



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

**ERINEVA STRUKTUURIGA LÕNGADE
VALMISTAMINE MEHAANILISELT
ÜMBERTÖÖDELDUD TEKSTIILKIUDUDEST**

**MANUFACTURING OF YARNS WITH DIFFERENT
STRUCTURE FROM MECHANICALLY RECYCLED TEXTILE
FIBRES**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Laura Kuningas

Üliõpilaskood 185420EANB

Juhendaja: Tiia Plamus, vanemlektor

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.

"01." juuni 2021

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"01." juuni 2021

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees Tiia Plamus

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Laura Kuningas

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Erineva struktuuriga lõngade valmistamine mehaaniliselt ümbertöödeldud tekstiilkiududest“, mille juhendaja on Tiia Plamus,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

01.06.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loominguulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Laura Kuningas, 185420EANB
Õppekava, peeriala: EANB16/17 Materjalitehnoloogia
Juhendaja: Vanemlektor, Tiia Plamus, +372 562 11653

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Erineva struktuuriga lõngade valmistamine mehaaniliselt ümbertöödeldud tekstiilkiududest
(inglise keeles) Manufacturing of yarns with different structure from mechanically recycled textile fibres

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Erineva kiulise koostisega uutest ja mehaaniliselt ümbertöödeldud kiududest kedratud lõngade omaduste katsetamine ja lõnga optimaalse kiulise koostise leidmine.
2. Ülevaate andmine tekstiiljäätmete probleemistikust maailmas ja nende ümbertöötlemise viisidest.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teema valik on kinnitatud ja kooskõlastatud juhendajaga.	11.09.20
2.	Tekstiiljäätmed, nende problemaatika ja ümbertöötlemise võimalused.	20.09.20
3.	Kiud ja lõngad, nende omadused ning ketrusprotsess.	18.10.20
4.	Kiududele ja lõngadele teostatavad katsed.	25.10.20
5.	Turuanalüüs kaubanduses saada olevatele lõngadele ja lõngade tellimine.	18.11.20
6.	Teadusallikate ja uuringute otsing.	22.11.20
7.	Katsetega alustamine.	13.12.20
8.	Lõputöö lõplik ülesehitus on paigas.	03.02.21
9.	Ringmajandus tekstiili- ja rõivatööstuses.	21.02.21
10.	Otsitud teadusallikatest ja uuringutest järelduste välja toomine.	07.03.21
11.	Teoreetilised peatükkide täiendamine.	21.03.21

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
12.	Ülevaade Viljandi Kultuuriakadeemias lõnga ketramiseks kasutatavatest seadmetest.	13.04.21
13.	Katsetatavate materjalide ja katse töökäikude kirjeldus.	27.04.21
14.	Katsed on läbi viidud.	02.05.21
15.	Katsetulemustest kokkuvõtte kirjutatud.	07.05.21
16.	Uuringute täiendav otsing.	17.05.21
17.	Katsetulemused on analüüsitud.	25.05.21
18.	Lõputöö on valmis esitamiseks juhendajale.	27.05.21

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "01." juuni 2021.a

Üliõpilane: Laura Kuningas "01." juuni 2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Tiia Plamus "01." juuni 2021.a
/allkiri/

Programmijuht: Tiia Plamus "01." juuni 2021.a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
1. SISSEJUHATUS.....	10
2. TEKSTIILMATERJALID.....	11
2.1 Tekstiilkiud.....	11
2.1.1 Kiudude omadused	12
2.1.2 Lõnga ketruseks kasutatavate kiudude omadused	13
2.2 Niidid ja lõngad.....	14
2.2.1 Lõngade omadused	15
2.2.2 Lõnga ketramine	17
2.2.3 Lõngade kasutusvaldkonnad	18
3. TEKSTIILIJÄÄTMED JA NENDE ÜMBERTÖÖTLEMINE	19
3.1 Ringmajandusmudel	19
3.2 Tekstiilijäätmete ümbertöötlemismeetodid	22
3.3 Mehaaniline tekstiilijäätmete ümbertöötlemise protsess	23
3.4 Mehaaniliselt ümbertöödeldud kiudude omadused	24
3.5 Ümbertöödeldud kiududest valmistatud lõngad	26
4. TEKSTIILMATERJALIDE KATSETAMINE	29
4.1 Tekstiilmaterjalide ettevalmistus	29
4.2 Kiududega tehtavad katsetused	30
4.3 Lõngadega tehtavad katsetused	31
5. MATERJALID JA MEETODID	35
5.1 Lõngade ketramisel kasutatud kiud	35
5.2 Katsetatavad lõngad.....	36
5.3 Katsemeetodid.....	37
5.3.1 Tekstiilmaterjalide vaatlemine digitaalse mikroskoobiga	38
5.3.2 Tekstiilmaterjalide vaatlemine valgusmikroskoobiga	39
5.3.3 Kiudude pikkuse määramine	39
5.3.4 Lõnga joontiheduse määramine.....	40
5.3.5 Lõnga keerdumuse mõõtmine	41
5.3.6 Katkekoormuse ja -venivuse määramine	42
5.3.7 Lõnga ühtluse hindamine	43
6. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	44
6.1 Kiud	44
6.1.1 Kiudude visuaalne vaatlus	44
6.1.2 Kiudude pikkus	46

6.2 Lõngad	48
6.2.1 Lõngade struktuuri ja keerdumuse määramine.....	48
6.2.2 Joontihedus	51
6.2.3 Keerdumus.....	51
6.2.4 Katkekoormus ja -venivus	52
6.2.5 Ühtlus.....	53
7. JÄRELDUSED.....	56
KOKKUVÕTE	60
SUMMARY.....	62
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	64
LISAD	72
Lisa 1 Kaubandusest soetatud lõngade maksumus	73
Lisa 2 Viljandi Kultuuriakadeemias lõnga ketramiseks kasutatavad seadmed.....	74
Lisa 4 Digitaalse mikroskoobi fotod tekstiilmaterjalide tükkidest ümbertöödeldud kiududes	77
Lisa 5 Valgusmikroskoobi fotod ümbertöödeldud kiududest.....	78
Lisa 6 Kiudude pikkused	80
Lisa 7 Lõngade joontihedus.....	82
Lisa 8 Lõngade keerdumus	83
Lisa 9 Lõngade mehaanilised omadused	84

EESSÕNA

Käesolev bakalaureusetöö on edasi arendatud aine Materjalitehnoloogia projekti raames kirjutatud samanimelisest projektist. Antud lõputööle pakkus teema ja sõnastuse välja juhendaja Tiia Plamus. Bakalaureusetöö on osaliselt valminud SA Keskkonnainvesteeringute Keskuse poolt finantseeritud projekti „Tekstiilijäätmete purustamistehnoloogia ja uudsete materjalide arendamine tekstiilijäätmete väärindamiseks ning ringmajanduse toetamiseks“ toel.

Bakalaureusetöös on käsitletud aktuaalset tekstiilijäätmete probleemi ning vähesest ringlussevõtust tulenevalt keskendutud sellele, kuidas on võimalik toota maksimaalse ümbertöödeldud tekstiilkiudude sisaldusega tugevat lõnga. Teoreetilises osas käsitletakse põhjalikumalt lõngasid, nende omadusi, tekstiilijäätmete mehaanilisel ümbertöötlemisele saadavate kiudude ja lõngade omadusi, sest lõputöö katseline pool on seotud lõngadega. Lisaks tutvustatakse ringmajandusmudeli olulisust, tekstiilijäätmete ümbertöötlemise meetodeid ja protsessi, tekstiilkiududele ja lõngadele tehtavaid katsetusi. Töö koostamisel on kasutatud teemakohaseid kirjandusallikaid ja uuringuid ning teostatud lõngadele katsetusi.

Lõputöö raames läbi viidud katsed teostati erineva kiulise koostise ja struktuuriga tekstiilmaterjalidele Tallinna Tehnikaülikooli Polümeeride ja tekstiilitehnoloogia laboris olevate seadmetega. Osa katsetatud lõngadest telliti kaubandusest DROPS Design kodulehelt, aga enamik valmistati Tartu Ülikooli Viljandi Kultuuriakadeemias. Rahvusliku tekstiili õppekoja meister Astri Kaljus oli abiks Tartu Ülikooli Viljandi Kultuuriakadeemias lõngade ketramisel ning selleks kasutatud seadmetest ja ketramisprotsessist tutvustava teksti kontrollimisel.

Suur tänu juhendaja Tiia Plamusele, kes andis head nõu tekkinud küsimustele ja põhjalikku tagasisidet terve lõputöö kirjutamise jooksul. Tänuõnad Tartu Ülikooli Viljandi Kultuuriakadeemiale, kellega koostöös sai bakalaureusetöö praktiline pool teoks. Autor soovib tänada ka oma pereliikmeid igakülgse toetuse eest.

Võtmesõnad: tekstiilijäätmed, ümbertöötlemine, tekstiilkiud, lõngad, bakalaureusetöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

1x – ühekordne lõng

1xJ – ühekordne jämedam lõng

2x – kahekordne lõng

2xJ – kahekordne jämedam lõng

CO – puuvill

PES – polüester

WO – vill

üCO – ümbertöödeldud puuvill

üMIX – ümbertöödeldud segakiud

1. SISSEJUHATUS

Viimase paarikümne aasta jooksul on kasvanud jõudsalt nii tekstiilkiudude- kui ka erinevate toodete ja rõivaste tootmine, mis on viinud ületarbimiseni. Tekstiilmaterjalide ületarbimine on põhjustanud tekstiilijäätmete hulga märkimisväärse kasvu. Üle kogu maailma ja sealhulgas ka Eestis tekib aastaga tohutul hulgal tekstiilijäätmeid, millega ei osata midagi peale hakata. Paraku läheb suurem osa kogunenud tekstiilijäätmetest põletamisele või prügilasse ladestamisele kuigi tekstiilijäätmeid on võimalik ümber töödelda ja seeläbi tõsta tekstiili- ja rõivatööstuse keskkonnasõbralikkust. Koguni 95% praegu kasutuselt kõrvaldatud tekstiilitoodetest ja rõivastest saaks korduskasutada või ringlusse võtta [1].

Tekstiilijäätmete rohkusele on hakatud järjest enam tähelepanu pöörama. Tekkinud ülemaailmsele probleemile lahenduse otsimist toetab ka Euroopa Liidu nõue koguda alates 2025. aastast tekstiilijäätmed teistest jäätmetest eraldi. Tekstiilijäätmete liigiti kogumine on ainult üks samm ringsema majandusmudeli poole liikumisel. Oluline on ka saadud tekstiilijäätmete sorteerimine ning ringlussevõtt. Kuna praegusel ajal ei ole Eestis olemas tõhusat lahendust tekstiilijäätmete ringlussevõtuks, siis antud bakalaureusetöö raames püütakse leida selleks võimalus ümbertöödeldud tekstiilijäätmetest saadud tekstiilkiudude lõngaks ketramise näol. [2]

Käesoleva bakalaureusetöö peamine eesmärk on katsetada erineva kiulise koostisega uutest ja mehaaniliselt ümbertöödeldud kiududest kedratud lõngade omadusi. Saadud katsetulemusi analüüsitakse ja uuritakse nende sõltuvust lõngade koostisest. Lõputöö oodatav tulemus on pakkuda välja ümbertöödeldud kiududest kedratud lõngadele optimaalne kiuline koostis. Teine eesmärk on anda ülevaade tekstiilijäätmete probleemist maailmas ja nende ümbertöötlemisviisidest, keskendudes põhjalikumalt mehaanilisele ümbertöötlemisele.

Bakalaureusetöö esimeses peatükis tutvustatakse tekstiilkiudude ja lõngade omadusi, lõnga ketrusprotsessi ning kasutusrakendusi. Seejärel keskendutakse tekstiilijäätmete problemaatikale ja kirjeldatakse ümbertöötlemismeetodeid ning ümbertöödeldud tekstiilkiudude ja lõngade omadusi. Kolmandas peatükis antakse ülevaade kiududele ja lõngadele tehtavatest erinevatest katsetustest. Neljandas peatükis tutvustatakse lõputöös kasutatud materjale, seadmeid ja katsemeetodeid, millele järgnevas peatükis esitatakse katsetulemusi. Lõpetuseks analüüsitakse katsetulemusi ja tehakse järeldused ning kokkuvõtte.

2. TEKSTIILMATERJALID

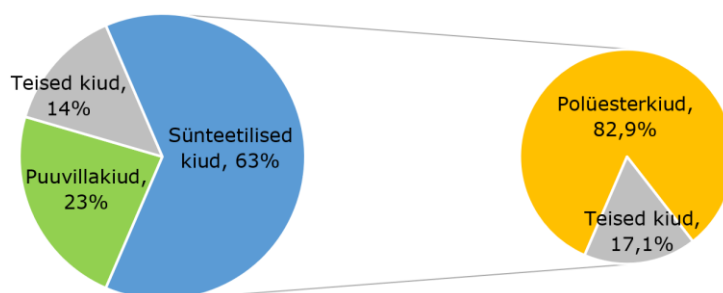
2.1 Tekstiilkiud

Tekstiilkiud on „saadus, mida iseloomustab painduvus, peenus ja suurima laiusmõõduga võrreldes suur pikkus ning mis seega on sobiv tekstiiltoodete valmistamiseks“ [3]. Need omadused annavad kiududele ideaalse sobivuse olla tooraineks erinevate tuntud tekstiilmaterjalide valmistamiseks (joonis 2.1). Esmalt toodetakse tekstiilkiududest niiti või lõnga, millest omakorda kootakse kangaid, ning kangastest valmistatakse edasi rõivaid. Seega võib ütelda, et kiud kui kõige väiksemad tekstiilmaterjalide elemendid on teiste tekstiilide aluseks sõltumata edasistest rakendustest. [4][5][6][7][8]



Joonis 2.1 Kiududest teiste tekstiilmaterjalide valmimise skeem [4][5]

Viimase 20 aastaga on kiudude tootmiskaht rohkem kui kahekordistunud. Maailmas toodeti hinnanguliselt 111 miljonit tonni erinevaid tekstiilkiudusid 2019. aastal. Ennustatav tootmiskaht 2030. aastaks on 146 miljonit tonni. Maailmas on kaks teistest selgelt tootmiskahtude poolt eristuvat kiudu – puuvill ja polüester. 2019. aasta kiudude toodangust (joonis 2.2) oli 23% puuvilla- ja 52% polüesterkiud, mis tähendab, et kahepeale kokku moodustasid pelgalt need kaks kiudu kogu toodangust kolmveerand. Kusjuures sünteetiliste kiudude osakaal kogu kiudude aastasest tootmiskahtust oli lausa 63% ja sellest omakorda polüesterkiudude osakaal oli ligikaudu 82,9%. [9][10]



Joonis 2.2 Kiudude tootmiskaht 2019. aastal [9]

Tekstiilkiudude üldine jaotus põhineb nende päritolul, mille järgi liigitakse tekstiilkiude kaheks: looduslikud ja keemilised ehk tööstuslikult toodetud tekstiilkiud. Looduslike kiude on kasutatud tekstiilide valmistamiseks muinasajast peale. Arvatavasti seetõttu, et need on kättesaadavad loodusest – põhiliselt taimedelt ja loomadelt. Keemilisi kiude valmistatakse sünteetiliste ja keemiliste protsesside kaudu looduslike kõrgmolekulaarsete ühendite töötlemisel. Põhiliselt on need naftapõhised kiud.

Puuvillakiud kuuluvad looduslike ja polüesterkiud keemiliste tekstiilkiudude hulka. Kuna kiud on tekstiilmaterjalide toormaterjaliks, siis nende valmistamisel kasutatud kiud määravad tekstiilmaterjalide kiulise koostise [11][12]. [4][5][7][8][13]

Tekstiilkiude on kahte tüüpi – pikemaid ja lühemaid. Filamendid on pikad ja pidevad kiud. Staapelkiud on lühikesed kiud oma päritolu tõttu või lõigatud pikkadest filamentidest lühikesteks. Üldjuhul on staapelkiud omased looduslikele kiududele ja filamendina valmistatakse tööstuslikult toodetuid kiude. Keemilisi kiude saab valmistada aga mistahes pikkusega, sest kiu pikkus määratakse filamendi läbilõikamisel ekstrusiooni käigus ketrusdüüsi läbimisel. Need seosed kehtivad ka puuvilla- ja polüesterkiudude kohta. Puuvillakiududele on omane lühike pikkus. Seetõttu kuuluvad puuvillakiud staapelkiudude hulka. Polüesterkiude saab valmistada nii staapelkiududena kui ka pidevate filamentidena. [6][7][8][13][14][15]

2.1.1 Kiudude omadused

Kiudude omadused on olulised, sest nendest sõltuvad suurel määral valmistatavate tekstiilmaterjalide omadused. Kiudude omadused võib tinglikult jaotada erinevatesse gruppidesse: füüsilised, mehaanilised ja keemilised omadused (joonis 2.3). Üheks olulisemaks grupiks on tekstiilmaterjalide puhul mehaanilised omadused, sest ilma piisava kiu tugevuse ja painduvusega ei saa olla olemas ka lõnga ega kangast. [4][6][16][17]

Füüsilised	Mehaanilised	Keemilised	Teised omadused
<ul style="list-style-type: none"> • pikkus • jämedus • ristlõige • tihedus • joontihedus • värvus 	<ul style="list-style-type: none"> • tugevus • elastsus • painduvus • venivus • jäikus • sitkus • hõõrdekindlus 	<ul style="list-style-type: none"> • vastupanu • leelistele • hapetele • orgaanilistele lahustele • oksüdeerimisele • tulele 	<ul style="list-style-type: none"> • juhtivus • staatilised muutused • niiskuseimavus • soojusjuhtivus • tunnetus

Joonis 2.3 Kiudude omadused [4][16]

Tekstiilmaterjalid võivad koosneda ühte tüüpi kiududest või kiudude segudest. Enim levinuim ja tavalisem tekstiilmaterjali kiuline koostis turul on polüpuuvill ehk polüester- ja puuvillakiu segu. Kiudude omavahelise segamise peamine eesmärk on täiustada ja parandada saadava tekstiilmaterjali omadusi, kasutades ära mõlema kiu paremaid omadusi. Näiteks kui puuvillakiududest kanga eelis on pehmus, mugavus, hea niiskuseimavus ja hingavus ning vastupanu pillingule, siis puuduseks on madal tugevus, vastupidavus ja kortsuvus. Polüesterkiu omadused on pigem vastupidised. Polüesterkiust valmistatud tooted on kortsumiskindlad, hea hõõrdekindlusega,

tugevamad, vastupidavamad kulumisele, venitamisele ja kokkutõmbele, veekindlamad ja kiiresti kuivavamad, aga see-eest jäigemad, ebamugavamad, halvema hingavusega. Puuvilla- ja polüesterkiudude omavaheline omaduste võrdlus on ära toodud tabelis 2.1. [4][7][11][13][18]

Tabel 2.1 Kahe populaarseima kiu omaduste omavaheline võrdlus [4][11][14][18]

