html>
- Maripuu, K. (2018). Uued tooted tekkivad jäädetest ehk auselu. Trash to Trend. Loetud aadressil <http://www.trashtotrend.com/blog/auselu3>

- Martex Fiber. (kuupäev puudub). Loetud aadressil <http://www.martexfiber.com/>
- Michaud, A., King, A., Parviainen, A., Sixta, H., Hauru, L., Hummel, M. & Kilpeläinen, I. (2014). Process for the production of shaped cellulose articles.
- Mitsubishi Chemical Corporation. (kuupäev puudub). Acetate fiber. Loetud aadressil <http://mrtx.co.jp/en/sozai/acetate.html>
- Motte, H., Palme, A. (2018). The development of the Blend Re:wind process. *Mistra Future Fashion report 2018:5*
- Muthu, S. (toim). (2016). *Textiles and Clothing Sustainability*. Hong Kong, Springer Singapore, 132
- Muthu, S.S., Li, Y., Hu, J-Y., & Mok, P-Y. (2012). Recyclability Potential Index (RPI): the concept and quantification of RPI for textile fibres. *Ecological Indicators*, 18, 58-62
- Mägi, V. (2017). *Tekstiilijäätmete vähendamine läbi ehitussektori*. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tartu
- National Overview: Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling. United States Environmental Protection Agency. (kuupäev puudub). Loetud aadressil <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>
- Nayak, R. K., Padhye, R., & Arnold, L. (2011). Melt-electrospinning for production of nanofibres. *Indian Textile Journal*. Loetud aadressil <http://www.indiantextilejournal.com/articles/-/FAdetails.asp?id=-2856>
- New Clothing Recycling Technology Aims to Reduce Clothing Waste. (2017). *Planet Aid news*. Loetud aadressil <http://www.planetaid.org/blog/could-a-new-recycling-technique-help-save-climate-change>
- Niiler, K. (2014). *Tekstiilmaterjalide ümbertöötlemise vajadus ja võimalused*. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn
- Ouchi, A., Toida, T., Kumaresan, S., Ando, W. & Kato, J. (2010). A new methodology to recycle polyester from fabric blends with cellulose. *Cellulose*, 17(1), 215-222
- OÜ Alkranel. (2017). *Jäätmete ringlussevõtuks ettevalmistamise ja ringlussevõtu parimate praktikate kaardistus*. Uuringu lõpparuanne.
- Palme, A., Peterson, A., Motte, H., Theliander, H., & Brelid, H. (2017). Development of an efficient route for combined recycling of PET and cotton from mixed fabrics. *Textiles and Clothing Sustainability*, 3(1), 4
- Pensupa, N., Leu, S-Y., Hu, Y., Du, C., Liu, H., Jing, H., Wang, H., & Lin, C. (2017). Recent Trends in Sustainable Textile Waste Recycling Methods: Current Situation and Future Prospects. *Topics in Current Chemistry*, 375(5), 1-40
- Peterson, A. (2015). *Towards Recycling of Textile Fibers*. Chalmers University of Technology, Sweden. Loetud aadressil <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/218483/-218483.pdf>
- Plamus, T. (2018). *Riide katkemisnäitajate määramine*. KMP0350, Polümeermaterjalide katsetamine. Loengukonspekt. Tallinna Tehnikaülikool
- Purapol LX175 Product Data. (kuupäev puudub). Corbion Purac
- Re:newcell AB veebileht. (kuupäev puudub). <http://renewcell.se/>

- Relvaseaduse, strateegilise kauba seaduse, lõhkematerjaliseaduse ja teiste seaduste muutmise seadus. (2018). RT I, 29.06.2018, 3. Loetud aadressil <https://www.riigiteataja.ee/akt/-129062018003>
- Rengel, A. (2017). Recycled Textile Fibres and Textile Recycling: An overview of the Market and its possibilities for Public Procurers in Switzerland. Be Sustainable, Federal Office for the Environment (FOEN), Bern
- Riidevarustuse elementide loetelu ja kogused. (2007). Kaitsevälase riidevarustuse elementide loetelu ja kogused, nende kasutusse andmise, ladustamise, hooldamise, kõlbmatuks tunnistamise, mahakandmise ja hävitamise ning võõrandamise kord. Lisa 1. RTL 2007, 83, 1411. Loetud aadressil <https://www.riigiteataja.ee/akt/13080560/html/13080585>
- Roscacil.com veebileht. (kuupäev puudub). Loetud aadressil <http://www.rosacil.com.br/new/-construcao.html>
- Sandin, G., Peters, G. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling. *Journal of Cleaner Production*, 184, 353-365
- Schmidt, A., Watson, D., Roos, S., Askham, C., & Poulsen, P.B. (2016). Gaining benefits from discarded textiles – LCA of different treatment pathways. *TemaNord*, 2016, 537.
- Schuch, A. B. (2017). Recycle and Materials for Circularity. Loetud aadressil <https://www.linkedin.-com/pulse/recycle-materials-circularity-alice-beyer-schuch>
- Shen, L., Worrell, E., Patel, M.K. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (1), 34-52
- Statista GmbH. (kuupäev puudub). Global chemical fiber production from 2000 to 2017, by fiber type. Loetud aadressil <https://www.statista.com/statistics/271651/global-production-of-the-chemical-fiber-industry/>
- Suup, K. (2018). Kaitseväe rõivastuse käitlemise võimalused lähtuvalt ringmajanduse mudelist. (Lõputöö). Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn
- Sweeny, G. (2015). Fast Fashion is the Second Dirtiest Industry in the World, Next to Big Oil – EcoWatch. Loetud aadressil <https://www.ecowatch.com/fast-fashion-is-the-second-dirtiest-industry-in-the-world-next-to-big--1882083445.html>
- Zhang, B., Yan, X., He, H-W., Yu, M., Ning, X., Long, Y-Z. (2017). Solvent-free electrospinning: opportunities and challenges. *Journal of Polymer Chemistry*, 8.2017, 333-352
- Technological Breakthrough: successful method found for recycling blend textiles into new fibres. (2017). H&M Group veebileht. Loetud aadressil <https://about.hm.com/en/media/news/-general-2017/Successful-method-found-for-recycling-blend-textiles-into-new-fibres.html>
- Teo, W-E. (2018). Electrospun Recycled Materials. ElectrospinTech. Loetud aadressil <http://electrospintech.com/recycledmaterials.html#.WwwCMjSFOM9>
- Textile Exchange. (2016). Preferred Fiber Market Report 2016
- The Fiber Year (2015). World Survey on Textiles and Nonwovens. The Fiber Year Consulting, 15. Loetud aadressil <https://www.textilemedia.com/assets/Uploads/TFY15-sample-pages.pdf>
- Thompson, P. Willis, P., & Morley, N. (2012). A review of commercial textile fibre recycling technologies. WRAP
- Thiry, M. C. (2009). Everything Old is New Again: Recycling, Recycled, and Recyclable Fibers. *AATCC Review*, 9(3), 20-25
- Thread. (kuupäev puudub). Thread International PBC Inc veebileht. Loetud aadressil <https://threadinter-national.com/where-it-began/>