Omadus	Puuvillakiud	Polüesterkiud
Kiu pikkus (mm)	10-45	31-51
Maksimaalne purunemispikenemine (%)	10	60
Tõmbetugevus (cN/dtex)		
kuiv	2,6-4,3	3,8-5,3
märg	2,9-5,6	3,8-5,3
Jäikus ehk elastsusmoodul (cN/dtex)	60-82	80-140
Soojusjuhtivus (W/mK)	0,03	0,3
LOI (%)	18,4	20-21
Niiskusimavus (%)	8,5	0,4
Kortsude taastuvus (%)	25	80

2.1.2 Lõnga ketruseks kasutatavate kiudude omadused

Kiu ketramisele on eriti olulise tähtsusega: kiu pikkus, jämedus ja erinevad mehaanilised omadused. Kõik kolm parameetrit avaldavad mõju nii valmiva lõnga omadustele kui ka tootmisprotsessile. Kiudude pikkus peab olema piisav, et läbida ketrusprotsess, ja lühikesed kiud takistavad seda, mistõttu pikemad kiud tagavad kergema lõnga valmistamise. Kiu jämedus ja sellest tulenevalt kiu paindumus mõjutavad samuti ketrusprotsessi. Mehaanilised omadused on tähtsad seetõttu, kuna kiud peavad lõnga tootmisprotsessis vastu pidama erinevatele välistele jõududele ja mõjutustele. [6][15][18][19][20][21]

Kiu pikkus on kõige olulisem tunnus, sest määrab valminud staapellõnga tugevuse, ühtluse, karvasuse ja keerdumuse. Pikematest kiududest saab peenema ja tugevama lõnga. Lühikesed kiud annavad pikematest kiududest väiksema tugevuse, sest need ei püsi kindlalt lõnga struktuuris ja põhjustavad kiudude eraldumist lõnga kasutamisel. Pikemad kiud võimaldavad suuremat kontaktpinda teiste kiududega, mistõttu hõõrdejõud kasvab ja kiud püsivad koos. Mida rohkem kasutatakse lõnga valmistamisel lühemaid kiudusid, seda ebakorrapärasem lõng saadakse. Samuti avaldab suur kiudude ebahühtlus mõju lõngade tugevusele. Lühikesed ja pikad kiud vajavad erinevat keerdumust lõngaks ketramisele – pikemad kiud vajavad väiksemat keerdumust. Lõngade keerutamisel ulatuvad kiudude otsad lõnga pinnalt välja. Lühemad kiud põhjustavad suuremat lõnga karvasust. Lühikesed kiud võivad põhjustada lõnga pinnale kiutompe (ingl k *neps*), mis avaldavad omakorda mõju lõnga välimusele ja seda peetakse nii lõnga kui ka kanga kvaliteeti kahjustavaks teguriks. [4][6][11][12][15][16][17][18][19]

Ühte liiki kiudude pikkus võib oluliselt varieeruda, näiteks ühes kiupallis erinevad kiudude pikkused märgatavalt. Üldjuhul on kiudude pikkuste suur varieeruvus omane looduslikele kiududele, eriti puuvillakiududele, millel võib see olla lausa 40%. Puuvillakiu keskmised staapelkiu pikkused jäävad vahemikku 10-45 mm [14] ja polüesterkiul 31-51 mm, mis kinnitavad seda, et keemilised kiud on looduslikest pikemad. Lõngaks ketramisel on oluline, et see kiudude pikkuste varieeruvus oleks võimalikult madal. Nii saab tagada parema lõnga ühtluse. Samuti ei tohiks kiud olla liialt lühikesed, sest lühemad kiud ei läbi lõnga tootmisprotsessi. Üldjuhul loetakse kiudusid, mille pikkused jäävad vahemikku 5-15 mm, lõngaks ketramisel mitte sobivateks, sest need ei taga lõnga piisavat tugevust. Samas on oluline mainida, et õige tehnoloogia valikuga on tänapäeval edukalt võimalik valmistada lühikestest kiududest lõnga. [4][15][16][18][21]

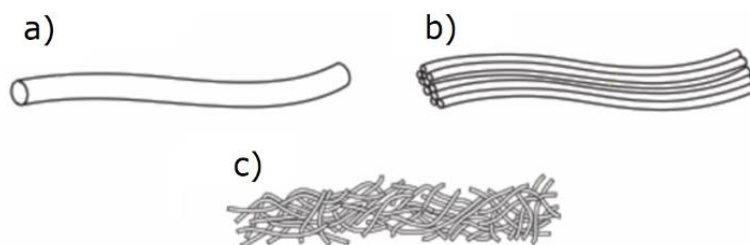
Teine oluline parameeter on kiu jämedus. Mida väiksem on kiu diameeter, seda peenem on kiud. Keemilisi kiude võib toota nii väikese kui ka suure läbimõõduga olenevalt ketrusdüüsi avade suurusest. Rõivaste valmistamisel kasutatavate tekstiilmaterjalide puhul kasutatakse üldjuhul peenemaid kiudusid, mis tagavad parema painduvuse ja pehmuse. Suurema jämedusega kiud võivad tekitada nahal torkiva tunde ja ka nendest valmistatud lõng on jäigem. Kiu jämedus mõjutab valmistatava lõnga jämedust, ühtlust, tugevust ja läiget. Peenemad kiud tagavad ühtlasema lõnga, suurema tugevuse ja läike, aga need on altimad moodustama lõnga ja kanga pinnale pillingut. Kiu diameeter mõjutab ka valmistatava kanga struktuuri, drapeeruvust, pinda, pehmust, hingavust ning ka kandja naha tunnetust. [4][5][6][11][15][16][19]

Kiudude mehaanilised omadused, nagu kiu tõmbetugevus, pikenemine, painduvus, elastsus ja hõõrdekindlus, on äärmiselt olulised. Kiu tõmbetugevus ja venivus mõjutavad nendest valmistatavate lõngade ja kangaste omadusi. Kiu tugevus sõltub ka kiu pikkusest ja jämedusest. Näiteks lühikesed staapelkiud on üldjuhul filamentidest nõrgemad. Kiu tugevusomadused mõjutavad valmistatava tekstiilmaterjali vastupidavust, venitamisest taastumist, drapeeruvust jm. Kiudude hõõrdekindlus on oluline, sest hõõrdumine hoiab kiude lõngas omavahel koos. Halva hõõrdekindlusega kiud kuluvad, nõrgenevad ning purunevad. Selle tulemusena nõrgeneb omakorda ka lõng ning tekivad kulumismärgid ja pilling. Hõõrdekindlus on seotud kiu pinnaga – sileda pinnaga kiud ei haaku omavahel. [4][5][11][15][16]

2.2 Niidid ja lõngad

Niit on saadus, mida iseloomustab märkimisväärselt suur pikkus ja suhteliselt väike läbimõõt. Niit võib olla valmistatud ühest või mitmest pidevast pikast filamendist või

paljudest lühikestest kiududest. Vastavalt sellele liigitatakse niite monofilamendiks, multifilamendiks ehk kompleksniidiks ja staapellõngaks (joonis 2.4). Antud lõputöös keskendutakse staapellõngale, mis saadakse lühikeste kiudude (staapelkiudude) omavahelisel kokkukeerutamisel. Lõngadest saab edasi moodustada erinevaid tekstiilmaterjale nende silmuskudumisel, kudumisel ja põimimisel. [4][12][16][22][23]



Joonis 2.4 Erinevad niidi tüübid: monofilament (a), kompleksniit (b), staapellõng (c) [4]

Oma struktuurilt jagunevad lõngad ühekordseteks, liht- ja liitkorrutatud lõngadeks (joonis 2.5). Ühekordne lõng on filamentide või staapelkiudude kokku keerutamisel saadud lõng. Lihtkorrutatud lõngad koosnevad vähemalt kahest omavahel kokku keerutatud ühekordsest lõngast. Lihtkorrutatud lõngu võib keerutada kahel erineval moel: kas sarnaselt ühekordse lõnga suunale või sellele vastupidises suunas. Tavaliselt on üksiku lõnga keerdumus vastupidine nende omavahelise kokku keerutamise suunale. See annab võimaluse anda lõngale visuaalset ja välist efekti. Lihtkorrutatud lõng jaguneb vastavalt ühekordsete kokku keerutatud lõngade arvule kahe-, kolme- ja mitmekordseks lõngaks. Lihtkorrutatud lõng on ühtlasem, vähem karvasem, stabiilsem ja tugevam kui samaväärne ühekordne lõng. Liitkorrutatud lõngad on saadud lihtkorrutatud lõngade omavahelisel kokku keerutamisel, kus keeru suund on üldjuhul vastupidine eelnevale keerule. Liitkorrutatud lõngad on väga heade tugevusomadustega. [4][12][22][24]



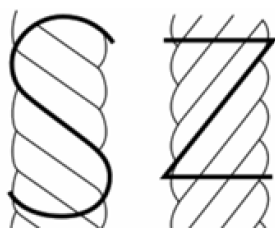
Joonis 2.5 Vasakult ühekordne, lihtkorrutatud ja liitkorrutatud lõng [12]

2.2.1 Lõngade omadused

Nagu juba eespool mainitud on kiudude ja lõngade omadused omavahelises sõltuvuses. Lõngade omadused sõltuvad algmaterjali ehk kiudude omadustest, mispuhul on oluline jälgida lõnga kiulist koostist. Kui erinevaid kiude on lõngas omavahel segatud, siis tuuakse välja iga komponendi sisaldus protsentides. [4][16]

Lõng peab olema ühtlase jämedusega ilma liialt peenete ja jämedate kohtadeta, mis avaldavad häirivat mõju kanga välimusele ja põhjustavad kangal defekte, nagu lõnga purunemine. Lõnga jämedust ei saa väljendada selle diameetriga, sest lõnga diameeter ei ole kogu lõnga ulatuses sama. Lõnga jämedus määrab kanga paksuse. Lõnga jämedus on oluline, et see sobiks selle edaspidise kasutusvaldkonna ja tootmistehnikaga, nagu näiteks silmuskudumine. [4][15][16][17][18][21]

Staapellõngadele on omane keerdumus, sest keerd hoiab kiude omavahel koos, säilitab lõnga terviklikkuse, tagab tugevuse ja väldib libisemist. Lõngu saab keerutada kahes suunas: päri- ja vastupäeva. Tavaliselt kirjeldatakse keeru suunda tähtedega S ja Z, kus vaadeldakse tähe keskosa kalduvuse järgi lõnga keerdumuse suunda (joonis 2.6). Keerdumuse tugevus mõjutab ka lõnga omadusi. Suurem keerdude arv meetri kohta annab tugeva lõnga, aga väiksema keerdude arvuga saab pehmemat lõnga. Eri jämedusega lõngadel on erinev keerdude arv. Näiteks peenemal lõngal suurem. Lõnga keerdumus ei ole tavaliselt kogu pikkuses ühtlane, vaid sõltub lõnga jämedusest. Silmukudumisel kasutatakse väiksema keerdude arvuga lõngu [11]. [4][6][12][15][16][21][25]



Joonis 2.6 Lõngade keerdumust tähistavad tähised [15]

Lõnga tugevus sõltub lõnga jämedusest ja keerdumusest. Üldiselt on lõng seda tugevam, mida jämedam ta on. Lõnga tugevus algselt suureneb koos keerdumuse kasvuga, sest sellega koos suureneb ka kiudude omavahelised hõõrdejõud. Ületades maksimaalse kriitilise keerdumuse hakkab lõnga tugevus vähenema. Lõnga tugevus on oluline vältimaks vähesest tugevusest tulenevat defektide teket ja purunemist nii tootmisel kui ka toote kasutamisel. [4][15][19][21][25]

Staapellõngadele on omane lõngast suuremal või vähemal määral välja ulatuvad kiu otsad. Sellist nähtust nimetatakse karvasuseks, mida iseloomustatakse lõnga põhistruktuurist välja ulatuvate kiudude hulga järgi. Lõnga karvasus varieerub nii välja ulatuvate kiudude arvu kui ka pikkuse poolest. Lõnga karvasus avaldab mõju kanga välimusele, tugevusele, õhu ja niiskuse läbilaskvusele, soojusomadustele ning see põhjustab pillingut. Samas on karvasus oluline pehmuse ja soojuse tunnetuse seisukohalt. Üleliigne lõnga karvasus muudab sellest edasise silmuskudumise, kudumise ja õmblemise keeruliseks, sest lõnga pinnalt lühikesed kiu otsad võivad koguneda

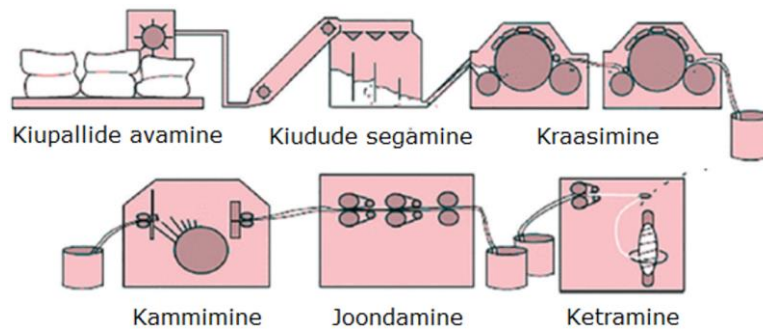
masinaosade vahele põhjustades lõpuks lõnga purunemise. [11][12][15][19]

2.2.2 Lõnga ketramine

Lõnga valmistamisprotsess (joonis 2.7) koosneb paljudest etappidest. Kui tootmisettevõttesse transporditakse kiud tihedalt pakituna kiupallide kujul, siis esmalt avatakse need lõdvemateks ja väiksemateks kiudude kimpudeks. Seda protsessi nimetatakse kiudude kobestamiseks, mis on eeltegevuseks kiudude puhastamisele ja segamisele. Kiud puhastatakse ropsimisega mittesoovitavatest lisanditest nagu lehed, mustus ja muud võõrkehad, millega lisaks prahi eemaldamisele aetakse kiumass kohevile. Tavaliselt tehakse need protsessid mehaaniliselt mitmete masinatega, mis teostavad nii avamis- kui ka puhastamisoperatsiooni samaaegselt. Samu või erinevaid tüüpi staapelkiude segatakse omavahel, et valmiva lõnga omadusi parandada ja valmistada kindlate omadustega lõnga. Oluline on tagada kiudude võimalikult ühtlane segunemine, mille tulemusena saadakse ühtlane kiumass. Tavaliselt teostatakse kiudude segamist suurtes mahutites, kuid ka järgmistes etappides toimub kiudude segunemine. [4][6][12][23][26][27]

Järgmiseks algab avatud ja puhastatud kiududest heide moodustamine. Heide valmistamine algab kiudude kraasimisest, mille käigus need eraldatakse individuaalseteks kiududeks ja moodustub kiudkangas. Kiudkangas on paks sirgejooneliselt või juhuslikult asetatud kiududega, mis on tavaliselt 100 kuni 500 korda paksem valmivast lõngast kui võrrelda nende omavahelise massi ja pikkuse ühiku suhet. Kraasist väljudes heidest moodustatud kiududest lint suunatakse tarusse, kust see edasi juhitakse kammimismasinasse. Kammimisega juhitakse kiudusid pikas lindis paralleelseks ning eemaldatakse kiudude hulka veel jäänud lühikesed kiud, kiupallid ja muu praht. Kammimisel liidetakse ka mitu kiudude linti omavahel kokku. Kammimine on oluline siledama, ühtlasema ja peenema lõnga saamiseks. [4][12][23][26][27]

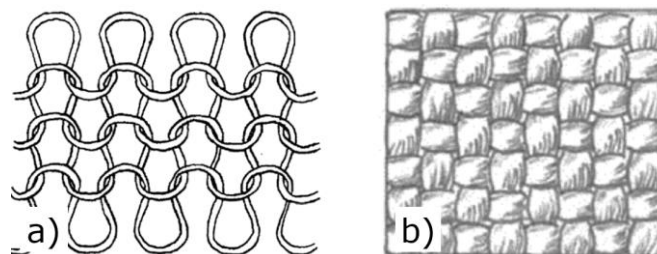
Eelviimane lõnga valmistamisetapp on joondamine, kus toimub lindi ühtlustamine ja mitme lindi omavaheline liitmine. Korruga juhitakse mitu kammitud linti läbi venitusrullide, mille käigus väheneb nende paksus, aga suureneb see-eest pikkus ehk toimub lintide pikaks venitamine. Saadakse ühtlase jämedusega lint, millele antakse nõrk keerd. Valminud on heide, mis on juba lõngasarnase välimusega. Viimasena kedratakse lõng ketrusmasinal, kus toimub heide lõplik väljavenitamine ja keeru andmine. Saadakse lühikestest kiududest lõputu lõng, kus kiud on keerutatud üksteise ümber sidusalt ning lõngale on antud keerdumus ja tugevus. Ketramisviise on erinevaid, aga lühikestest kiududest kedratud lõngad valmivad peamiselt ring- ja rootorketramisel. [4][12][18][23][26][27]



Joonis 2.7 Staapellõnga valmistamise etapid (puuvilla näitel) [6]

2.2.3 Lõngade kasutusvaldkonnad

Lõngadest saab valmistada trikotaaži ja riidet (joonis 2.8), aga peeneid lõngu on võimalik kasutada ka õmblusniidina. Trikotaaž on silmuskootud kangas, sest see koosneb lõngast või lõngadest moodustatud vastastikku ühendatud silmustest. Riie on vähemalt kahe lõnga põimumisel saadud ristatud struktuuriga tekstiilmaterjal. Peamised trikotaaži ja riide kasutusvaldkonnad on rõivad ja sisustustekstiilid, nagu sisustuskangad, vaip, kardinad, rätikud. Kanga kasutusvaldkonnad sõltuvad palju selle valmistamisel kasutatud lõnga jämedusest. Peenikese kuni keskmise jämedusega lõngadest valmistatakse eri rõivaid, kodutekstiile ja -riidet. Jämedaid lõngu kasutatakse sisustuskangaste, teksariide, frotee, vaiba tegemisel. [4][12][18][24][28]



Joonis 2.8 Trikotaaž (a) ja riie (b) [26]

Silmuskudumine on üks populaarseim tehnoloogia kangaste valmistamise viis. Silmuskootud kangastele ehk trikotaažile on iseloomulikud hea venivus ja venivusest taastuvus, pehmus, elastsus ja sellega kaasnev mugavus, hea istuvus, kortsumiskindlus, poorsus ja hingavus. Trikotaažist valmistatakse laialdaselt pluuse, naistepesu, kampsuneid, sokke, sõrmkindaid, kehakuju võtvaid alusrõivaid. Ka riide struktuuriga kangastest toodetakse rõivaid nagu näiteks ülerõivad (jakk, mantel, ülikond), kostüümikangad, sall, püksid. Lisaks on vaibad, kardinad, voodipesu ja voodrimaterjalid riide struktuuriga tekstiilid. Riidet iseloomustavad järgmised omadused: mõõtmete stabiilsus, tugevus, jäikus, vastupidavus, väiksem drapeeruvus, poorsus ja õhu läbilaskvus, painduvus. [4][6][11][22][24][29]

3. TEKSTIILIJÄÄTMED JA NENDE ÜMBERTÖÖTLEMINE

Tekstiilijäätmeid võib defineerida kui materjale, mida ei kasutata pärast nende põhikasutuse lõppu ja/või mille on selle omanik arvanud kasutuskõlbmatuks selle algupärase otstarbe jaoks. Tekstiilijäätmeid jaotatakse peamiselt kahte gruppi: tootmisel tekkinud ehk tootmisjärgsed tekstiilijäätmed ning tarbimisel tekkinud ehk tarbijajärgsed tekstiilijäätmed. Tootmisel tekkinud tekstiilijäätmed on jäätmed, mis ei jõua tarbijani, vaid tekivad otse tootjalt tootmise käigus. Need on kanga-, kiu-, lõnga-, niidijäägid, mis jäävad üle toormaterjalist, kraasimisest, juurdelõikus-, õmblemis-, ketramis- ja teistest tootmisprotsessidest kui ka valmis toodetest. Tekstiilijäätmeid tekib erinevates tootmistes: kiu-, tekstiili- ja rõivatööstuses, kaubandus- ja teenindustööstuses. Tarbijajärgsete tekstiilijäätmete hulka kuuluvad rõivad ning erinevad tekstiilitooted, mida tarbija enam ei vaja ega taha, kuna need ei ole enam moes ega meeldivad või tooted/rõivad on kulunud. Tarbijajärgsed tekstiilijäätmed visatakse ära pärast nende kasutuse lõppu. [1][30][31][32][33][34]

3.1 Ringmajandusmudel

Ringmajanduse mudeli eesmärk on luua ringne tootmis- ja tarbimissüsteem ning vähendada tootmises ja tarbimises tekkivaid jäätmeid. Ringmajandusmudel on tõhusam alternatiiv tänapäeval tekstiilitööstuses laialdaselt kasutatud leidvale traditsioonilisele lineaarsele mudelile, mille põhimõte on tooda, tarbi ning viska minema. Selline süsteem vajab muutust (joonis 3.1), sest see ei ole jätkusuutlik ja põhjustab suurtes kogustes nii tekstiilijäätmeid kui ka saastet. Õnneks töötatakse järjest enam selle kallal, et liikuda ringsema majandusmudeli rakendamise suunas, mille kolm printsiipi on: minimeerida jäätmeid ja saastet, hoida tooteid ja materjale kasutuses ning taastada loodussüsteeme [35]. Lineaarse mudeli tagajärjel on tekstiilitööstusest saanud üks suurimaid saasteallikaid maailmas. [36][37][38][39]

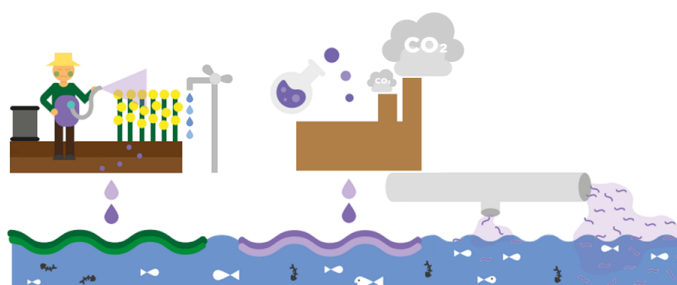


Joonis 3.1 Lineaarse mudeli põhimõtte skeem [38]

Maailma rahvaarvu kiire kasv, üldine elustandardite ja elatustaseme paranemine ning moetrendide kiire muutumine on suurendanud aastatega ühtlaselt üleilmset tekstiilmaterjalide ning kiudude tarbimist. See tähendab ka üldist tekstiilitoodangu kasvu, mis toob kaasa suurema hulga jäätmete tekke. Tänapäeval levinud kiirmood on üks tekstiilijäätmete teket soodustav tegur, mis on toonud endaga kaasa suurema rõivaste tootmise ja vähenenud rõivaste kandmisaja. Viimase 15 aastaga on keskmine

rõivaste kandmise kordade arv vähenenud 36%. Populaarne lühikest perioodi rõivaste kandmine on ka põhjus, mistõttu rõivad omandavad kiiresti tekstiilijäätmete staatuse. 2017. aasta andmetel visatakse aastas ära hinnanguliselt 48 miljonit tonni rõivaid, millest hinnanguliselt kõigest 25% kogutakse korduskasutuseks või ümbertöötlemiseks. Kokku kogutud rõivastest ja tekstiilidest töödeldakse ümber vaid 1%. Ülejäänud 75% ladestatakse prügilas või saadetakse põletamisele. Need protsendid näitavad, et praegusel ajal rakendatakse rohkem lineaarset mudelit, kus tekstiilijäätmed satuvad prügimäele või põletusahju. [1][9][13][32][33][35][39][40][41]

Lineaarse mudeli rakendamine tekstiilitööstuses toob kaasa suures mahus tarbimise, õhu-, maa- ja veesaaste, ohtlike kemikaalide kasutuse (joonis 3.2). Tooraine saamine tekstiilide tootmiseks on palju nõudev. Näiteks puuvilla kasvatamine vajab vett ja maad ning polüestri tootmine naftat. Tekstiilide tootmises nõuavad erinevad protsessid, nagu värvimine, töötlemine ja viimistlemine, suurel hulgal vett, energiat ja kemikaalide kasutust. Tekstiilitööstuses reostunud vesi, mis moodustab kogu veereostusest 20%, satub hiljem keskkonda. Tootmisel eraldub õhku süsihappegaasi, mida hinnanguliselt tekib ühe tonni toodetud tekstiilide kohta 15-35 tonni. Tootmisjärgselt kasutuses olevate tekstiilide pesemisel eraldub kemikaale keskkonda ning plastidel põhinevate tekstiilide puhul uhutakse ookeanitesse mikroplaste hinnanguliselt aastas pool miljonit tonni. Tekstiilijäätmete loodusesse sattumisel võivad looduslikust allikast tekstiilid olla küll biolagunevad, aga nende lagunemiseks kulub sadu aastaid. Sünteetilised kiud aga ei lagunegi, sest nende peamine tooraine tootmisel on nafta, mis on taastumatu ressurss. Ladestatuna prügilasse emiteerivad lagunevad tekstiilid anaeroobsetes tingimustes õhku süsihappegaasi ja metaani, mis on kasvuhoonegaasid ja avaldavad mõju kliima soojenemisele. Ka tekstiilide põletamisel eraldub õhku CO₂-te. Materjalide hoidmise ja liiklemisega mööda ringmajanduse mudelit on võimalik vähendada vee, energia, värvainete, kemikaalide, toormaterjali ja taastumatute ressursside kasutust ning süsihappegaasi emissioonide hulka [10]. [1][13][32][33][35][42][43][44][45]

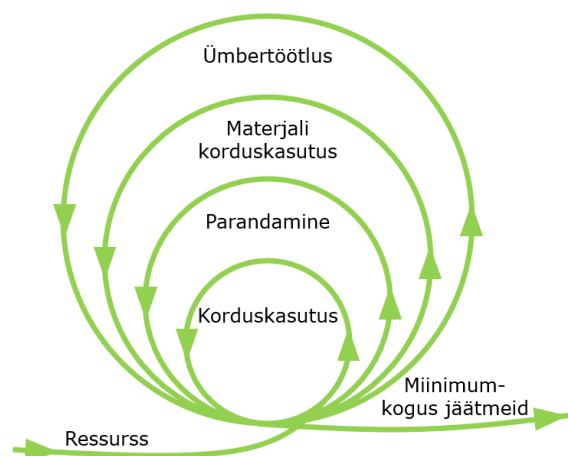


Joonis 3.2 Tekstiilitööstuse mõju keskkonnale [35]

Kui lineaarse süsteemi etappides rakendatakse vähesel määral või üldsegi mitte korduskasutust ja tekstiilide ümbertöötlemist, siis ringmajanduses nähakse, et tekkinud tekstiilijäätmete hülgamine tähendab mitte ainult jäätmete teket, aga ka väärtuslike

ressursside raisku laskmist. Ringmajandusmudel seisneb olemasolevate materjalide ringluses hoidmises nii kaua kui võimalik ja vajadusel väheses koguses uue sisendi kasutust taastuvate ressursside näol. Materjalid ringlevad mööda erinevaid suletud ringe, mis tagab selle, et kõik materjalid tulevad tagasi ja sisenevad järgmisesse ringi nn „toiduna“. Selline viis tagab materjalidele pikaajalise väärtuse, ressursside tõhusa kasutuse kõigis materjaliringluse etappides ning aitab kaasa tekstiilijäätmete ja keskkonnasaaste vähenemisele. Ringmajandusmudeli (joonis 3.3) etapid on järgmised: toote korduskasutus, toote parandamine, materjali korduskasutus, materjalide ringlussevõtt [35][46]. [38][39][40][41]

Ringmajandusmudelis on tähtsal kohal rõiva kandmine selle originaalkujul ja otstarbel nii kaua kui võimalik, mida väljendavad ka mudeli kaks esimest etappi. Korduskasutuse etapi eesmärgiks on likvideerida rõivaste vähete kandmiskordade probleemi. Rõivast saab korduvalt kasutada nii üks kui ka mitu inimest – jagamine üksteisega, andmine teistele inimestele või viimine kasutatud rõivaste poodi. Nende meetmete rakendamisel välditakse rõivaste ära viskamist, mida on võimalik veel kanda. Järgmine etapp on toote parandamine ja seeläbi rõiva elutsükli pikendamine. Katki läinud rõivaste parandamisega, nagu näiteks hargnenud õmbluse ja eest tulnud nõöbi korda tegemisega, saavad hakkama rõiva kasutajad. Kui rõivast ei ole enam võimalik kanda tootena, siis siseneb see kolmandasse etappi. Materjali korduskasutamine seisneb tekstiilide kasutamises materjalina ehk teisel eesmärgil selle algsest otstarbest. Materjali lõikamise, õmblemise, värvimise ja kujundamisega saab luua uue toote. Kui materjali ei ole enam võimalik kasutada selle halva kvaliteedi tõttu, siis jõuab see viimasesse etappi, milleks on ümbertöötlemine. Selles etapis viiakse toode tagasi algsele kujule ja ümbertöödeldakse uueks materjaliks või tooteks. Ümbertöötlemisega välditakse tekstiilijäätmete teket ja tagatakse uus sisend tootmiseks. Antud lõputöös keskendutaksegi ringmajanduse mudeli viimasele etapile ja sellele, kuidas on võimalik tekstiilijäätmeid ümber töödelda lõngaks. [35][41][46][47]



Joonis 3.3 Ringmajandusmudeli põhimõtte skeem [35][39][41][47]

Toodete pidevas ringluses hoidmisega ringmajandusmudelil antakse neile lisaväärtust. Peamine probleemikoht on tekstiilmaterjalid, mis ei ole valmistatud nii, et neid saaks ringmajandusmudeli järgi töödelda, sest ümbertöötlus toob üldjuhul kaasa väärtuse vähenemise. Pikas perspektiivis ei ole väärtust kahandav ümbertöötlus edukas, mistõttu on vaja pöörata tähelepanu ka toodete esmakordsele valmistusele. Toota on vaja vastupidavat ja kõrgkvaliteediga rõivaid, mida on võimalik korduvalt kanda, parandada, ümber töödelda. Mõeldakse on vaja materjalide valikule ja disainile, sest need avaldavad mõju keskkonnale ja määravad elutsükli lõpul edasised valikud. Ringmajandusmudeli edukaks toimimiseks on esmalt vaja tooted disainida nii, et nad hakkaksid ringi jooksma läbi tsükli ja seeläbi hoida tooteid ning materjale kasutuses. [35][39][40][41][46]

3.2 Tekstiilijätmete ümbertöötlemismeetodid

Tekstiilmaterjalide ümbertöötlemise käigus saadakse vanadest rõivastest ja tekstiilmaterjalidest uuesti kiud, mis on sobilikud näiteks lõngade, kangaste, lausmaterjalide valmistamiseks ja täitematerjalide kasutamiseks [44]. Tekstiilmaterjale saab ümber töödelda kiududest-kiuks meetodil (ingl k *fiber-to-fiber*) nii mehaaniliselt kui ka keemiliselt [7][10]. [48][49]

Mehaaniline ümbertöötlemine seisneb tekstiilijätmete mehaanilises purustamises kiuks. See meetod sobib igat tüüpi kiudude, lõngade ja kangajääkidele. Tavapäraselt kasutataksegi just seda ümbertöötlemisviisi ümbertöödeldud lõngade valmistamiseks. Antud meetodit iseloomustab kiu tugevuse vähenemine ja seetõttu ka halvema kvaliteediga kiudude saamine. Mehaaniliselt on võimalik ümber töödelda nii looduslikke kui ka sünteetilisi kangaid ja nende segusid [48]. Kuigi kiust-kiuks mehaaniline ümbertöötlus ei ole tänapäeval enam nii tavaline polüester kangaste puhul [50], siis puuvilla ja villa puhul on see enim kasutatav ümbertöötlemisviis. Mehaaniliselt ei ole aga võimalik ümbertöödelda materjale lõputu arv kordi. Puuvillakiud purunevad protsessi käigus ja iga ümbertöötamise korraga kvaliteet väheneb. Polüestrikiude on võimalik mehaaniliselt ümber töödelda mõni üksik kord enne kui selle molekulaarne struktuur laguneb, mistõttu lõnga kedrata ei ole võimalik. [7][10][35][42]

On olemas veel teine mehaaniline ümbertöötlusviis, mida kutsutakse ka termomehaaniliseks ümbertöötlemiseks. Nagu nimest saab järeldada, siis selle meetodi puhul kasutatakse kuumust. Antud töötlemisviis on rakendatav sünteetilistele tekstiilidele (termoplastsed polümeerid) ja sobib sealhulgas ka polüestrile [13]. Termomehaaniline ümbertöötlemine on populaarsem polüestri ümbertöötlemisel pudelist-kiuks meetodil, aga seda saab rakendada ka kiust-kiuks meetodi korral [50]. Tänapäeval on antud

tehnoloogiat tekstiilide ümbertöötlemisel kiuks keerukas kasutada, sest sulatada ei ole võimalik kiudude segusid. [33][44][48][51][52][53]

Keemiline ümbertöötlusviis on veel tehnoloogiliselt arendamisel, mistõttu ei ole see laialt levinud. Antud meetodi puhul toimuvad tekstiilijäätmetest tooraine kätte saamiseks keemilise töötlemisega muudatused molekulaarsel tasemel. See seisneb materjali depolümeerisatsioonil ehk monomeeri kujule viimises ja siis polümeerisatsiooni kaudu uuesti polümeeriks muutmises. Keemilise ümbertöötamise eeliseks on väärtuslikuma tooraine saamine, sest võimalik on tagada algse kvaliteediga kiud. Meetodi puudus on selle kulukus. Polüestrit saab ümbertöödelda mitmeid kordi, seejuures kiu kvaliteeti mitte kaotades. Puuvillakiude saab kasutada lähteainena viskoosi ja lyocelli tootmiseks, sest puuvillal on kõrge tselluloosisisaldus. Villa ei ole hetkel võimalik keemiliselt ümber töödelda. [7][10][13][35][42]

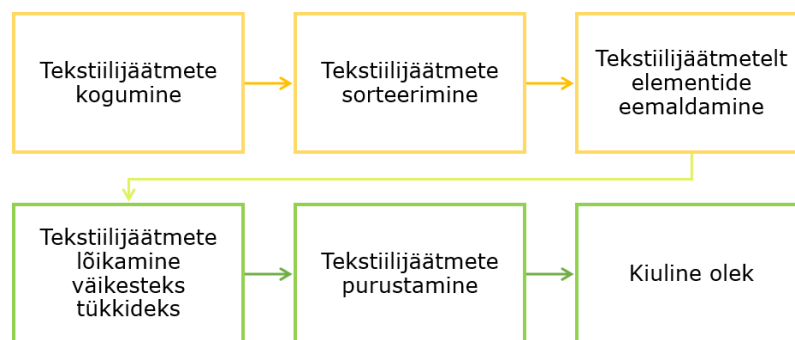
Tekstiilijäätmete ümbertöötlemise muudab komplekseks ja kulukamaks nende koostis. Täpsemalt asjaolu, et sageli esinevad tekstiilkiud materjalides seguna. Selleks, et toota kõrgema kvaliteediga ümbertöödeldud kiudu, on vajalik kahe kiu omavaheline eraldamine. Seda on võimalik teha ainult keemiliselt ja materjalidele, mille kiuline koostis sisaldab kiudusid suuremas osakaalus. Väga väikese protsendilise sisaldusega tekstiilkiudude puhul tekstiilmaterjalil ei ole kindlust, et nad ümbertöötlemisel säilitatakse. Kiudude segudest eraldamise puuduseks on see, et antud tehnoloogia on välja töötatud vaid teatud materjalide segudele, nagu polüester-, puuvilla- ja tselluloosipõhiste kiudude jaoks. Kiude on võimalik teineteisest lahutada ühe komponendi lahustamise või omaduste niiõelda halvendamise (degradatsiooni) teel ja teise komponendi säilitamisel. Hetkel on populaarseim meetod polüpuuvilla segude keemilisel ümbertöötlemisel ühe kiu säilitamine tahkes olekus ja teise kiu viimine vedelasse olekusse. Puuvill lahustatakse ja saadakse tselluloosilahus, millest filtreeritakse välja polüester. Lahust saab kasutada uute kiudude, nagu viskoosi ja lyocelli, tootmiseks. Segusid on võimalik ümber töödelda ka mehaaniliselt, aga saadava tekstiilmaterjali koostise määramine on sellisel juhul raskendatud. [7][10][13][35][42]

3.3 Mehaaniline tekstiilijäätmete ümbertöötlemise protsess

Tekstiilijäätmete ümbertöötlus (joonis 3.4) algab nende ettevalmistusega. Selleks, et üldse tekstiilijäätmeid ümber töödelda saaks, on vaja need koguda. Tänapäeval on tarbijatele mõeldud kogumisvõrgustikud üldjuhul hästi välja töötatud. Probleemaatiline ja oluline koht seisneb selles, et kasutajad peavad ise määratlema rõivaste staatuse ehk

kas rõivaid on võimalik veel kanda või mitte, sest ringmajandusmudeli kohaselt on oluline hoida hea kvaliteediga ja veel kasutada saadavad rõivaid taaskasutusringis. Peale kokku kogunemist toimub tekstiiljäätmete sorteerimine materjali tüübi (kiuline koostis) ja värvi järgi, et värvimine ei oleks ümbertöötlemisel vajalik. Sorteerida saab käsitsi, aga ka mehaaniliste süsteemide abil nagu konveierilindid ja kastid. Oluline on erinevad materjali tüübid kindlaks teha. Veel on tarvilik tekstiiljäätmete lammutamine komponentideks, mille eesmärgiks on eemaldada mittetekstiilsed elemendid, nagu tõmblukud, nõöbid, kinnitused, etiketid. Vajadusel eraldatakse kangastelt ka tekstiilsed elemendid nagu niidid ja vaheriided. [35][44][47][48][51]