- Truscott, L., Tan, E., & Opperskalski, S. (2017). Textile Exchange. Preferred Fibre and Materials Market Report 2017
- Tomovska, E., Jordeva, S., Trajković, D., & Zafirova, K. (2016). Attitudes towards managing post-industrial apparel cuttings waste. *The Journal of The Textile Institute*. 108 (2), 172–177
- Tuulik, D. (2010). Sünteetilised kiud (2). Loetud aadressil [https://evm.ee/uploads/files/Kanut/-S\\_nteetilised%20ja%20anorgaanilised%20kiud%20\\_\(2\\_\).pdf](https://evm.ee/uploads/files/Kanut/-S_nteetilised%20ja%20anorgaanilised%20kiud%20_(2_).pdf)
- Vadicherla, T., & Saravanan, D. (2014). Textiles and Apparel Development Using Recycled and Reclaimed Fibers. *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing*. 139-160
- Valvan Balin Systems. (kuupäev puudub). Fibersort. Loetud aadressil <http://www.valvan.com/products/equipment-for-used-clothing-wipers/sorting-equipment/fibersort/>
- Värvikeskuse Grupp OÜ veebileht. (kuupäev puudub). <http://varvikeskus.ee/tapeedid/-vedeltapeet/>
- Walker, A. (2014). Process for extracting polyester from an article. Google Patents. Loetud aadressil <https://patents.google.com/patent/WO2014045062A1/en>
- Wang, Y. (2006). Recycling in Textiles. *Woodhead Publishing*. 2–3.
- Wang, Y., (2010). Fiber and textile waste Utilization. *Waste Biomass Valorization* 1, 135–143.
- Watson, D., Aare, A., Dahl-Petersen, S., & Trzepacz, S. (2018). Used textile collection in European cities. Study commissioned by Rijkswaterstaat under the European Clothing Action Plan (ECAP). Loetud aadressil [http://www.ecap.eu.com/wp-content/uploads/2018/07/ECAP-Textile-collection-in-European-cities\\_full-report\\_with-summary.pdf](http://www.ecap.eu.com/wp-content/uploads/2018/07/ECAP-Textile-collection-in-European-cities_full-report_with-summary.pdf)
- Watson, D., Elander, M., Gylling, A., Andersson, T., & Heikkilä, P. (2017). Stimulating Textile-to-Textile Recycling. *TemaNord 2017: 569*. Nordic Council of Ministers
- Wedin, H., Gupta, C., Mzikian, P., Englund, F., Hornbuckle, R., Troppenz, V., Kobal, L., Krečić, M., Costi, M., Ellams, D., & Olsson, S. (2017). Can automated NIR technology be a way to improve the sorting quality of textile waste? Trash-2-Cash, Research Institutes of Sweden, SOEX Group, University of the Arts London, Tekstina and Material ConneXion. Loetud aadressil [https://static1.squarespace.com/static/5891ce37d2b857f0c58457c1/t/5a0049-d26c3194747a7de384/1509968342157/october\\_2017\\_rise\\_report.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5891ce37d2b857f0c58457c1/t/5a0049-d26c3194747a7de384/1509968342157/october_2017_rise_report.pdf)
- Ülevaade idufirmadest, kes osalevad juba sel kolmapäeval Powerup!2018 Eesti finaalis. (2018). Tehnopol veebieht. Loetud aadressil <https://www.tehnopol.ee/ulevaade-idufirmadest-kes-osalevad-powerup2018-eesti-finaalis/>
- 3CULAR 3D saepuru printer. (2018). Loetud aadressil [https://www.negavatt.ee/sites/default/files/3cular\\_one\\_pager-page-001.jpg](https://www.negavatt.ee/sites/default/files/3cular_one_pager-page-001.jpg)
- 3D printimine – kasutusala ja erinevad tehnoloogiad. (kuupäev puudub). metshein.com. Loetud aadressil <https://www.metshein.com/unit/3d-printimine-kasutusala-ja-erinevad-tehnoloogiad/>

## SUMMARY

The growing problem of fast fashion and overproduction of textiles and garments bring technological possibilities of waste recycling into special focus from year to year. Textile products and garments are designed to be unsuitable for recycling in a closed loop system. Their composition and properties are very different, making processing difficult and expensive. Designing solutions at the materials' design stage would significantly reduce investment and efforts to recycle this type of waste. However, as long as innovative technologies are still in the development phase, already existing solutions should be used as creatively and effectively as possible to redirect the textile waste back into circulation.

The initiative of public sector organizations is an excellent opportunity to change the mentality and behavioral patterns of both consumers and producers. The topic of this Master's Thesis is also a result of this approach. It was initiated by the Estonian Defense Forces to find solutions for recycling the textile waste of individual equipment of military serviceman of the Defense Forces. As a result of theoretical and practical research, the aim of this work is to provide alternative ways to recycle the textile waste of the individual equipment of the Estonian Defense Forces, irrespective of their fibrous composition and condition, and to produce products and materials based on the closed loop principle. The purpose was also to carry out experiments with materials of different fiber composition so that the results could be extended to the bulk of the textile waste in general.

In order to find applications for textile waste at both lower and higher value levels, the novel solutions were chosen alongside the most common recycling solutions as well. Solutions for shredded waste with different fibrous compositions were provided: preparation of a variety of non-woven and composite materials; dissolution in ionic liquids and regeneration of new fibers; preparation of filament and granules of textile pulp which can be used as a source for 3D printing.