Pärast eelnevalt nimetatud tegevuste teostust on tekstiilid valmis mehaaniliseks purustamiseks. Sorteeritud tekstiilid ja kangad lõigatakse esmalt väiksemateks tükkideks, misjärel hakatakse neid kiudude eraldamiseks purustama. Purustusprotsessi teostavad vastavad masinad, mis tõmbavad järjekindlalt tekstiilitükke, kuni need on kiulises olekus. Sellisel viisil saadakse ümbertöödeldud tekstiilkiud, millest omakorda saab kedrata lõnga. [44][48][50][51]



Joonis 3.4 Tekstiiljäätmete ümbertöötlemine kiust-kiuks meetodil [35][49][50][51]

Termomehaanilisel ümbertöötlemisel järgneb sarnaselt mehaanilisele ümbertöötlusele pärast PES (lühendatuna polüester) pudelite või tekstiiljäätmete ettevalmistust nende purustamine. Seejärel purustatud tekstiiljäätmeltd kuumutatakse ja vormitakse pelletiteks. Pelletid viiakse ekstruuderisse ja surutakse läbi ketrusdüüsi kiududeks. [33][44][48][51][52][53]

3.4 Mehaaniliselt ümbertöödeldud kiudude omadused

Uutel ja ümbertöödeldud kiududel on erinevad omadused. Lõngaks ketramisel on oluliseim parameeter kiu pikkus, aga mehaaniline purustamine lõhub kiudu, mistõttu selle pikkus, kvaliteet ja tugevus väheneb. Suurema osa ümbertöödeldud kiududest moodustavad lühema pikkusega kiud, mis viitab kehvemale kvaliteedile. Kiud on nõrgemad ning madalama hinnaga. Iga järgmine ümbertöötlus vähendab kiudude

kvaliteeti. Kiudude omaduste parandamiseks segatakse ümbertöödeldud kiud uute kiududega, ka lõngaks ketramisel. See tähendab, et ringlusesse võtmine eeldab mingil määral ka uue tooraine kasutamist ja valmiv materjal ei ole täielikult taaskasutatud kiududest. Kuid samas on ka täheldatud, et ümbertöödeldud kiudu saab segada uutega ilma märgatavate muutusteta valmistatava lõnga kvaliteedis [54]. Näiteks Uyanik, S. läbi viidud uuringust toodi ümbertöödeldud polüester- ja uute puuvillakiudude segudega lõngad välja [55]. [16][20][33][48][49][56]

Mehaanilisele ümbertöötlemisele on omane kiududel esinev lai pikkuste varieeruvus. Eri kiudude pikkuste tõttu on taaskasutatud kiudude kvaliteeti ja teisi karakteristikuid selgelt raske määrata. Mõju avaldab nii nende algne töötlemine kui ka ümbertöötlemisprotsess ise. Ümbertöödeldud kiudude hulka võib jääda purustamata kangast, niiditükke või muid võõrlisandeid. Kuna tekstiile valmistatakse enamasti seguna, siis saadakse ka kiude seguna. Ümbertöötlemise käigus on erineva koostisega kiude üksteisest raske eraldada ning keeruline on määrata nendes sisalduvate kiudude päritolu. See on võimalik vaid erinevate analüütiliste meetoditega. Olulised parameetrid, mida jälgitakse tekstiilijäätmete ümbertöötlemisel, on materjali purustusaste, kiudude pikkus ja kiudude pikkuste jaotuvus. [20][48]

Kiudude omadused on mõjutatud kasutatavatest tekstiilijäätmetest. Tootmisjärgsed tekstiilijäätmed on kvaliteetsemad ning nendest on võimalik toota seetõttu parema kvaliteediga kiude, sest kuigi ümbertöötlemisel kiudude pikkus lüheneb saadakse staapelkiud väiksemas pikkuse jaotuvuses. Parimad tulemused saadakse sama värvi ja kiu tüübiga tootmisjärgsetest kangastest. Tarbijajärgsete tekstiilijäätmete, mille kiulise koostise hulka kuulub mitmeid kiu tüüpe, ümbertöötlemisel saadavad kiud on lühema pikkusega. [20][48][53]

Ümbertöötlemisel võib osutada ka probleemseks kiudude värvuse madal kvaliteet. Üldjuhul on ümbertöödeldud kiududest saadud lõnga tavapärane värvus hallikas või must, mida ei ole soovitatav kasutada rõivaste valmistamisel ja seetõttu ka sageli selleks ei kasutata. Tehniliste lõngade puhul on värv teisejärguline. [20][48]

Paljuski sõltuvad ümbertöödeldud kiudude kasutusvaldkonnad nende kvaliteedist. Tüüpilised kasutusvaldkonnad mehaaniliselt ümbertöödeldud kiududele on täite- ja lausmaterjalid, sest nende puhul ei ole kiudude tugevus, kvaliteet ja kiuline koostis kriitilise tähtsusega. Täite- ja lausmaterjalidest valmistatakse mööblit, madratseid ja isolatsioonimaterjale. 95% ümbertöödeldud kiududest kasutatakse lausmaterjalide valmistamiseks, kuigi neist saab ka lõnga kedrata [50]. Selleks on vaja valida õige tootmistehnoloogia ja segada ümbertöödeldud kiudude hulka uusi kiude. [33][47][48]

3.5 Ümbertöödeldud kiududest valmistatud lõngad

Lõngaks ketramisel kasutatava kiu pikkus määrab ära valmiva lõnga tugevuse – kiu pikkuse suurenemisel suureneb ka lõnga tugevus [57]. Polüesterkiudusid on võimalik toota suure kiu pikkusega ja need on tugevamad kui puuvillakiud. Villakiud omavad puuvillakiududest suuremat kiu pikkust, aga madalamat sitkus [60]. Uyanik, S. tõi oma uuringus välja, et uutest kiududest kedratud lõngadel on suurem tugevus samast ümbertöödeldud kiu liigist kedratud lõngadest [55]. Uute polüesterkiudude suurem kiu pikkus ja tugevus tagab nende kasutamise ümbertöödeldud kiududega lõngaks ketramisel. Pikemad ja tugevamad polüesterkiud hoiavad ümbertöödeldud lühikese pikkusega kiude koos, mis omakorda tagab tugevama lõnga. Lõnga kvaliteet paraneb lisatavate uute kiudude protsendi kasvamisel. Samas on oluline hoida lisatavate uute kiudude kogus võimalikult madalana, sest suur uute kiudude hulk tõstab hinda ja vähendab tekstiilijäätmete tarbimist. Järgnevalt on välja toodud uuringutest tähelepanekud, kuidas polüester-, puuvilla- ja villakiud ning nende segud ja päritolu avaldab mõju lõngade omadustele. [56]

Yuksekkaya, M. E. *et al.* ja Telli, A. *et al.* poolt ellu viidud uuringutes on välja toodud, et uutest ja ümbertöödeldud polüesterkiududest kedratud lõng on suurema tugevusega uutest ja ümbertöödeldud puuvillakiududest lõngast [54][57]. Yuksekkaya, M. E. *et al.* koostatud uuringus, mis on keskendunud puuvilla- ja polüesterkiududele, on veel öeldud, et sama liiki uute ja ümbertöödeldud kiudude segust lõngad, mille protsendiline osakaal on 50-50, omab samaväärset lõnga tugevust sama kiu ümbertöödeldud kiududest kedratud lõngaga [57].

Sarioglu, E. on leidnud enda uuringust, et uute puuvillakiudude hulka uute ja ümbertöödeldud polüesterkiudude segamine parandab lõnga sitkust. Sama uuringu tulemustest on näha, et uued polüesterkiud teevad seda suuremal määral, aga ümbertöödeldud polüesterkiud tõstavad tugevust natukene, kusjuures 30% ja 70% ümbertöödeldud polüesterkiudude sisaldus tagab samal tasemel lõnga tugevuse. Tähelepanuväärne on asjaolu, et kui uute puuvillakiudude hulka segada 50% ümbertöödeldud polüesterkiude, siis tugevus ei parane. Sama kinnitab ka Yuksekkaya, M. E. *et al.* kirjutatud uuring, kus isegi on täheldatud lõnga tugevuse vähenemist. Yuksekkaya, M. E. *et al.* teostatud uuring toob veel välja, et ümbertöödeldud puuvillakiudude hulka 50% uute polüesterkiudude lisamine parandab lõnga tugevust, aga samasuguse osakaaluga ümbertöödeldud polüesterkiudude sisaldus tagab samaväärse tulemuse sajaprotsendilise ümbertöödeldud puuvillakiududest lõngaga. Samas Telli, A. *et al.* koostatud uuringust nähtub, et ümbertöödeldud puuvillakiudude hulka ümbertöödeldud polüesterkiudude lisamine parandab selle osakaalu suuremisega

samm-sammult lõnga tugevust. Sama uuringu tulemused näitavad veel, et uute puuvillakiudude hulka ümbertöödeldud puuvillakiudude lisamine vähendab lõnga tugevust. [54][57][61]

Ümbertöödeldud villakiudude hulka on vaja segada maksimaalselt 30% uusi kiude, milleks võivad olla nii villa-, puuvilla- kui ka polüesterkiud [10][62]. Samanta, A. K. on oma uuringus ütelnud, et sajaprotsendiliselt villakiududest koosnev lõng omab madalamat tugevust võrreldes villakiududest valmistatud lõngadega, mille hulka on lisatud uusi või ümbertöödeldud polüesterkiude. See tähendab, et villakiudude hulka uute ja ümbertöödeldud polüesterkiudude segamine parandab lõnga tugevust, mida kinnitab ka Helal, A. *et al.* poolt läbi viidud uuring. Veel on Samanta, A. K. oma uuringus välja toonud, et soovituslikult võiks villakiududele lisada ümbertöödeldud polüesterkiude 30% ja uusi polüesterkiude 25% tugevuse parandamiseks. Meena, H. *et al.* leidsid teostatud uuringus, et lõngadel, mille kiuline koostis on puuvill ja viil, suureneb lõnga tugevus puuvilla osakaalu suurenemisel [60]. [58][59][63]

Sarioglu, E., Uyanik, S. ning Yuksekkaya, M. E. *et al.* läbi viidud uuringutest selgub, et lõnga pikenemine purunemisel on kõige kõrgem uutel ja ümbertöödeldud polüesterkiududel, kusjuures ümbertöödeldud polüesterkiud omavad kõrgemat pikenemist. Yuksekkaya, M. E. *et al.* tehtud uuringu tulemused näitavad, et uute ja ümbertöödeldud polüesterkiudude omavaheline segu omab teistest puuvilla- ja polüesterkiudude segudest kõrgemaid pikenemisväärtusi. Yuksekkaya, M. E. *et al.* ja Telli, A. *et al.* uuringutes on välja toodud, et uutel ja ümbertöödeldud puuvillakiududel ning nende omavahelisel segul suuri erinevusi pikenemisväärtustes ei ole. Sarioglu, E. ja Telli, A. *et al.* koostatud uuringud näitavad, et uute ja ümbertöödeldud puuvillakiudude pikenemine kasvab nii uute kui ka ümbertöödeldud polüesterkiudude lisamisel samaväärselt. Sangannavar, V. *et al.* ja Helal, A. *et al.* kirjutatud uuringutest ilmneb, et villakiududele uute ja ümbertöödeldud polüesterkiudude lisamine parandab lõnga pikenemist purunemisel protsendisalduse kasvades. Kui Helal, A. *et al.* ellu viidud uuringu järgi oleks parim uute polüesterkiudude sisaldus 15-35% villakiudude hulgas, siis Sangannavar, V. *et al.* teostatud uuringu kohaselt on 30% ümbertöödeldud polüesterkiudusid parem lisada villakiududele. Meena, H. *et al.* koostatud uuring väidab, et lõngadel, mille kiuline koostis on puuvill ja vill, suurendab lõnga pikenemist suurem puuvilla osakaal, sest kuigi villakiu pikenemine on puuvillast parem, siis villakiu suurenemisega väheneb lõnga üldine tugevus [60]. [54][55][57] [59][61][63]

Telli, A. *et al.* ja Bechir, W. *et al.* teostatud uuringutest selgub, et ümbertöödeldud puuvillakiududest kedratud lõngadel on suurem ebaühtlus uutest puuvillakiududest valmistatud lõngadest [64], aga samas Yuksekkaya, M. E. *et al.* läbi viidud uuringu katsetulemustest on näha vastupidist. Telli, A. *et al.* ja Yuksekkaya, M. E. *et al.*

koostatud uuringute tulemustest on märgata, et ümbertöödeldud polüesterkiududest lõngad omavad puuvillakiududest valmistatud lõngadest madalamat ühtlust ning ümbertöödeldud puuvillakiudude lisamine suurendab lõnga ebaühtlust. Yuksekkaya, M. E. *et al.* toovad uuringus välja, et uutest polüesterkiududest kedratud lõngad omavad ümbertöödeldud polüesterkiududest lõngadest suuremat ebaühtlust, aga Uyanik, S. väidab oma uuringus vastupidist. Samanta, A. K. toob oma uuringus välja, et villa ja polüestri sisaldusega lõngadel suureneb lõngade ebaühtlus polüesterkiudude lisamisel [58]. Meena, H. *et al.* kirjutatud uuringust selgub, et lõngadel, mille kiuline koostis on puuvill ja vill, suurendab ebaühtlusomadusi villakiudude suurem protseniline osakaal [60]. [54][55][57]

Demiroz Gun, A. *et al.* teostatud uuringus kirjutati, et uute polüesterkiudude sisaldus ümbertöödeldud puuvillakiududega segamisel peab olema väiksem kui 50% lõnga omaduste kvaliteedi parandamiseks. Optimaalne vahemik on 10-25%, mis muudab vahesel määral lõnga kvaliteedi omadusi paremaks ja võimaldab toota lõngu selles vahemikus ilma märgatavate kvaliteedi erinevusteta. Bechir, W. *et al.* läbi viidud uuringus järeldati, et ümbertöödeldud puuvillakiudusid ei tohi lisada uute puuvillakiudude hulka lõnga ketramisel rohkem kui 30% - optimaalne on lisada 25%. Lisaks selgus Demiroz Gun, A. *et al.* koostatud uuringust, et lõnga jämedus on oluline faktor määramaks ümbertöödeldud ja uute kiudude suhet lõngaks ketramisel. Nimelt jämeduse kasvuga võib ümbertöödeldud kiudude hulka tasapisi suurendada. Samuti ilmnas uuringu katsetulemustest, et lõnga jämeduse suurenemisega paraneb ümbertöödeldud kiududest kedratud lõnga ebaühtlus ja tõmbetugevus, aga suureneb see-eest lõnga karvasus. Veel tuli välja, et suurema lõnga keerduusega ebaühtlus suureneb. [56][64]

4. TEKSTIILMATERJALIDE KATSETAMINE

Katsetamine on väga oluline osa tekstiilmaterjali kvaliteedi kontrollimisel, mille käigus uuritakse nii toormaterjali kui valmis toodangu kvaliteeti ja omadusi ning nende vastavust nõuetele. Katseid saab läbi viia tekstiilidele eri staadiumis: kiu, lõnga, kanga ja rõiva kujul. Tekstiilmaterjalide katsetamine teostatakse standardite järgi, kus on määratletud testimise tingimused (labori temperatuur ja õhuniiskus, kasutatavad seadmed, proovide võtmine, katse sooritamine, tulemuste esitamine). Standardite jälgimine on oluline, sest nii on võimalik võrrelda usaldusväärselt erinevaid katsete tulemusi. Katsemeetoditele on ühised normid kehtestanud organisatsioonid pika uurimistöo tulemusel. Mõned rahvusvahelised standardid on ISO (ingl k *International Organization for Standardization*) ja ASTM (ingl k *American Society for Testing and Materials*), mida jälgiti antud lõputöös katsetamisel. [6][19][28]

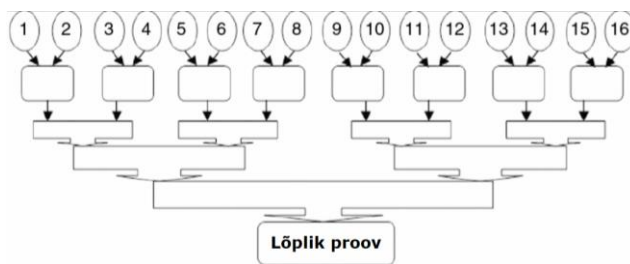
4.1 Tekstiilmaterjalide ettevalmistus

Katsetamisel peab jälgima sobivaid ruumi tingimusi, mis on määratud katsete läbi viimiseks standarditega. See on oluline tekstiilide seisukohalt, mis muudavad oma massi ja omadusi vett ning niiskust imades. Seetõttu tuleb testitavad tekstiilmaterjalid eelnevalt konditsioneerida, mis tähendab, et labori temperatuur ja õhuniiskus hoitakse kindlal tasemel ja tekstiilmaterjalid jäetakse laborisse lahtiselt 12 kuni 24 tunniks seisma, võimaldades õhul vabalt läbi tekstiilide liikuda. Standardi EVS-EN ISO 139:2005 (Tekstiil. Standardkeskkond konditsioneerimiseks ja testimiseks) kohaselt on sobiv standardkeskkond testimiseks temperatuuri $20,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ °C}$ ja suhteline õhuniiskuse $65,0\% \pm 4,0\%$ juures. [6][19][28][65]

Enne katsetuste teostamise alustamist on oluline jälgida katsekehade võtmise reegleid uuritavatest tekstiilmaterjalidest, sest ei ole võimalik testida läbi kõiki materjale ja tooteid nii ajalises kui ka mõistlikkuse mõttes – katsetamine on aeganõudev ja kulukas ning enamikel juhtudel muutub katsetatud materjal hiljem jäätmeks. Testimiseks võetavate katsekehade kogus moodustab väikese murdosa kogu uuritavast materjalist, mistõttu peab katsekeha olema esinduslik ja võetud juhuslikkuse alusel (tekstiilmaterjali erinevatest osadest). Vältida tuleks katsekehade võtmist kortsunud või muud viisi vigastatud tekstiilmaterjali osast. [6][19][25][28]

Staapelkiududest katsekehade valimisel jälgitakse niinimetatud tsoonideks eraldamise meetodit (joonis 4.1). Kiudude massi erinevatest osadest ehk tsoonidest valitakse kindel arv kimp kiude. Edaspidi toimitakse kindla mustri järgi: kiudude kimpude poolitamine ja ühe poole ära viskamine, kiudude kimpude kahekordseks kokku panemine ja kiudude

joondamine. Niimoodi kiudusid vähendades saadakse lõpuks üks esinduslik kiudude kimbu proov. [19][21][25]



Joonis 4.1 Esindusliku kiudude kimbu moodustamise põhimõte [21]

Lõngad esinevad erinevat moodi pakendatud kujul (rull, pakk, pool) mitmetes partiides. Juhusliku valimi kohaselt jälgitakse järgnevat põhimõtet: juhuslikult valitakse partiid, millest omakorda juhuslikult lõngad. Valituks osutuvate lõngade arv võib olla kümme. Lõngast omakorda proovi võtmisel peetakse silmas kindla pikkusega lõnga lõikamist nii paki algusest, keskelt kui ka lõpust, seejuures nende piisavat kaugust nii paki algusest kui ka lõpust. [6][19][25]