From the possibilities mapped out during the research it can be concluded that the number of recycling options which exists for the individual textile equipment of serviceman of the Estonian Defense Forces are considerably higher than for the overall post-consumer textile waste because the fiber composition of the materials is very well detectable and the variations of the different materials are not large. Sorting such waste is easier and provides more opportunities for recycling at the same or higher value levels. However, when making such choices, it is recommended that the Estonian Defense Forces first assess whether and what are the needs of Defense Forces to use recycled materials and the products made from it. Depending on this, it is also possible to describe the exact task of reprocessing and find a suitable service provider for the process. The Estonian

Defense Forces have the opportunity to partially abandon the cheapest price criterion in public procurements and value products from recycled materials, including the textile waste generated by their own organization.

In the author's opinion, in order to produce high quality materials and products it is important to continue with the research of applications and recycling possibilities of textile waste at the same or higher value levels. Development of a shredding technology, which would allow textiles with different composition and additive details to be process without excessive resource consumption is also of a great importance here.



# LISAD

## LISA 1 Läbiviidud uuringud taaskasutuse ja ümbertöötlemise valdkonnas

Autor ja avaldamise aasta	Taaskasutus või ümbertöötlemine	Taaskasutatud materjalid	Ümbertöödeldud materjalid	Kanga, kiu, polümeeri/oligomeeri või monomeeri ümbertöötlemine
Dahlbo jt. 2017	Mõlemad	CO, PES, CV	Tselluloos (CO, CV, jt.), PES, täpsustamata	Kiud, polümeer/oligomeer
Esteve-Turrillas & de la Guardia 2017	Ümbertöötlemine	N/A	CO	Kiud
Fortuna & Diyamandoglu 2017	Mõlemad	CO	CO	polümeer/oligomeer
Zamani jt.2017	Taaskasutus	CO, PES, EA	N/A	N/A
Bamonti jt. 2016	Ümbertöötlemine	N/A	WO	Kiud
Vergara jt. 2016	Taaskasutus	CO	N/A	N/A
Yasin jt. 2016	Ümbertöötlemine	N/A	CO	Kiud
Castellani jt. 2015	Taaskasutus	Täpsustamata	N/A	N/A
Autor ja avaldamise aasta	Taaskasutus või ümbertöötlemine	Taaskasutatud materjalid	Ümbertöödeldud materjalid	Kanga, kiu, polümeeri/oligomeeri või monomeeri ümbertöötlemine
Zamani jt. 2015	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES	Kangas, polümeer/oligomeer, monomeer
Pegoretti jt. 2014	Ümbertöötlemine	N/A	CO	Kiud
Corsten jt. 2013	Mõlemad		PET pudelid	Täpsustamata
Glew jt. 2012	Ümbertöötlemine	N/A	CO, WO	Kiud
Liang jt. 2012	Ümbertöötlemine	N/A	Täpsustamata	Kiud
Muthu jt. 2012	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES	Täpsustamata
Muthu jt. 2012	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES, CV, WO, PA, PAN, PP, LDPE, HDPE	Täpsustamata
Shen jt. 2012	Ümbertöötlemine	N/A	PET pudelid	Polümeer/oligomeer
Intini&Kühtz 2011	Ümbertöötlemine	N/A	PET pudelid	Polümeer/oligomeer
Shen jt. 2011	Ümbertöötlemine	N/A	PET pudelid	Polümeer/oligomeer
Farrant jt. 2010	Mõlemad	CO, PES	CO	Kangas
Shen jt. 2010	Ümbertöötlemine	N/A	PET pudelid	Polümeer/oligomeer, monomeer
Woolridge jt. 2006	Mõlemad	CO, PES	CO	Kangas, kiud
Spathas 2017	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES, PET pudelid, täpsustamata	Kiud, Polümeer/oligomeer
Bodin 2016	Mõlemad	Täpsustamata	CO, PES, CV, WO, PA	Kangas
Schmidt jt. 2016	Mõlemad	CO, PES, WO	CO, PES, WO	Kiud, polümeer/oligomeer
Bjurbäck 2015	Taaskasutus	CO, PES	N/A	N/A
Östlund jt. 2015	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES	Kiud, polümeer/oligomeer, monomeer
Beton jt. 2014	Mõlemad	CO, PES, CV, WO, LI, SE, PA, PAN, HF, PU, PP	CO, PES, CV, WO, LI, SE, PA, PAN, HF, PU, PP	Kangas