4.2 Kiududega tehtavad katsesused

Lihtsaim viis kiu pikkust mõõta on käsitsi ükshaaval, kasutades selleks joonlauda ja pintsette. Kiudu peab venitama joonlaua kõrval piisavalt, et lainelikus kaoks aga seeläbi peaks vältima kiu välja venitamist. Teine võimalus on kasutada klaasplaadi sisse graveeritud mõõteskaalat, mis määratakse määrdeainega (vaseliin või vedel parafiin) kokku, et kiudu paremini kontrollida ja kohendada pintsettidega sirgeks piki skaalat. Kirjeldatud meetodid vastavad standardile ISO 6989:1981 (ingl k *Textile fibres – Determination of length and length distribution of staple fibres (by measurement of single fibres)*) ja ASTM D5103-01 (ingl k *Standard Test Method for Length and Length Distribution of Manufactured Staple Fibers (Single-Fiber Test)*). Statistiliselt täpse tulemuse andmiseks on vajalik teha palju mõõtmisi. Kiu pikkust saab mõõta ka niinimetatud kammsorteerijaga (ingl k *comb sorter*). Selle meetodiga määratakse kiudude kumulatiivne pikkuse jaotus neid harjade vahele surudes ja läbi kammides. Eri pikkusega kiud eralduvad harjade vahel ja nii saab need järjestada sametist alusele pikkuse järgi, mille järgi saab edasi teha vajalikke arvutusi. [4][19][25][66][67]

Kiu jämedust näitab joontihedus. Kiu joontihedust saab määrata kahel meetodil: gravimeetrilisel ja vibroskoopilisel, mis teostatakse vastavalt standardile EVS-EN ISO 1973:2000 (Tekstiilkiud. Joontiheduse määramine. Gravimeetriline ja vibroskoopiline meetod) [6]. Kui gravimeetriline meetod on rakendatav kiudude kimbule, siis

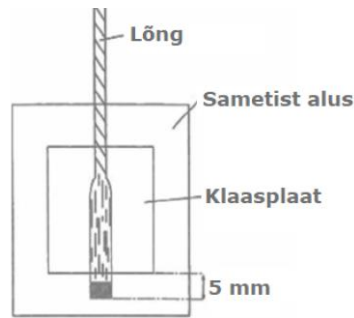
vibroskoopiliselt määratakse iga kiu joontihedus eraldi. Gravimeetriline joontiheduse määramisviis seisab samasuguse pikkusega kiududest kindlal viisil kiudude kimpude moodustamises ja nende kaalumises. Saadud tulemuste põhjal arvutatakse keskmine kiu kimbu joontihedus. Vibroskoopilise meetodi kasutamisel allutatakse kiud vibratsioonile resonantssagedusel. Testimisel kasutatakse seadet nimega vibroskoop, kus kiud kinnitatakse vibroskoobi külge kindla pinge all, et eemaldada kiudude säbrulisus. Joontihedus määratakse otse vibroskoobi skaalalt. Meetod eeldab seda, et joontihedus testitud kiul on konstantse väärtusega. [25][68]

Tõmbekatseid on võimalik teha kiule eraldi kui ka kiudude kimbule [4]. Rohkem eelistatakse viimast varianti ja seda mitmetel põhjustel. Esiteks, kiududele üksikult tõmbekatsete tegemine on aeganõudev, sest statistiliselt usaldusväärsete tulemuste saamiseks on vaja teostada palju katsetusi. Teiseks on individuaalseid kiudusid raske haaratsite vahele kinnitada. Kolmandaks, tekstiilmaterjalid koosnevad paljudest kiududest, mistõttu on kiudude kimpudele teostatavad tõmbekatsed suurema tähtsusega kui eraldi üksikutele kiududele. [19][25]

Tõmbetugevuse mõõtmine puuvillakiudude kimbule on teostatav Pressley ja Stelomeeter seadmetega. Mõlema seadme tööpõhimõte on sarnane, kus klambrite vahele asetatud kiudude kimbu purustamiseks määratakse jõud. Seejärel kaalutakse purustatud kiudude kimp. Neid kahte andmeid (stelomeetri puhul ka kiudude kimbu pikkus) on vaja kiudude kimbu tõmbetugevuse arvutamiseks. Nii kiu ja kui ka kiudude kimbu tõmbetugevust on võimalik määrata ka tõmbekatsel standardi EVS-EN ISO 5079:2020 (ingl k *Textile fibres – Determination of breaking force and elongation at break of individual fibres*) järgi. Tõmbemasina tööpõhimõttest on kirjutatud lähemalt alapeatükis lõngade tõmbetugevus. [4][19][25][69]

4.3 Lõngadega tehtavad katsed

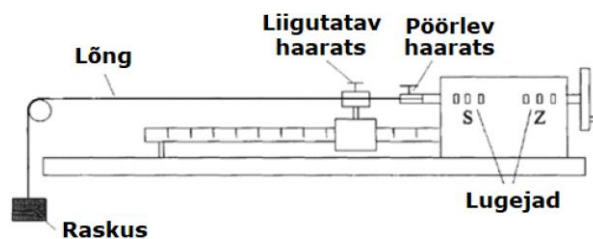
Lõngast võetakse proov vastavalt standardile ISO 1130:1975 (ingl k *Textile fibres – Some methods of sampling for testing*), jälgides juhuslikkuse alust. Kindla pikkusega lõnga keerutatakse seejärel ühest otsast lahti ja asetatakse sametist alusele ning kaetakse läbipaistva plaadiga (joonis 4.2). Klaasplaadi servast lõigatakse 5 mm kauguselt lahti keerutatud lõnga otsa ja eemaldatakse kõik lahtised kiud. Lahtiste otsade eemaldamine jätab alles õige pikkusega kiud, millel teostatakse katsed kuni saadakse nõutav kogus tulemusi. Sama protsessi korratakse järgmiste juhuslikult lõngast valitud kindla pikkusega lõngadega. [6][19][25][70]



Joonis 4.2 Lõngast proovi võtmine [19]

Sarnaselt kiududele näitab ka lõnga jämedust joontihedus, mida määratakse lõnga massi ja pikkuse kaudu. Lõnga joontihedust on võimalik kindlaks teha kahel meetodil: otseselt ja kaudselt. Kui otsese süsteemi järgi määratakse kindla pikkusega lõnga kaal, siis kaudne süsteem on vastupidine – määratakse kindla massiga lõnga pikkus. Massi kaudu saab lõnga joontihedust väljendada nii tex kui ka denjee süsteemiga, aga soovitatav on tex süsteem, mida kirjeldatakse standardis ISO 1144:2016 (ingl k *Textiles – Universal system for designating linear density (Tex System)*). Kui texi väärtus näitab 1000 meetri pikkusega lõnga massi grammides, siis denjee näitab 9000 meetri pikkuse lõnga massi grammides. Pikkuse kaudu lõnga joontiheduse määramises määratakse lõnga meetriline number, mis näitab meetrites 1 grammise lõnga pikkust. Standardis EVS-EN ISO 2060:2000 (Tekstiil. Lõng pakmelt. Joontiheduse (massi pikkusühiku kohta) määramine vihimeetodiga) kirjeldatakse, kuidas lõnga massi ja pikkusega määrata joontihedust. [4][6][15][19][21][25][28][71][72]

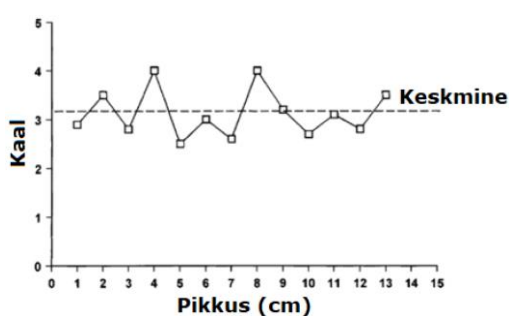
Standardis EVS-EN ISO 2061:2015 (ingl k *Textiles – Determination of twist in yarns – Direct counting method*) on lahti seletatud lõnga keerumuse määramine. Lõnga keerumust väljendatakse keerude arvuga pikkusühiku kohta. Seda mõõdetakse keeruloenduriga, mille haaratsite vahele asetatakse lõng (joonis 4.3). Üks haaratsitest on fikseeritav ja teine pööratav. Lõng keerutatakse lahti seni kuni kiud on paralleelsed lõnga teljega. Loetakse selle sooritamiseks vajalike pöörete arvu. [6][15][19][25][73]



Joonis 4.3 Keeruloendur [25]

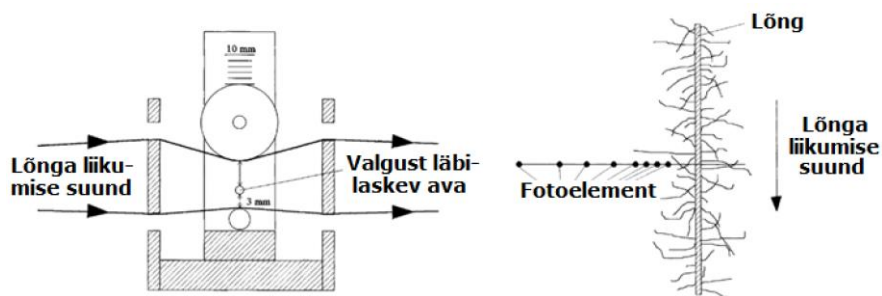
Lõnga ühtlus on defineeritud kui kaalu muutus pikkusühiku kohta, mida katseliselt saab hinnata eri viisidel. Kindla pikkusega lõngade lõike ja kaalu meetod on küll võrdlemisi lihtne, aga nõuab väga suurt täpsust, sest väike viga lõnga pikkuse mõõtmisel toob kaasa kaalumisel samavõrdse vea. Tulemused kantakse graafikule ja ühendatakse

joonega, mis näitabki visuaalselt lõnga ühtlust (joonis 4.4). Visuaalsel lõnga ebaühtluse hindamisel standardi ASTM D2255-02 (ingl k *Standard Test Method for Grading Spun Yarns for Appearance*) järgi keritakse lõng ümber paneeli ja tulemust võrreldakse standardi piltidega või kirjeldusega, hinnates lõngal kiutompude, peenikeste ja jämedate kohtade, karvasuse ja vöörrkehade esinemist. Selline meetod on subjektiivsusest olenemata sageli rakendatav oma lihtsuse ja lõngadele sobivuse tõttu. Standardis ISO 16549:2004 (ingl k *Textiles – Unevenness of textile strands – Capacitance method*) on põhjalikumalt seletatud, kuidas kondensaatoriga mõõdetakse lõnga ühtlust katsekeha läbiviimisega kahe plaadi vahelt. Mahtvuses toimuvad muutused kajastatakse graafikult, millega hinnatakse lõnga ühtlust. [19][25][28][74][75]



Joonis 4.4 Lõnga ühtluse tulemused graafikul [25]

Lõnga karvasuse mõõtmisel saab kasutada erinevaid seadmeid: Shirley, Zweigle ja Uster testijat [28]. Kahe esimese nimetatud testija tööpõhimõte on sarnane. Mõlemal juhul kasutatakse vastastikku olevat valguskiirt ja valgustundlikku elementi lõngast välja ulatuvate kiudude lugemiseks pikkusühiku kohta. Testitav lõng liigub nende kahe vahelt konstantse kiirusega läbi ning kui valgusvihk katkeb loendab masin selle väljaulatuvaks kiuks. Erinevus kahe testija vahel seisneb selles, et kui Shirley testija loendab ainult välja ulatuvate kiudude arvu, siis Zweigle teostab seda eri pikkuse rühmadesse (joonis 4.5). Usteri karvasuse testija mõõdab lõnga üldist karvasust, kus lõnga valgustatakse kahe paralleelse ultrapunase valguskiirega. Lõngale otse langev valgus ei jõua detektorini, vaid lõngast välja ulatuvatelt kiududelt hajutatud valgus. Hajutatud valguse hulk näitab lõnga kogu karvasust. [12][19][25]

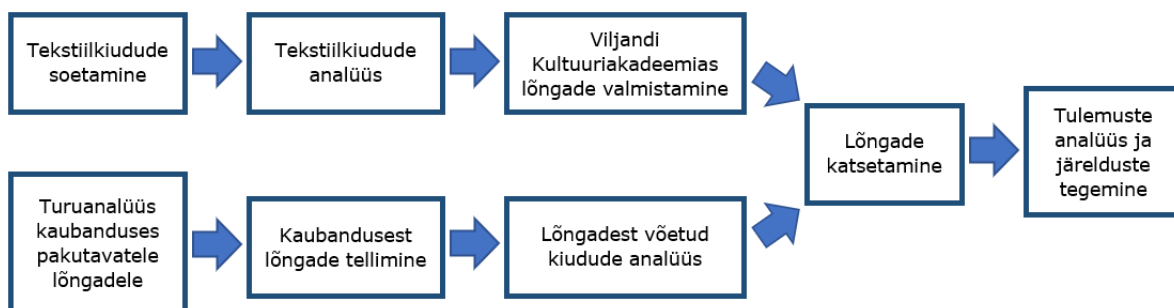


Joonis 4.5 Shirley (vasakul) ja Zweigle lõnga karvasuse testija [25]

Sarnaselt kiududele määratakse ka lõnga tugevust tõmbemasinaga teostatud katsel. Lõngadele tõmbekatsete tegemisel jälgitakse standardit EVS-EN ISO 2062:2010 (ingl k *Textiles – Yarns from packages – Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester*), mille kohaselt katsetatav lõng kinnitatakse tõmbemasina kahe klambri vahele, millest üks on paigale fikseeritud ja teine liikuv, avaldades jõudu katsekehale. Klambri liikumisel alla (või üles – sõltuvalt seadmest) jõud suureneb ja seda rakendatakse lõngale kuni purunemiseni. Nii saadakse katseproovi purustamiseks rakendatav jõud ja pikenemine purunemiseni. Kõik katse tulemused kuvatakse arvutis. [19][25][76]

5. MATERJALID JA MEETODID

Eksperimentaalse osa eesmärk oli võrrelda ümbertöödeldud kiududest valmistatud lõngade omadusi uutest kiududest kedratud lõngade omadustega. Selleks teostati erineva kiulise koostise, kiulise päritolu ja struktuuriga lõngadele katsetusi. Katsete läbiviimisest saadud infot kasutati ümbertöödeldud kiududest lõngadele optimaalse kiulise koostise leidmisel. Lõputöö katselise osa skeem on kujutatud joonisel 5.1.





Joonis 5.1 Katseplaani skeem



5.1 Lõngade ketramisel kasutatud kiud

Tabelis 5.1 on toodud info kiududest, millest kedrati Viljandi Kultuuriakadeemias lõngad. Uued puuvilla- ja polüesterkiud on soetatud Paragon Sleep AS-ist. Ümbertöödeldud kiud on hangitud Soome jäätmekäitlusettevõttest nimega Lounais-Suomen Jätehuolto, kus tekstiilijäätmed on käsitsi sorteeritud ja mehaaniliselt purustatud. Mõnele lõngale on siduvateks kiududeks ja ketrusprotsessi parendamiseks lisatud kahte erinevat tüüpi villakiude. Kihnu maalamba tumepruunide villakiudude pikkus oli ligikaudu 70-90 mm ja Eesti valgepealiste lammast valgete villakiudude pikkus oli ligikaudu 80-120 mm. Viljandi Kultuuriakadeemia soetas nimetatud villakiud Forest Haldus OÜ-st.

Tabel 5.1 Lõngade valmistamisel kasutatud kiud

Kiudude nimetus	Kiudude lühend	Saadud	Pilt kiududest
Uued puuvillakiud	CO	Paragon Sleep AS	
Uued polüesterkiud	PES	Paragon Sleep AS	

Tabel 5.1 järg

Kiudude nimetus	Kiudude lühend	Saadud	Pilt kiududest
Uued villakiud	WO	Viljandi Kultuuriakadeemia	-
Ümbertöödeldud puuvillakiud (käsitsi sorteeritud)	üCO	Lounais-Suomen Jätehuolto	
Ümbertöödeldud segakiud (trikotaaži jäätmetest)	üMIX	Lounais-Suomen Jätehuolto	

5.2 Katsetatavad lõngad

Kokku viidi katseid läbi 17 erinevale lõngale, mis sisaldasid uusi ja/või ümbertöödeldud puuvilla-, villa-, polüester- ja segakiude. Enamk katsetatud lõngadest kedrati Tartu Ülikooli Viljandi Kultuuriakadeemias, aga mõned lõngad telliti ka kaubandusest. Katsetatud lõngad jagunesid struktuuri poolest kaheks: ühe- ja kahekordseteks. Viljandi Kultuuriakadeemias kedrati kokku 14 lõnga, millest 10 sisaldasid erineval määral ümbertöödeldud kiudusid. Ülejäänud 4 lõnga valmistati kõrvutamise eesmärgil ainult uutest kiududest. Et võrrelda antud töö käigus kedratud lõngade omadusi juba kaubanduses saadaolevate analoogse koostisega lõngade omadustega, siis soetati üks uutest ja kaks ümbertöödeldud kiududest lõnga (Lisa 1). Täpsemad parameetrid katsetatud lõngadest (kiuline koostis, kordsus, keerdumus) on toodud katsetulemuste juures tabelis 6.1.

Tartu Ülikooli Viljandi Kultuuriakadeemias kedratud lõngad on valminud Itaalias toodetud spetsiaalselt lõngade tootmiseks loodud kõrgkvaliteetsete Ramella tekstiilimasinatega, millega on võimalik lõnga toota nii looduslikest kui sünteetilisest kiududest. Viljandis on olemas lõnga ketramiseks järgmised seadmed: villahunt, kraasimismasin, kammimismasin, raamketrusmasin ja kerimismasinad. Pildid seadmetest on leitavad Lisas 2. Järgnevalt on lühidalt seletatud, kuidas valmivad Viljandi Kultuuriakadeemias lõngad.