Hagoort 2013	Ümbertöötlemine	N/A	PES	Kiud, polümeer/oligomeer, monomeer
Palm jt. 2013	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES, CV	Kiud, polümeer/oligomeer, monomeer
Youhanan 2013	Mõlemad	CO, PES, CV	CO, PES	Kiud, polümeer/oligomeer
Fisher jt. 2011	Taaskasutus	CO, WO	N/A	N/A
Pesnel&Perweulz 2011	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES	Kiud, monomeer
Sahni jt. 2010	Taaskasutus	CO, CV	N/A	N/A
Bartl 2009	Mõlemad	CO, CV	CO, PES, CV	Täpsustamata
McGill 2009	Mõlemad	CO, PES, CV, WO, PP, PA, PAN	CO, PES, CV, WO, PP, PA, PAN	Kiud
AITEX 2007	Ümbertöötlemine	N/A		Kiud
Korhonen&Dahlbo 2007	Ümbertöötlemine	N/A	CO, CO PES, CV, WO	Kiud
Allwood jt. 2006	Mõlemad		CO	Kiud
Fisher 2006	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES	Täpsustamata
Fisher jt 2006	Ümbertöötlemine	N/A	CO, PES	Kiud, täpsustamata
Patagonia 2006	Ümbertöötlemine	N/A	PES	Monomeer


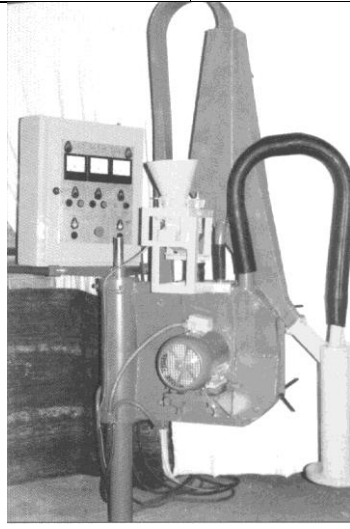
Allikas: Sandin & Peters, 2018

CO - puuvill (ingl k cotton); PES – polüester (ingl k polyester); CV - viskoos (ingl k viscose); PET - polüetüleentereftalaat (ingl k polyethylene terephthalate); PP - polüpropüleen (ingl k polypropylene); PA - polüamiid (ingl k polyamide); PAN – akrüül (ingl k polyacrylic); EA - elastaan (ingl k elastane); WO – vill (ingl k wool); LI - lina (ingl k linen); HF - kanep (ingl k hemp); SE - siid (ingl k silk); PU - polüuretaan (ingl k polyurethane); LDPE - madala tihedusega polüetüleen (ingl k low-density polyethylene); HDPE - kõrge tihedusega polüetüleen (ingl k high-density polyethylene); N/A - vaste puudub (ingl k not applicable)

## LISA 2 Laboratoorne pooltööstuslik desintegraatorseade DSL-115

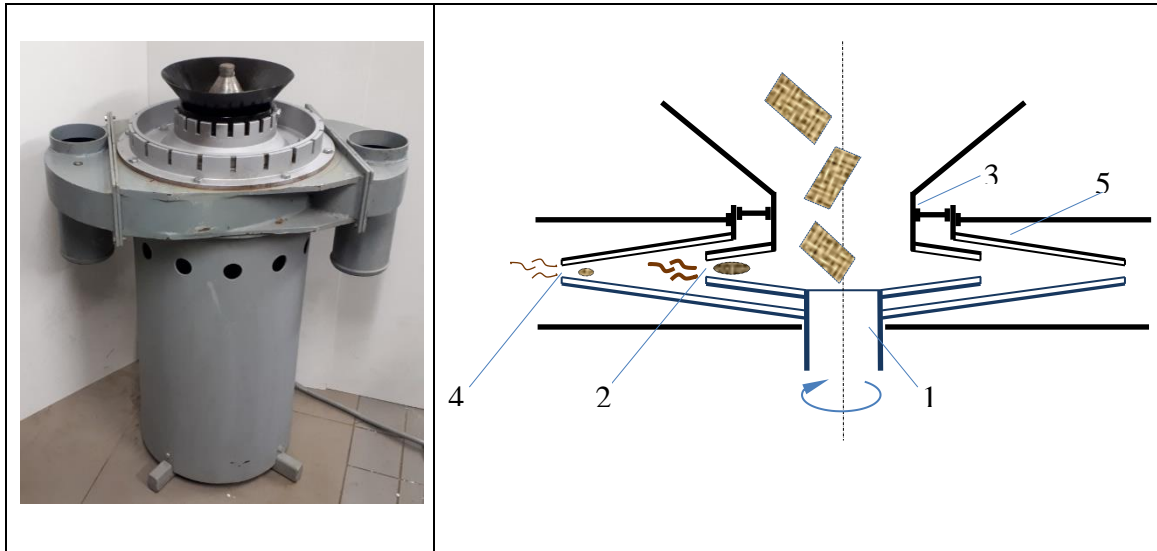
Seade on ettenähtud:

- Mitmesuguste materjalide peenestamiseks ja aktiveerimiseks põrke- ja löögijõudude toimetel.
- Tööstuslike protsesside modelleerimiseks, jahvatus- ja separeerimisparameetrite määramiseks.
- Tööks järgmistel jahvatusrežiimidel:
  - Otsejahvatus
  - Separatsioonjahvatus
  - Selektiiv-separatsioonjahvatus
- Kasutamiseks järgmiste separaatoritega:
  - Inertsiaalseparaator
  - Tsentrifugaalseparaator

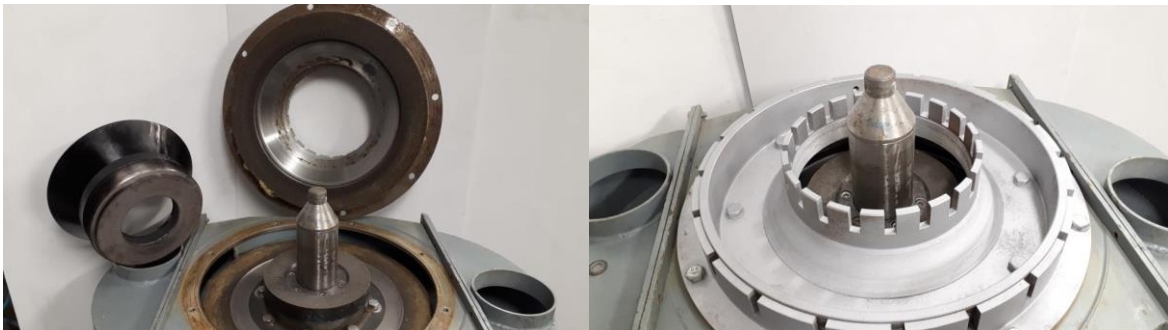
Desintegrator DSL-115 kolmerealise rootoriga. Tehnilised andmed		
Ajam	mootorid põrkekiirus	5,5+4,0 kW kuni 140 m/s
Lähtematerjal	tüki suurus	kuni 12 mm
Lõpp-produkt	Osakeste keskmine suurus separatsioonjahvatamisel – Inertsiaalseparaatoriga – Tsentrifugaalseparaatoriga	50... 250 µm < 50 µm
Rootorite maksimaalne läbimõõt		480 mm
Tootlikkus	– otsejahvatusel – separatsioonjahvatusel – selektiivjahvatusel	kuni 350 kg/h 100 kg/h 350 kg/h
Gabariidid (laius*pikkus*kõrgus)		800 x 900 x 2300 mm
Desintegraatori mass		300 kg
		
a) otsejahvatusüsteem		

### LISA 3 Elastsete materjalide peenestusseade PP-1

Ekspérimentaalne purustusseade on Tallinna Tehnikaülikoolis algelt kavandatud PET-pudelite ja muude plastmaterjalide purustamiseks ja peenjahvatamiseks. Tegemist on originaalse konstruktsiooniga, patentidega kaitstud efektiivse seadmega plastmaterjalide korduvkasutuseks, millele otsitakse tööstuslikuks tootmiseks pakkujat.