Lõngade valmistamisprotsess algab kiudude mehaanilise avamisega, mille käigus tekstiilkiud juhitakse mööda konveierliini turvakapis oleva villahundini. Tekstiilkiud läbivad rullpaari ja need söödetakse oradega kaetud pöörlevale silindrile, mis teostab tekstiilkiudude avamist kiudude kimpudeks. Lisaks kiudude avamisele teostab seade ka vahesel määral puhastusoperatsiooni, sest kiudude avamine kimpudeks aitab eemaldada võõrkehasid kiudude massist. Pärast kiudude avamist juhitakse kiudude kimbud mööda toru suurde läbipaistvasse kotti, kus liikuva õhu abiga (ventilatsioon) suunatakse lendlevad osakesed filtrisse. [77]

Konveierlindil korrapäratult asetsevad kiudude kimbud juhitakse turvapuuris olevasse kraasimismasinasse, kus need suunatakse hammastega kaetud pöörlevate peasilindri ja abisilindrite vahelt läbi. Nii harutatakse kiudude kimbud lahti üksikuteks kiududeks ja joondatakse paralleelseteks. Abisilindritele kogunevad lühikesed kiud eemaldatakse. Kraasimismasinast väljuv kraaslint liigub pöörleva taru sisse, millega transporditakse see raamketrusmasina juurde ja söödetakse seadmele ette ilma linti vigastamata. Kammimine jäeti kiudude pikkusest tulenevatel põhjustel vahele (ümbertöödeldud kiudude pikkus lühikene). [77]

Raamketrusmasinaga toimub lõnga ketramine ja korrutamise. Seadmega on võimalik kedrata ja korrutada kuni 24 lõnga korruga. Mootoriga juhitud raam transpordib ketrusmasina tagant heidelindid tarust ketramistsooni, kus vähendatakse selle massi nõutud paksuseni. Seejärel suunatakse see völliini, kus toimub suurel pöörlemiskiirusel ketramine poolile. Pärast asetatakse kedratud poolid ketrusmasina ees olevale raamile ja juhitakse völliil olevale poolile lõnga korrutamiseks. Kerimismasinatega viiakse lõng üle selle pakendamiseks sobivale kujule. Viljandi Kultuuriakadeemias selleks olemas vihimasin lõngavihi valmistamiseks ja poolija, mis kerib lõnga koonusekujulistele poolidele. [77]

5.3 Katsemeetodid

Tabelis 5.2 on välja toodud läbiviidud katsed. Katsete valimisel lähtuti lõnga ketramisel kriitilise tähtsusega ja lõnga kvaliteeti määravatest kiudude ning lõngade omadustest. Kiudude pikkus määrab lõnga tugevuse ja kiudude püsivuse lõnga struktuuris ning nendest sõltub kiudude sobivus lõngaks ketramisel. Lõnga ühtlane jämedus mõjutab nii lõnga väljanägemist kui tugevust. Lõnga keerduvus mõjutab lõnga tugevust. Lõnga tugevus näitab lõnga vastupidavust.

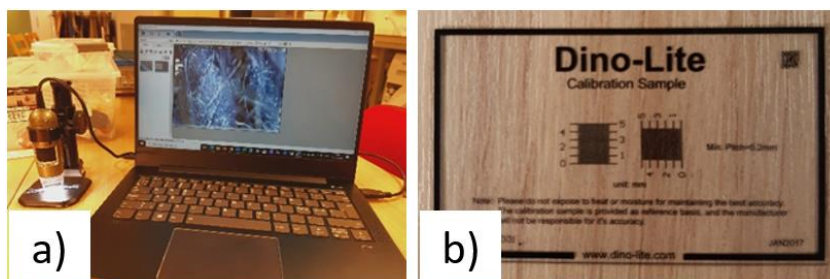
Tabel 5.2 Katsetabel

Tekstiilmaterjal	Katse nimetus	Printsiip	Standard	Katsekehade arv
Kiud Lõngad	Standardkeskkond konditsioneerimiseks ja testimiseks	Standardne	EVS-EN ISO 139:2005	-
Kiud	Staapelkiudude pikkuse ja pikkusjaotuse määramine üksikute kiudude mõõtmisel	Meetod A	ISO 6989:1981	50
	Toodetud staapelkiudude pikkuse ja pikkuse jaotuse määramine üksikule kiule	-	ASTM D5103-01	
	Tekstiilkiud – meetodid proovide võtmiseks	Lõikamis-meetod	ISO 1130:1975	
Kiud	Tekstiilmaterjalide vaatlemine mikroskoobiga ja kiudude tuvastamine	Valgusmikroskoop	Laborimeetod	5
Lõng	Tekstiilmaterjalide vaatlemine digitaalse mikroskoobiga	-	Laborimeetod	1
Lõng	Joontiheduse (massi pikkusühiku kohta) määramine vihimeetodiga	Variant 1	EVS-EN ISO 2060:2000	3
Lõng	Keerdumuse määramine otsesel loendamise meetodil	-	EVS-EN ISO 2061:2015	5
Lõng	Katkekoormuse ja -venivuse määramine	Meetod C	EVS-EN ISO 2062:2010	5
Lõng	Lõnga ühtluse hindamine	-	ASTM D2255-02	1

5.3.1 Tekstiilmaterjalide vaatlemine digitaalse mikroskoobiga

Uuritavate kiudude ja lõngade vaatlemisel kasutati Dino-Lite digitaalset USB mikroskoopi ja arvutiprogrammi DinoCapture 2.0 (joonis 5.2 a). Töövahendina kasutati Dino-Lite mikroskoobi skaalalehte (joonis 5.2 b). Katse käik oli järgnev:

- 1) Tekstiilmaterjal asetati digitaalse mikroskoobi alla, mis oli ühendatud arvutiga.
- 2) Sobiva suurenduse ja kauguse juures salvestati tekstiilmaterjalist pilt.
- 3) Sama suurenduse ja kauguse juures tehti suurenduslõigu tarbeks pilt mõõteskaalaga plastlehest.



Joonis 5.2 Dino-Lite digitaalne USB mikroskoop ühendatud arvutiga (a), mõõteskaala leht (b)

5.3.2 Tekstiilmaterjalide vaatlemine valgusmikroskoobiga

Ümbertöödeldud kiudude vaatlemisel ja tuvastamisel kasutati valgusmikroskoopi BioBlue, kaamerat (joonis 5.3) ja tarkvara Image Focus 4. Kasutatud töövahendid olid järgmised: destilleeritud vesi, etanool, alusklaas ehk prepeareerimisklaas, katteklaasid, paber, pintsetid, kalibreerimiskaala. Katse käik oli alljärgnev:

- 1) Etanooliga puhastatud alusklaasile asetati tekstiilkiud.
- 2) Tekstiilkiududele tilgutati paar tilka destilleeritud vett ja kaeti katteklaasiga.
- 3) Alusklaas asetati kaameraga ühendatud mikroskoobi alla.
- 4) Sobiva suurendus ja kiudude asetuse juures tehti mikroskoobiga pilt.
- 5) Sama suurenduse juures tehti pilt ka kalibreerimiskaalast suurenduslõigu jaoks.



Joonis 5.3 Valgusmikroskoop kaameraga

5.3.3 Kiudude pikkuse määramine

Lõngade valmistamiseks soetatud kiudude pikkused määrati vastavalt standarditele ASTM D 5103 (ingl k *Standard Test Method for Length and Length Distribution of Manufactured Staple Fibers (Single-Fiber Test)*) ja ISO 6989:1981 (ingl k *Textile fibres – Determination of length and length distribution of staple fibres (by measurement of single fibres)*). Kiudude mõõtmisel kasutati töövahenditena luupi koos valgustusega, sametist alust, joonlauda ja pintsette (joonis 5.4). Katse käik oli järgmine:

- 1) Tekstiilkiud konditsioneeriti vastavalt standardile EVS-EN ISO 139:2005 (Tekstiil. Standardkeskkond konditsioneerimiseks ja testimiseks).
- 2) Luubi alla paigutatud puhastatud sametist alusele asetati tekstiilkiud.
- 3) Pintsetiga kohandati tekstiilkiudu joonlaua kõrval sirgeks jõudu rakendamata ja joonlaua skaalalt mõõdeti kiu pikkus.
- 4) Mõõtmistegevust korrati kokku 50 tekstiilkiule.

Kaubandusest soetatud kiudude pikkused määrati vastavalt standardile ISO 1130:1975 (ingl k *Textile fibres – Some methods of sampling for testing*). Kasutatud töövahendid

olid luup koos valgustusega, sametist alus, joonlaud, pinsetid, käärid ja vajadusel klaasist alus (joonis 5.4). Katse käik oli järgnev:

- 1) Katsetavad lõngad konditsioneeriti vastavalt standardile EVS-EN ISO 139:2005 (Tekstiil. Standardkeskkond konditsioneerimiseks ja testimiseks).
- 2) Lõigati väikse pikkusega lõng, mis harutati lahti ühekordseteks lõngadeks.
- 3) Eraldatud ühekordset lõnga keerutati kiudude lõdvenemiseni ja lahutati kaheks.
- 4) Lahutatud lõnga pinnalt võeti pintsetiga üksik kiud ja asetati sametist alusele.
- 5) Kiudude pikkus määrati 50 tekstiilkiule.



Joonis 5.4 Töökoht kiudude pikkuste mõõtmiseks

5.3.4 Lõnga joontiheduse määramine

Lõnga joontiheduse määramist teostati vastavalt standardile EVS-EN ISO 2060:2000 (Tekstiil. Lõng pakmelt. Joontiheduse (massi pikkusühiku kohta) määramine vihimeetodiga). Katse läbi viimisel kasutati kaalu METTLER AE 200 (joonis 5.5), mis on täpsusega 0,0001 grammi. Kasutatud töövahendid olid käärid ja joonlaud pikkusega 1 m. Katse käik oli järgmine:

- 1) Lõng keriti rullilt maha ja konditsioneeriti vastavalt standardile EVS-EN ISO 139:2005 (Tekstiil. Standardkeskkond konditsioneerimiseks ja testimiseks).
- 2) Lõngadest lõigati kolm 10 meetri pikkust katsekeha.
- 3) Iga katsekeha kaaluti.
- 4) Vastavalt valemile (5.1) arvutati iga katsekeha joontihedused ning hiljem leiti kolme katsekeha keskmine joontihedus.

$$T_{tc} = \frac{m_c \times 10^3}{L}, \quad (5.1)$$

kus T_{tc} – lõnga joontihedus, tex,
 m_c – lõnga mass, g,
 L – lõnga pikkus, m.



Joonis 5.5 Kaal METTLER AE 200

5.3.5 Lõnga keerdumuse mõõtmine

Lõngade keerdumust otsustati määrata ainult mitmekordsetel lõngadel vastavalt standardile EVS-EN ISO 2061:2015 (ingl k *Textiles – Determination of twist in yarns – Direct counting method*). Lõnga keerdumuse mõõtmisel kasutati seadet nimega keeruloendur (joonis 5.6). Samuti olid abiks järgnevad töövahendid: käärid, nõöpnõel, joonlaud. Katse käik oli alljärgnev:

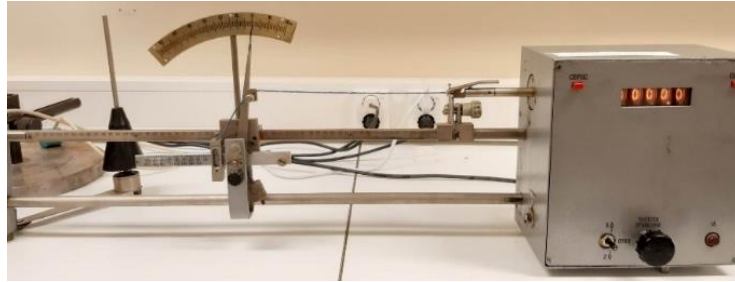
- 1) Keeruloendur seadistati katseks valmis (valiti keerdumuse suund ja seadistati haaratsite vahe (250 mm)).
- 2) Lõngad konditsioneeriti vastavalt standardile EVS-EN ISO 139:2005 (Tekstiil. Standardkeskkond konditsioneerimiseks ja testimiseks).
- 3) Lõnga katsekeha asetati haaratsite vahele, vältides selle läbi vajumist.
- 4) Skaala nulliti ja lõng keerutati keeruloenduriga lahti.
- 5) Nõöpnõelaga veenduti lõngade paralleelsuses, skaalalt pandi kirja keerdude arv.
- 6) Ühe lõnga kohta teostati katset viiele katsekehale ning arvutati lõnga keerdumus valemiga (5.2) katsekehal ja valemiga (5.3) lõngal.

$$t_x = \frac{1000x}{l}, \quad (5.2)$$

kus t_x – lõnge keskmine keerdumus katsekeha kohta, keerdu/m,
 l – katsetatava lõnga pikkus enne lahti keerutamist, m,
 x – loendatud keerdude arv.

$$\bar{t}_x = \frac{\sum t_x}{n}, \quad (5.3)$$

kus \bar{t}_x – lõnga keskmine keerdumus lõnga kohta, keerdu/m,
 $\sum t_x$ – summa kõikide katsetavate lõngade keskmisest keerdumusest,
 n – katsetatud lõngade arv.



Joonis 5.6 Keeruloendur

5.3.6 Katkekoormuse ja -venivuse määramine

Katkekoormuse ja -venivuse katse teostati vastavalt standardile EVS-EN ISO 2062:2010 (ingl k *Textiles – Yarns from packages – Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester*). Katse läbi viimiseks kasutati tõmbemasinat INSTRON 5866 (joonis 5.7) ja arvutiprogrammi Instron Bluehill. Muud töövahendid olid joonlaud ja käärid. Katse käik lõngade oli järgmine:

- 1) Tõmbemasin ja programm seati eelseisvateks tõmbekatseteks valmis ning määrati mõõdetavad parameetrid. Lõngasid eelnevalt ei konditsioneeritud.
- 2) Lõnga katsekeha asetati haaratsite vahele (500 mm), vältides lõnga hargnemist või keerumuse muutumist.
- 3) Teostati tõmbekatse, ühe lõnga katsetamisel kasutati 5 paralleelset katsekeha.
- 4) Arvutati lõngade sitkus valemiga (5.4) ja lõngade pikenemine valemiga (5.5).

$$B = \frac{F}{T} \quad (5.4)$$

kus B – sitkus, cN/tex,
 F – purustatav jõud, cN,
 T – joontihedus, tex.

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta L}{L} \right) \times 100 \quad (5.5)$$

kus ε - katsekeha pikenemine, %,
 ΔL – pikenemine tõmbekatsel, mm,
 L – katsekeha mõõtepikkus, mm.

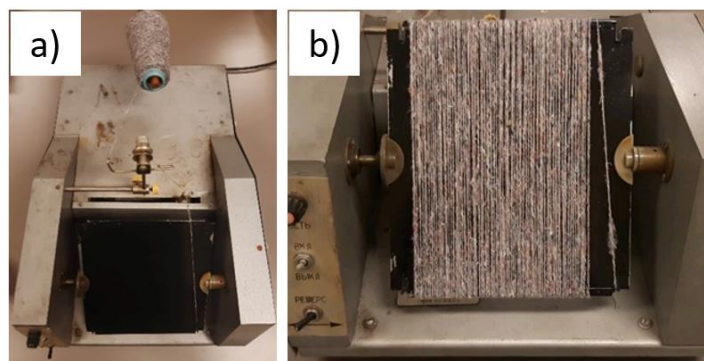


Joonis 5.7 Tõmbemasin Instron 5866

5.3.7 Lõnga ühtluse hindamine

Lõnga ühtlust hinnati standardi ASTM D2255-02 (ingl k *Standard Test Method for Grading Spun Yarns for Appearance*) järgi ainult Viljandi Kultuuriakadeemias kedratud lõngadele, sest kaubandusest tellitud lõngadele ei nähtud vajadust antud katseks visuaalselt väga hea ühtluse tõttu. Lõngade vaatlemiseks kasutati lõnga kerimisseadet (joonis 5.8 a). Töövahenditena kasutati kääre. Katse käik oli järgnev:

- 1) Kerimisseade ja lõng seati valmis katse jaoks.
- 2) Masin käivitati ja lõng keriti ümber plaadi.
- 3) Plaadist keritud lõngaga (joonis 5.8 b) tehti pilt.
- 4) Standardi piltide ja kirjelduste põhjal anti lõnga ühtlusele hinne vahemikus A-F, kus A on kõige ühtlasem ja F kõige ebaühtlasem lõng (Lisa 3).
- 5) Katse teostati ülejäänud lõngadega.



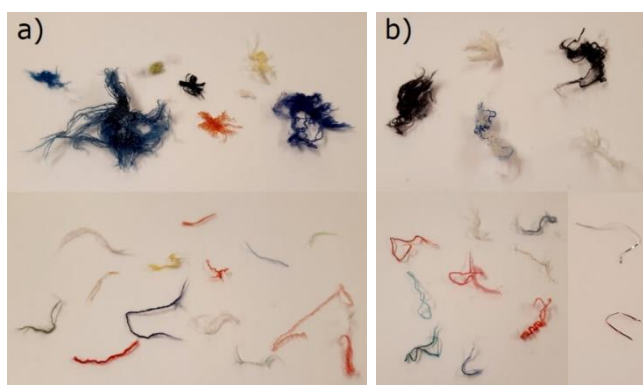
Joonis 5.8 Lõnga ühtluse hindamise seade (a), plaat keritud lõngaga (b)

6. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

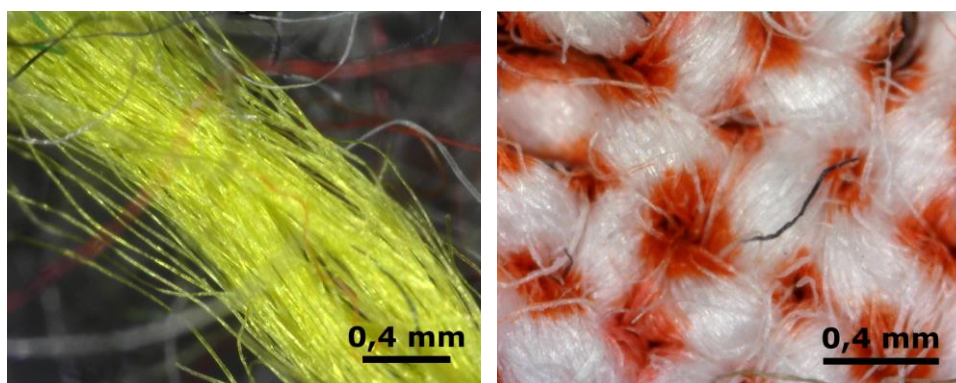
6.1 Kiud

6.1.1 Kiudude visuaalne vaatlus

Paragon Sleep AS-ist saadud uusi puuvillakiudusid iseloomustab neutraalne valge värvus ja pruunid ning mustad võõrlisandid kiudude hulgas. Uutele polüesterkiududele on omane optiline valge toon ja kogunenud säbrulised kiud. Sünteetilistel kiududele on iseloomulik suurem säbrulisus puuvillakiududest ja kiu pinna läige. Soome jäätmekäitlusettevõttest saadud ümbertöödeldud kiudude domineeriv värvus on hele- või tumehall (segakiududel tumedam hall), aga kiudude hulgas esinevad erinevat värvi tekstiilmaterjali tükid annavad neile kirju tooni. Ümbertöödeldud kiudude hulgas on nähtavad väiksemad ja suuremad tekstiilmaterjalide osakesed (lõngajupid ja kangaste tükid) (joonis 6.1), mis näitab, et mehaanilise ümbertöötlemisel kasutatud purustustehnoloogia ei taga homogeenseid kiudude hulkasid. Digitaalse mikroskoobiga uurides (Lisa 4) tuvastati trikotaaži ja riide struktuuriga kangatükke, märgati nii erineva pikkuse kui ka jämedusega lõnga- ja niidijääke, kiududest moodustunud pallikesi teiste kiudude hulgas ning segakiudude massis leiti ka metalliseeritud ribasid (joonis 6.2).