Plastmaterjalide peenestusseade ja skeem; 1 – pöörlev rootor, 2 ja 4 – eelpurustuse ja peenpurustuse tsoonid, 3 ja 5 – reguleerimisvõimalusega kinnisketta lõiketerastega pilu





## NONWOVENS FIBER

Commercial Product Description

### *Ingeo Bicomponent bonding Fiber SLN2450CM*

Ingeo fiber type SLN2450CM is a medium denier polylactic Acid (PLA) staple fiber. The Ingeo fiber starts with an abundant, natural and sustainable raw material like corn, The Ingeo means ingredient from the earth keeping humanity, nature and technology in balance.

The Ingeo bonding fiber is a bicomponent fibers with low-melt PLA sheath and PLA core. This fiber has low melting point( 130°C/ 170°C), thermoplastics and self-adhesive properties. Ingeo bonding fibers have a range of melting temperatures and can bind with PLA Ingeo fibers as well as other natural fibers. The performance will not diminish or fade after washings or over time. It provides a bridge between Ingeo fiber or other natural fibers to make nonwoven 100% natural ingredient.

#### Applications :

Padding, Wadding, Cushion, Duvet, Comfort, Filter, etc.

#### Packing Information :

Ingeo fiber type SLN2450CM is supplied in bales weighing average 250Kgs per bale.

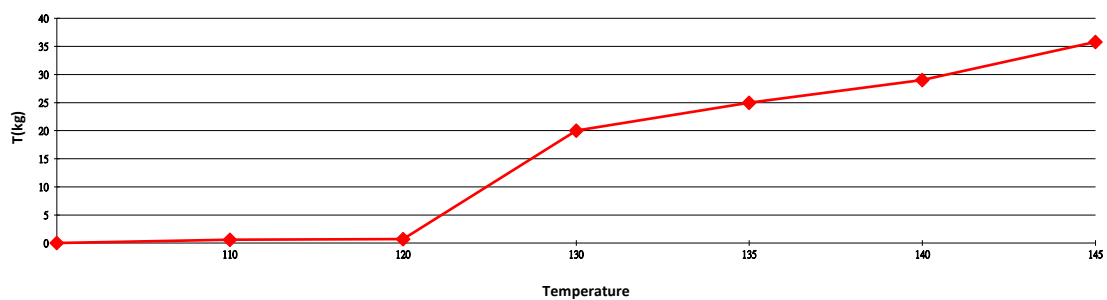
### *Typical Physical Properties*

#### FIBER SPECIFICATION

Denier:	4
Length(mm):	51

#### PHYSICAL PROPERTIES

Tenacity(g/d):	3.6±0.5
Elongation at Break(%):	45±10
Hot-Air Shrinkage(85°Cx15min)(%):	≤6.5



Far Eastern Textile Ltd.

TEL : 886-2-27378806 ; 27378825 FAX : 886-2-27358270 ; 23772947

## LISA 5 Lausmaterjali 1 pindtiheduse ja tõmbekatsete andmed

Lausmaterjali 1 erineva kiulise koostisega katsekehade keskmised pindtihedused					
Katsekeha nr	Kuumpressimisel kasutatud temperatuur (°C)	Pindtihedus (g/m <sup>2</sup> )			
		Materjal nr 1	Materjal nr 2	Materjal nr 3	Materjal nr 4
1	100	235,80	228,62	237,11	189,12
2	100	220,98	577,27	250,84	264,51
3	110	167,13	304,09	214,99	184,05
4	110	260,23	557,44	247,62	288,14
5	120	155,31	309,14	228,60	226,11
6	120	265,88	425,70	308,11	207,36
7	130	158,41	331,33	331,56	174,98
8	130	221,31	321,56	330,65	183,55
Keskmine		210,63	381,89	268,69	214,73

Lausmaterjali 1 erineva kiulise koostisega katsekehade tõmbekatsete andmed									
Materjal nr 1									
Materjal	Kuumpressimise temperatuur, °C	Pindtihedus, M (g/m <sup>2</sup> )	Absoluutne katkepikene mine (mm)	Katkekoormus (N)	Venivus katkemise momendil (%)	Maksimaalne jõud, P <sub>t</sub> (N)	Venivus maksimaalse jõu juures (mm)	Suhteline venivus, ε <sub>t</sub> (%)	Suhteline koormus, P <sub>0</sub> (Nm/g)
õhem	100°C	235,80	10,68	4,16	35,62	7,21	3,101	4,43	1,529
paksem	100°C	220,98	11,46	7,74	38,21	11,34	3,157	4,51	2,566
õhem	110°C	167,13	10,63	14,59	35,43	25,77	4,435	6,34	7,710
paksem	110°C	260,23	11,46	14,32	38,21	38,93	5,324	7,61	7,480
õhem	120°C	155,31	6,3	42,57	20,99	46,51	6,018	8,60	14,973
paksem	120°C	265,88	7,8	39,79	25,99	65,22	6,685	9,55	12,265
õhem	130°C	158,41	6,46	58,15	21,54	59,79	6,018	8,60	18,872
paksem	130°C	221,31	4,32	36,07	14,41	43,53	3,435	4,91	9,835
Materjal nr 2									
Materjal	Kuumpressimise temperatuur, °C	Pindtihedus, M (g/m <sup>2</sup> )	Absoluutne katkepikene mine (mm)	Katkekoormus (N)	Venivus katkemise momendil (%)	Maksimaalne jõud, P <sub>t</sub> (N)	Venivus maksimaalse jõu juures (mm)	Suhteline venivus, ε <sub>t</sub> (%)	Suhteline koormus, P <sub>0</sub> (Nm/g)
õhem	100°C	228,62	21,07	1,77	21,07	5,02	4,740	6,77	1,098
paksem	100°C	577,27	21,55	4,01	21,55	11,71	6,657	9,51	1,014
õhem	110°C	304,09	16,66	6,25	55,52	21,56	3,435	4,91	3,545
paksem	110°C	557,44	16,02	8,71	53,39	24,64	4,351	6,22	2,210
õhem	120°C	309,14	7,38	57,48	24,6	62,04	6,213	8,88	10,034
paksem	120°C	425,70	8,88	75,13	29,6	101,58	7,240	10,34	11,931
õhem	130°C	331,33	6,68	66,96	22,28	86,6	5,851	8,36	13,068

Materjal nr 3									
Materjal	Kuumpresimise temperatuur, °C	Pindtihedus, $M$ (g/m <sup>2</sup> )	Absoluutne katkepikene mine (mm)	Katkekoormus (N)	Venivus katkemise momendil (%)	Maksimaalne jõud, $P_t$ (N)	Venivus maksimaalse jõu juures (mm)	Suhteline venivus, $\epsilon_t$ (%)	Suhteline koormus, $P_o$ (Nm/g)
õhem	100°C	237,11	10,3	6,55	34,32	10,05	3,879	5,54	2,119
paksem	100°C	250,84	11,74	6,6	39,13	11,74	4,046	5,78	2,340
õhem	110°C	214,99	11,71	14,43	39,04	33,39	6,074	8,68	7,765
paksem	110°C	247,62	11,77	16,97	39,23	60,95	6,935	9,91	12,307
õhem	120°C	228,60	6,71	45,46	22,37	53,55	5,768	8,24	11,712
paksem	120°C	308,11	9,16	73,75	30,52	87,66	7,712	11,02	14,225
Materjal nr 4									
Materjal	Kuumpresimise temperatuur, °C	Pindtihedus, $M$ (g/m <sup>2</sup> )	Absoluutne katkepikene mine (mm)	Katkekoormus (N)	Venivus katkemise momendil (%)	Maksimaalne jõud, $P_t$ (N)	Venivus maksimaalse jõu juures (mm)	Suhteline venivus, $\epsilon_t$ (%)	Suhteline koormus, $P_o$ (Nm/g)
õhem	100°C	189,1	11,57	4,52	38,58	10,12	1,740	2,49	2,676
paksem	100°C	264,5	10,43	8,58	34,78	15,57	3,379	4,83	2,943
õhem	110°C	184,0	11,38	8,62	37,93	20,96	4,240	6,06	5,694
paksem	110°C	288,1	10,85	9,75	36,17	31,58	2,601	3,72	5,480
õhem	120°C	226,1	6,3	34,6	20,99	46,85	5,157	7,37	10,360
paksem	120°C	207,4	6,63	24,37	22,1	39,73	4,796	6,85	9,580
õhem	130°C	175,0	4,24	35,12	14,13	42,87	3,324	4,75	12,250
paksem	130°C	183,6	3,49	40,19	11,63	42,06	3,213	4,59	11,457