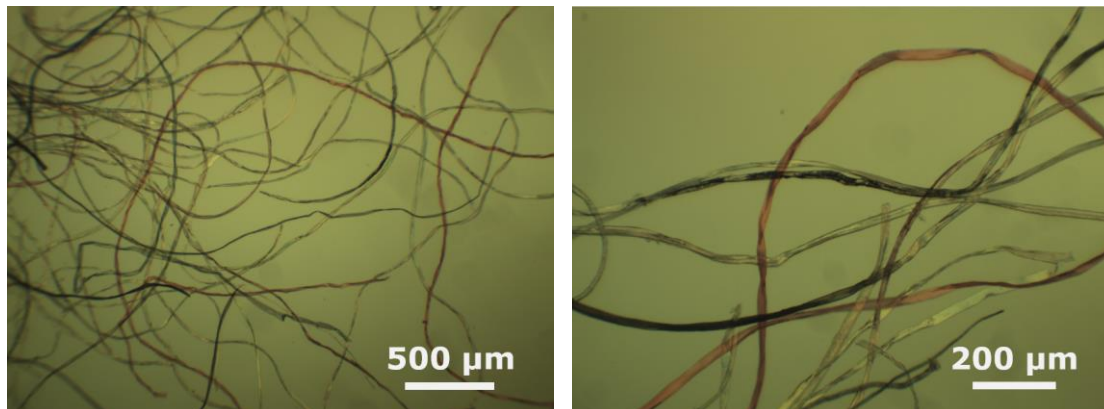


Joonis 6.1 Ümbertöödeldud puuvillakiudude (a), segakiudude (b) hulgast leitud tekstiilijääd



Joonis 6.2 Ümbertöödeldud segakiudude hulgast leitud lõng ja puuvillakiudude hulgast leitud riide struktuuriga kangatükk

Valgusmikroskoobiga uuriti Soome jäätmekäitlusettevõttest saadud ümbertöödeldud kiude, sest puuvillakiudude kiuline koostis oli sorteerimisel hinnanguline ja segakiududel määramata. Ümbertöödeldud puuvillakiudude vaatlemisel märgatigi puuvillakiududele omaseid tunnuseid: spiraalsed, lintjad ja üherakulised kiud (joonis 6.3).

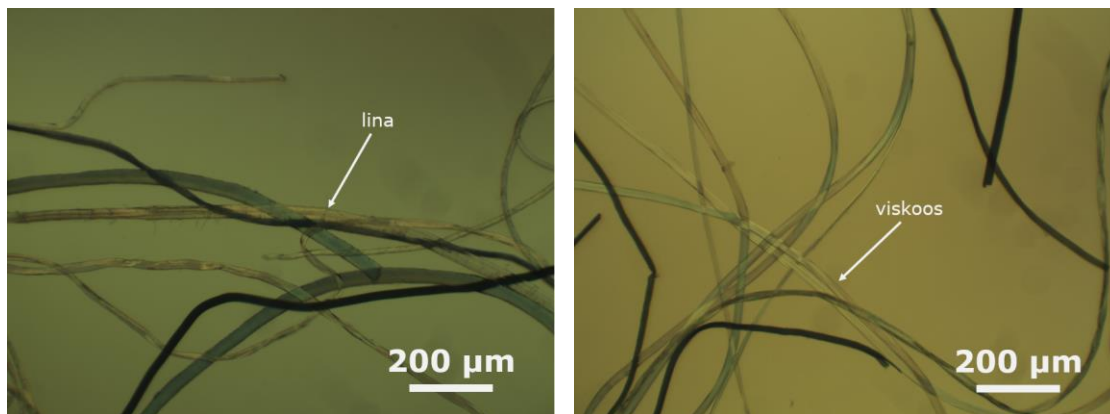


Joonis 6.3 Ümbertöödeldud puuvillakiud 40-kordse ja 100-kordse suurendusega

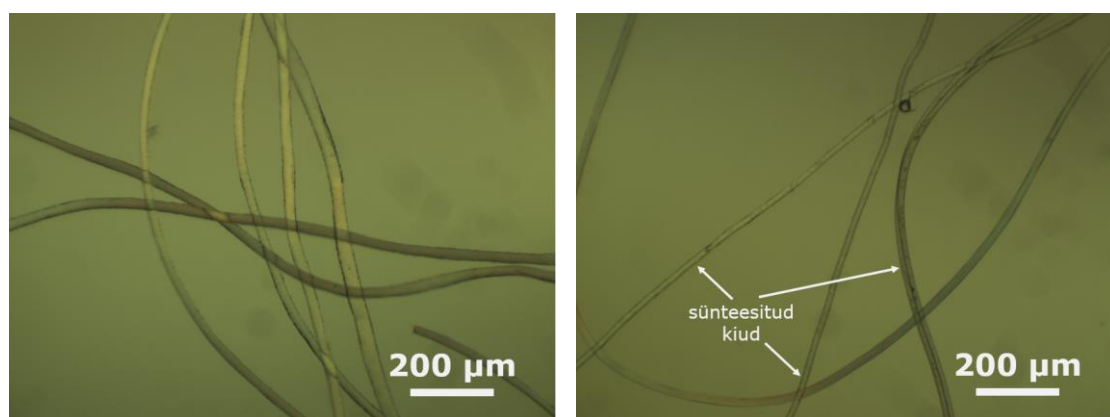
Mikroskoobiga ümbertöödeldud segakiude uurides täheldati nimele vääriliselt erinevaid tekstiilkiude. Mikroskoobiga suudeti märgata puuvilla-, lina-, viskoos-, villa- ja sünteetilisi kiude. Linakiudude olemasolust saadi aru mitmest kõrvuti asetsevast kiust ja kiu pinnal esinevate sõlmekestest ning viskooskiude tuvastati sellele omase siledal pinnal esineva viirutuse järgi (joonis 6.5). Villakiud identifitseeriti selle kohati karvase kuid sirgel kiupinnal olevate soomuste abil ja sünteetilistele kiududele viitasid siledapinnalised torjuja väljanägemisega kiud, mille pinnal võivad esineda ka täpikesed (joonis 6.6). Valgusmikroskoobiga täpset sünteetilise kiu nimetust tuvastada võimalik ei ole, sest nimetatud tunnused on omased nii polüester- kui polüamiidkiududele. Ülejäänud valgusmikroskoobiga tehtud pildid ümbertöödeldud puuvilla- ja segakiududest on leitavad Lisas 5.



Joonis 6.4 Ümbertöödeldud segakiud 40-kordse suurendusega



Joonis 6.5 Ümbertöödeldud segakiudude hulgast tuvastatud linakiud ja viskooskiud 100-kordse suurendusega



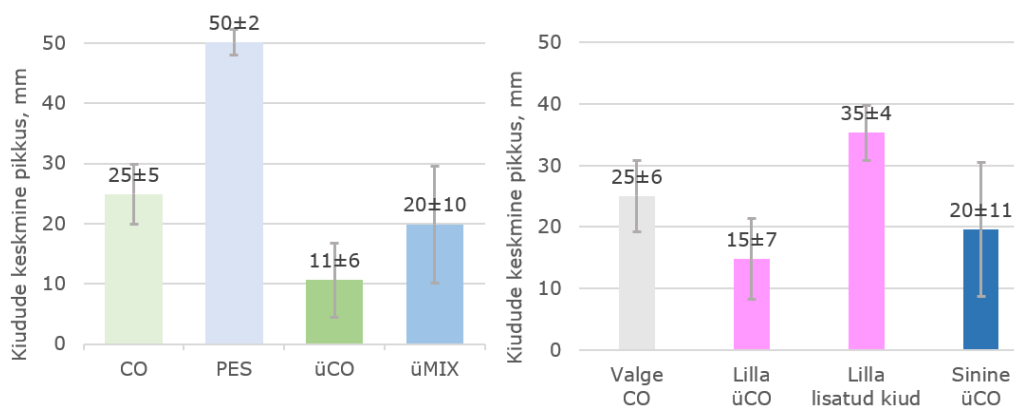
Joonis 6.6 Ümbertöödeldud segakiudude hulgas tuvastatud villakiud ja sünteetilised kiud 100-kordse suurendusega

6.1.2 Kiudude pikkus

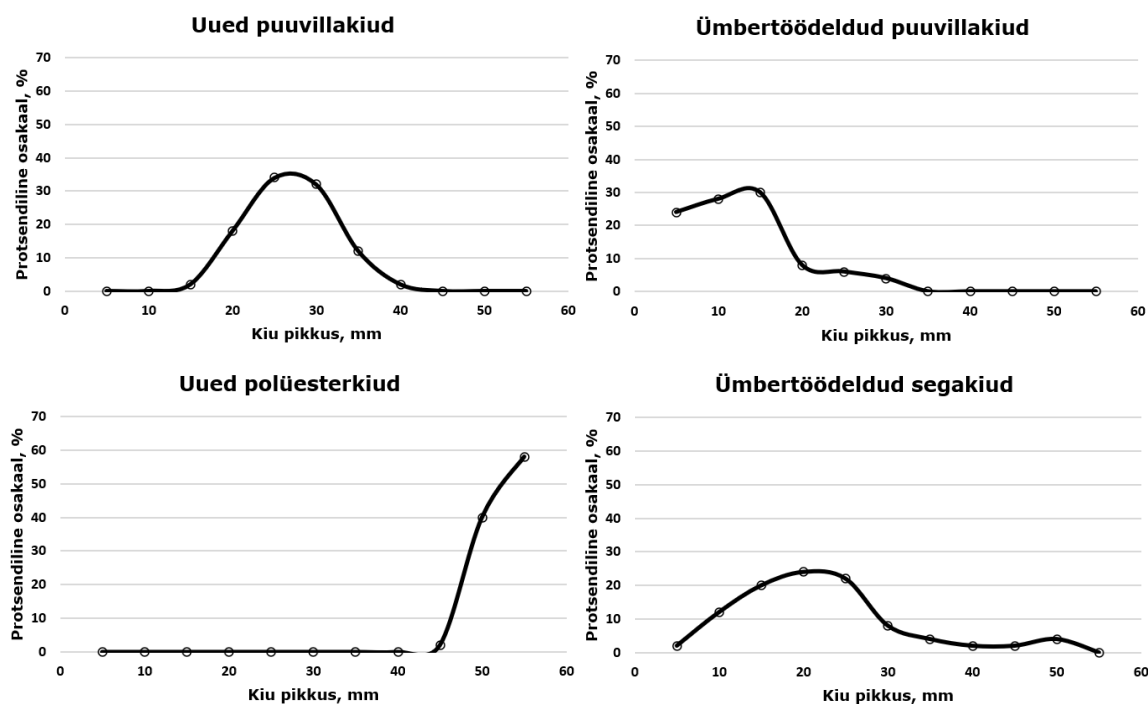
Joonisel 6.7 on näha mõõdetud kiudude keskmised pikkused, mis kinnitavad, et ümbertöödeldud kiud omavad madalamat kiu pikkust võrreldes uute kiududega. Kõige suurem keskmine kiu pikkus on polüesterkiududel, mille väärtus on uutest puuvillakiududest kaks korda suurem. Mõõdetud kiudude pikkused on nendel vastavalt (50 ± 2) mm ja (25 ± 5) mm. Ümbertöödeldud segakiududel on keskmine kiu pikkus (20 ± 10) mm, mis on suurem ümbertöödeldud puuvillakiududest ((11 ± 6) mm). Võrreldes lõngade ketramiseks soetatud kiudude pikkuseid kaubandusest saadud lõngadest võetutega, siis jääb silma viimaste suuremad kiudude pikkused. Lõngadest võetud ümbertöödeldud puuvillakiud on pikemad soetatud ümbertöödeldud puuvillakiududest. Nende keskmised kiudude pikkused on vastavalt (15 ± 7) mm ja (20 ± 11) mm. Lõngast võetud uute puuvillakiudude keskmine pikkus on (25 ± 6) mm, mis on samaväärne soetatud uute puuvillakiududega. Lisaks avastati lillast lõngast katse käigus enam kui kaks korda suurema pikkusega kiude ümbertöödeldud puuvillakiududest, mille keskmine kiu pikkus on (35 ± 4) mm. Mõõdetud kiudude

keskmised pikkused on kõik lühemad lõngade ketramisel kasutatud villakiudude pikkustest, mis olid teadaolevalt vahemikus 70-120 mm.

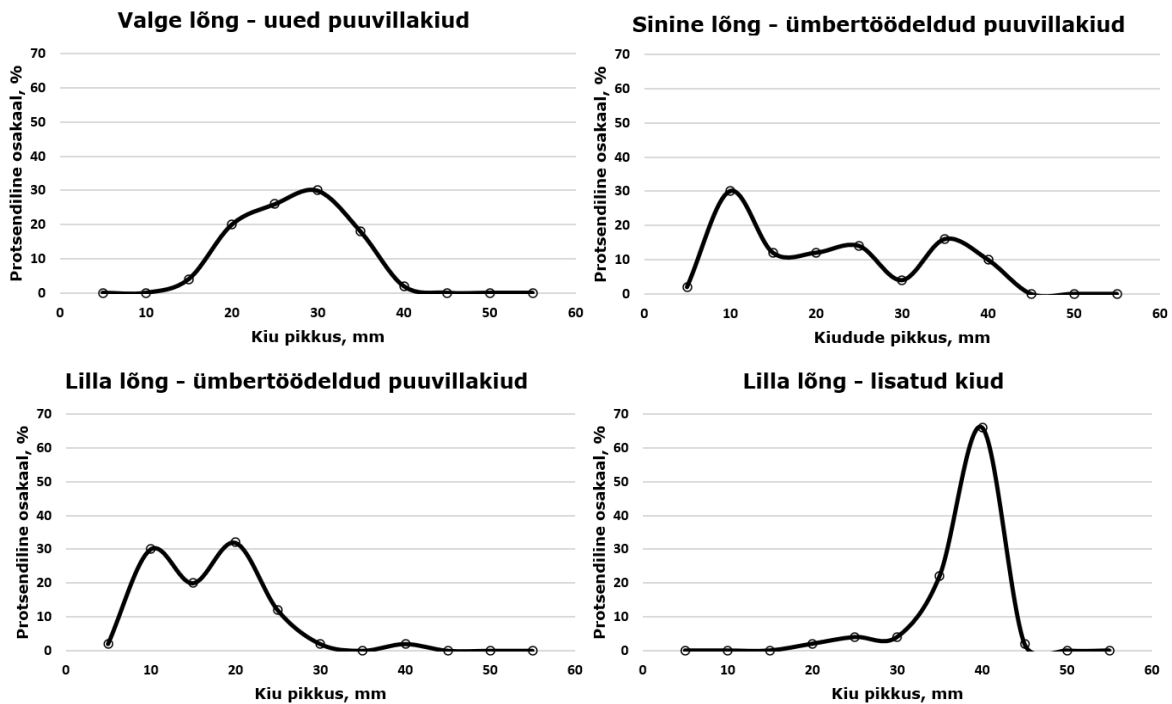
Möödetud kiudude pikkuste põhjal, mille mõõtmistulemused on toodud ära Lisas 6, koostatud kiudude pikkuse jaotuvused (joonis 6.8 ja 6.9) kinnitavad ümbertöödeldud kiudude pikkuste suuremat varieeruvust. Ümbertöödeldud kiudude jaotuvustest nähtub, kuidas väiksemad kiudude pikkused esinevad suurema osakaaluga suurematest kiudude pikkustest. Kui uutel kiududel jääb standardhälve vahemikku 2-6 mm, siis ümbertöödeldud kiududel on see vahemikus 6-11 mm. Lisaks on kiudude jaotuvustest hästi välja joonistunud, kuidas uued kiud omavad suuremaid kiudude pikkuseid ja kiudude pikkuste jaotuvused ei ole „laiali hajunud“. Lilla lõnga valmistamisel kasutatud kiudude pikkuste jaotuvustest on märgata kuivõrd hästi lisatud kiud tasakaalustavad ümbertöödeldud kiududest täitmata jäänud suurema pikkusega kiudude puuduse.



Joonis 6.7 Möödetud kiudude keskmised pikkused soetatud kiudude hulgast (a), lõngadest (b)



Joonis 6.8 Soetatud kiudude pikkuste jaotuvuse graafikud



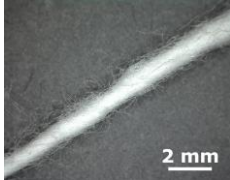
Joonis 6.9 Lõngadest võetud kiudude pikkuste jaotuvuse graafikud

6.2 Lõngad

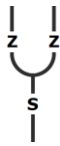
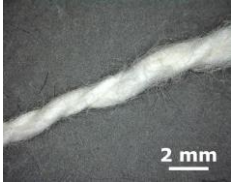

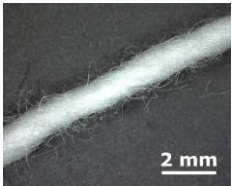
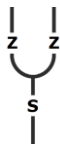
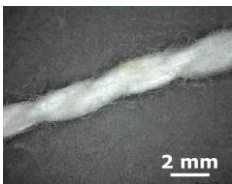

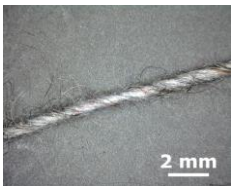





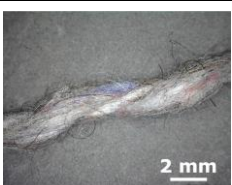


6.2.1 Lõngade struktuuri ja keerumuse määramine

Tabel 6.1 annab informatiivse ülevaate lõputöös katsetatud lõngade kiulisest koostisest, kordsusest ning keerumusest. Katsetatavad lõngad on ühekordsed või mitmekordsed. Katsetatavad mitmekordsed lõngad on lihtkorrutatud, millest enamik on kahekordsed, välja arvatud kaubandusest tellitud lõngad, millest on üks lõng saadud nelja, teine viie ja kolmas üheksa lõnga omavahelisel kokku keerutamisel. Kõikidele ühekordsetel lõngadel on keerumus Z suunaline, aga mitmekordsetel S suunaline, mis koosneb omakorda Z keerumusega ühekordsetest lõngadest. Kahel kaubandusest tellitud lõngal ei olnud võimalik määratleda ühekordsete lõngade keerumust lõnga struktuuri tõttu (eristumatu keeru suund).


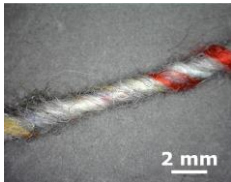







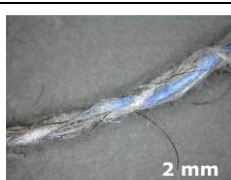






Tabel 6.1 Katsetatud lõngad

Lõnga nr	Kiudude päritolu	Lõnga päritolu	Kiuline koostis	Kordsus	Keerumus	Pilt digitaalse mikroskoobiga
1	Uued	Viljandi Kultuuriakadeemia	100% CO	1x	Z	

Tabel 6.1 järg

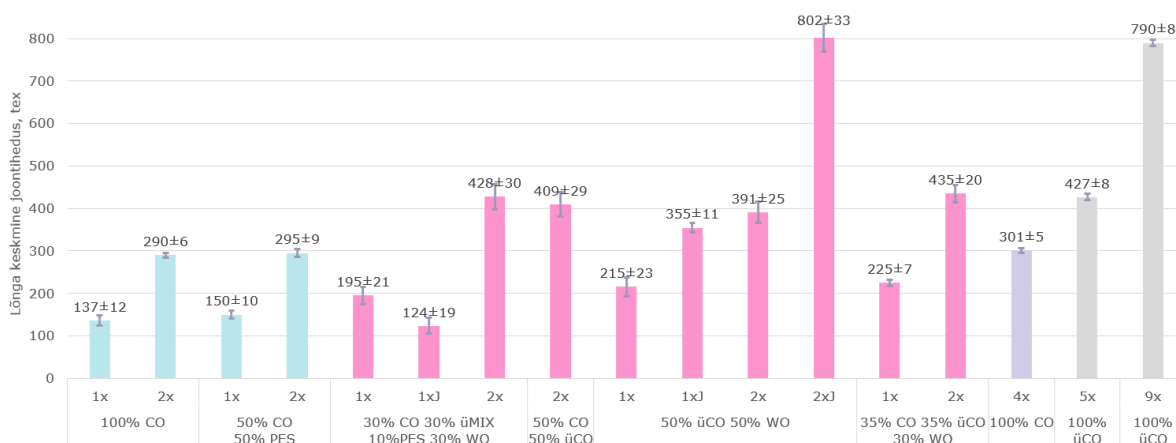
Lõnga nr	Kiudude päritolu	Lõnga päritolu	Kiuline koostis	Kordsus	Keerdumus	Pilt digitaalse mikroskoobiga
2	Uued	Viljandi Kultuuriakadeemia	100% CO	2x		
3	Uued	Viljandi Kultuuriakadeemia	50% CO 50% PES	1x		
4	Uued	Viljandi Kultuuriakadeemia	50% CO 50% PES	2x		
5	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	1x		
6	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	Jämedam 1x		
7	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	2x		
8	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	50% CO 50% üCO	2x		
9	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	50% üCO 50% WO	1x		

Tabel 6.1 järg

Lõnga nr	Kiudude päritolu	Lõnga päritolu	Kiuline koostis	Kordsus	Keerdumus	Pilt digitaalse mikroskoobiga
10	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	50% üCO 50% WO	Jämedam 1x		
11	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	50% üCO 50% WO	2x		
12	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	50% üCO 50% WO	Jämedam 2x		
13	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	35% CO 35% üCO 30% WO	1x		
14	Segu	Viljandi Kultuuriakadeemia	35% CO 35% üCO 30% WO	2x		
15	Uued	DROPS YOU	100% CO	4x		
16	Ümber- töödeldud	DROPS YOU	100% üCO	5x		
17	Ümber- töödeldud	DROPS PARIS	100% üCO	9x		

6.2.2 Joontihedus

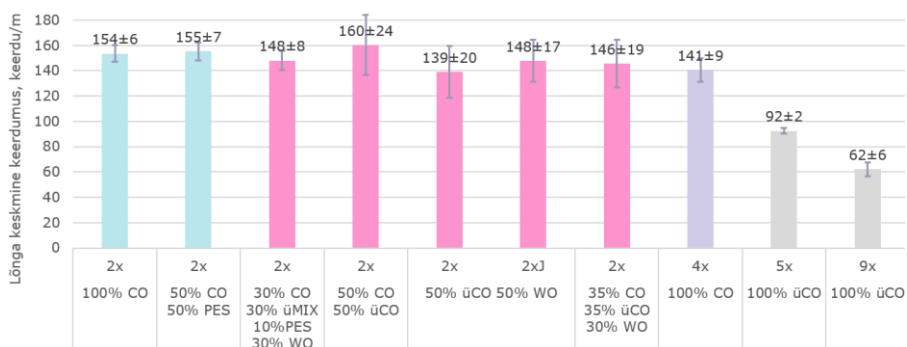
Lõngade joontihedused on teksides ehk mida suurem väärtus, seda jämedam lõng. Lõngade joontiheduste katsetulemustest (joonis 6.10) jäävad silma, et kõige jämedamad on kahekordne (jämedam) lõng kiulise koostisega 50% üCO + 50% WO ning üheksakordne lõng kiulise koostisega 100% üCO, mille joontihedused on vastavalt (802±33) tex ja (790±8) tex. Ülejäänud lõngade joontihedused jäävad vahemikku 124–435 tex. Katsetulemustest on näha, et kahekordsed lõngad omavad suuremat joontihedust võrreldes ühekordsetega. Ka kaubandusest tellitud lõngadel on sarnane seos, aga olenemata suuremast kordsusest ei ole need Viljandis kedratud lõngadest jämedamad. Suurem osa ümbertöödeldud lõngu omab suuremat joontihedust võrreldes uutest kiududest kedratud lõngadega. Viljandis Kultuuriakadeemias kedratud ümbertöödeldud lõngadel on märgata suuremat standardhälvet, mis viitab lõngas esinevatele jämeduste varieeruvusele. Lõngade joontiheduse katsetulemused tabelina on leitavad Lisas 7.



Joonis 6.10 Lõngade keskmised joontihedused

6.2.3 Keerdumus

Lõngade keerdumuste tulemused (joonis 6.11) näitavad, et kahekordsetel lõngadel ei erine keerdumused üksteisest suurel määral, jäädes ühe meetri kohta vahemikku 139–160 keerdu/m. Isegi kaubandusest soetatud neljakordse lõnga keerdumus ühe meetri kohta on samaväärne kahekordsete lõngadega. Uutest ja ümbertöödeldud kiududest kedratud lõngadel tulemustes märgatavat erinevust ei ole. Katsetulemustest on näha, et lõngade kordsuse kasvades väheneb lõnga keerdumus. Taaskord on Viljandi Kultuuriakadeemias valmistatud ümbertöödeldud kiududest lõngadel võrdlemisi suur standardhälve ehk lõnga erinevates osades ei ole keerdude arv sama. Katsetulemused tabelina lõngade keerdumusest on Lisas 8.



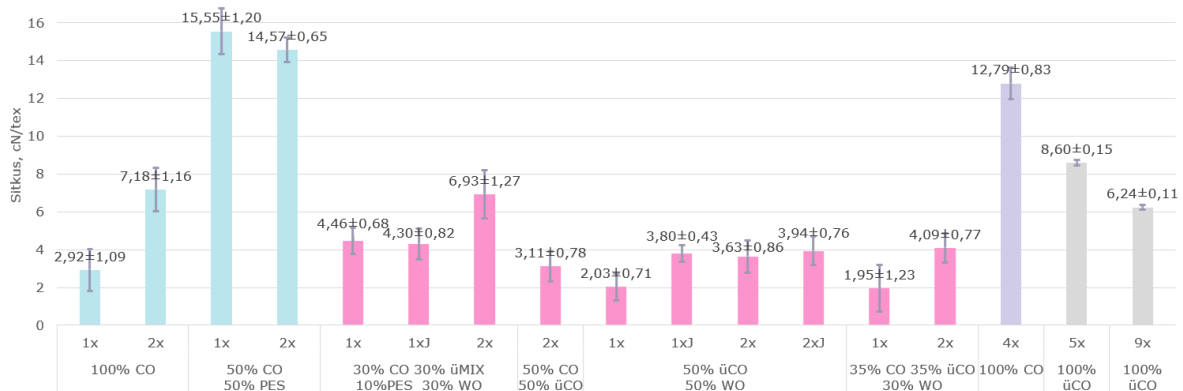
Joonis 6.11 Kahekordsete lõngade keerdumused

6.2.4 Katkekoormus ja -venivus

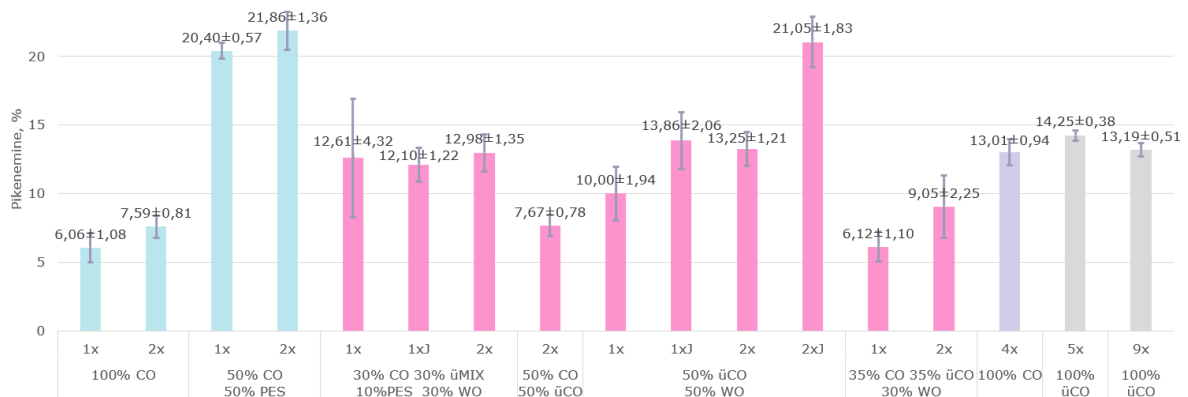
Katsetulemuste paremaks analüüsimiseks arutati välja lõngade sitkused, mis arvestab tulemustes lõngade erinevaid joontihedusi, ja pikenemine, mis annab millimeetrites väljendatud tulemustest parema ülevaate. Lõngade sitkuse ja pikenemise väärtused on toodud vastavalt joonistel 6.12 ja 6.13. Katsetulemused tabelina on Lisas 9. Kõige kauem suutsid purunemata taluda koormust uutest kiududest ühekordne ja kahekordne lõng kiulise koostisega 50% CO + 50% PES, mille tulemused olid vastavalt (15,55±1,20) cN/tex ja (14,57±0,65) cN/tex. Samuti kaubandusest tellitud 100% uutest puuvillakiududest lõng erineb suurema sitkusega ((12,79±0,83) cN/tex) ülejäänutest lõngadest, mille tulemused jäävad vahemikku 1,95–8,60 cN/tex. Ühekordne ja kahekordne lõng, mille kiuline koostis on 50% CO + 50% PES, ning jämedam kahekordne lõng 50% üCO + 50% WO kiulise koostisega omavad teistest lõngadest selgelt paremaid pikenemisväärtusi, mis on vastavalt (20,40±0,57)%, (21,86±1,36)% ja (21,05±1,83)%. Ülejäänud lõngade katsetulemused jäävad vahemikku 6,06–14,25%. Katsetulemustest jääb silma, et suurem kordsuse arv ja lõnga jämedus ei taga tingimata suuremat pikenemist ega vastupanu koormusele. Selline tendents on nähtav kohati ainult sama kiulise koostisega lõngade hulgas. Mõned ümbertöödeldud kiududest kedratud lõngad omavad ühekordsest uuest sajaprotsendilisest puuvillakiududest valmistatud lõngast paremaid tugevusomadusi. See võib olla põhjustatud ümbertöödeldud lõngades kasutatud kiudude päritolust. Lõngades esinevatest kiudude päritolust on märgata järgmiseid seoseid:

- Uute ja ümbertöödeldud puuvillakiudude sisaldus lõngas halvendab lõnga sitkust ja pikenemist.
- Polüesterkiudude ja ümbertöödeldud segakiudude sisaldus parandab lõngade tugevusomadusi.

- Villakiudude lisamine ei tõsta lõngade sitkust, aga samas parandab lõngade pikenemist.



Joonis 6.12 Lõngade sitkuse tulemused



Joonis 6.13 Lõngade pikenemise tulemused

6.2.5 Ühtlus

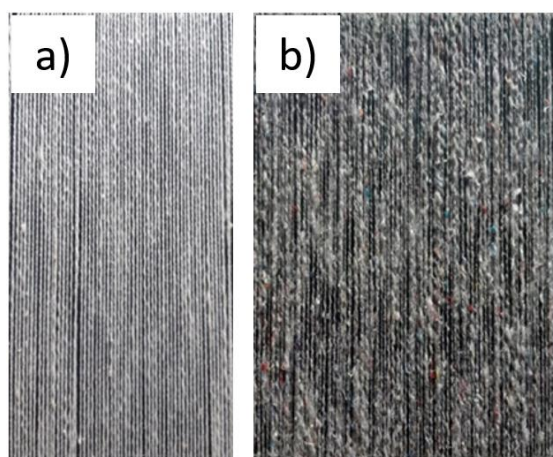
Tabel 6.2 kajastab lõngade ühtlusele antuid hindede. Kui uute lõngade hinded jäävad vahemikku A kuni C, siis ümbertöödeldud lõngade omad D kuni F. Antud hinded näitavad, et uutest kiududest lõngadel on ühtlus parem ümbertöödeldud lõngadest. Kõige ühtlasemad on uutest kiududest kedratud lõngadest 50% CO + 50% PES ning ümbertöödeldud kiududest kedratud lõngadest 30% CO + 30% üMIX + 10% PES + 30% WO, mis said ühtlust iseloomustavaks hindeks vastavalt A ja D. Kui uutest kiududest lõngadel on näha tendentsi, et samasuguse kiulise koostisega kahekordsel lõngal on ühekordselt parem ühtlus, siis ümbertöödeldud lõngadel kehtib selline seos ainult ühel juhul.

Näitena on joonisel 6.14 välja toodud pildid kõige parema hinde saanud ja ühe kõige kehva hinde saanud lõngast. Ülejäänud pildid lõngadest on leitavad tabelis 6.3. Keritud lõngadest tehtud piltidest järeldub, et suuremal määral on probleemseks peenete ja jämedamate kohtade esinemine lõngadel. Uutest kiududest kedratud

lõngadel oli märgata ka pallikesi lõnga pinnal. Ümbertöödeldud lõngadel on suurem probleem kiudude, niidi- ja lõngajäänuste välja ulatumine lõngast. Samas tuleb mainida, et võimalik raskendav asjaolu ümbertöödeldud lõnga pinnal pallikeste nägemisel oli nende kirju toon. Uutest kiududest lõngad on ühevärvilised valged ning pallikesed paistavad paremini silma.

Tabel 6.2 Lõngade ühtlusele antud hinded

Lõnga kiuline koostis	100% CO		50% CO 50% PES		30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO			50% CO 50% üCO		50% üCO 50% WO				35% CO 35% üCO 30% WO	
Lõnga kordsus	1x	2x	1x	2x	1x	1xJ	2x	2x	1x	1xJ	2x	2xJ	1x	2x	
Hinne	C	B	B	A	E	E	D	F	F	E	F	E	E	F	











Joonis 6.14 Kõige parema ühtlusega lõng 50% CO + 50% PES (a), üks kõige kehvema ühtlusega lõng 35% CO + 35% üCO + 30% WO (b)

Tabel 6.3 Fotod lõngade ühtluse hindamiseks

Lõnga foto				
Lõnga kordsus	Ühekordne lõng		Kahekordne lõng	Kahekordne lõng
Lõnga kiuline koostis	100% CO			50% CO 50% PES
				50% CO 50% üCO

Tabel 6.3 järg

Lõnga foto				
Lõnga kordsus	Ühekordne lõng	Ühekordne jämedam lõng	Kahekordne lõng	Ühekordne lõng
Lõnga kiuline koostis	30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO			35% CO 35% üCO 30% WO
Lõnga foto				
Lõnga kordsus	Ühekordne lõng	Ühekordne jämedam lõng	Kahekordne lõng	Kahekordne jämedam lõng
Lõnga kiuline koostis	50% üCO 50% WO			

7. JÄRELDUSED

Vaadeldes katsete käigus määratud lõngade joontihedusi, keerdumusi ning sitkuse ja pikenemise väärtusi on näha, et Viljandis kedratud ümbertöödeldud lõngade katsetulemused on suurema varieeruvusega võrreldes uutest kiududest valmistatud lõngade ja kaubandusest soetatud lõngade katsetulemustega. Antud olukord võib olla tingitud ümbertöödeldud lõngade ebaühtlusest. Ümbertöödeldud lõngade ebaühtlust võrreldes uutest kiududest kedratud lõngadega näitavad ka lõngade ühtluse hindamistulemused. Lõngas esinevad jämedamad ja peenemad kohad mõjutavad lõngade joontiheduse, keerdumuse ning tugevuse väärtusi. Kuna joontihedus määratakse kaalumisel, siis jämedamad ja peenemad kohad toovad kaasa erinevusi lõnga massis. Samuti omavad jämedamad ja peenemad kohad lõngas erinevat keerdude arvu. Liialt peened kohad lõngas võivad kergemini puruneda, aga ka üldine ebaühtlus nõrgendab lõnga tervikuna. Lõngade omaduste ja ühtluse omavahelist seost kinnitavad ka kaubandusest saadud lõngade omaduste väiksem varieeruvus, mis viitab ühtlasemale lõngale, ning asjaolu, et nendele lõnga ühtluse hindamise vajadus visuaalselt väga hea ühtluse tõttu ei olnud vajalik.

Lõngade ebaühtlus omakorda on põhjustatud kiudude pikkusest ja pikkuse jaotuvusest. Soome jäätmekäitlusettevõttest soetatud kiud on ebahomogeensed. Need sisaldavad eri suuruses ja kujul tekstiilmaterjalide tükke, mis viitab ebaefektiivsele tekstiilijäätmete purustustehnoloogiale. Samuti on ümbertöötlemise käigus kiudude pikkused lühenenud ja kiudude pikkuse jaotuvused laienenud, mida kinnitavad nii välja arvatud keskmine kiu pikkus kui ka mõõdetud kiudude pikkuste põhjal tehtud jaotuvust iseloomustavad graafikud. Lühikesed kiud ei püsi lõnga struktuuris tugevalt ja jäävad välja ulatuma, põhjustades lõnga karvasuse ja sealt omakorda edasi kiutompe. Kaubandusest saadud lõngadest võetud ümbertöödeldud puuvillakiudude pikkused omavad ka suurt standardhälvet, mida taaskord näitab kiudude pikkuste jaotuvuse graafik, aga erinevalt lõngade ketramiseks soetatud ümbertöödeldud puuvillakiududest omavad need suuremat keskmist kiu pikkust. Sellest tingituna on kaubandusest tellitud lõng ühtlasem. Lisaks võib ebaühtlane lõng olla põhjustatud lõnga valmistamisel esinevatest vigadest: kiudude kraasimisel ja joondamisel saadud kiudude mittekorrapärase asetus, ebaühtlane heie ning ketrusmasinal ebaühtlane heide väljevenitus.

Lõngade katkekoormus ja -venivuse katsetulemused näitavad, et lõngade sitkus paraneb kui kiudude hulka segada uutest kiududest polüesterkiude ja ümbertöödeldud kiududest segakiude. Kuigi lõngade ketramisel kasutatud villakiud omasid teistest kiududest suuremat pikkust ja teada on, et pikemad kiud püsivad lõnga struktuuris paremini, siis lõnga tugevust see ei parandanud. Määravaks on villakiudude madal sitkus

võrreldes teiste lõngade valmistamisel kasutatud kiududega, mistõttu villakiud tervikuna nõrgendavad lõnga, sest kiudude tugevus mõjutab otseselt lõnga tugevust. Uutel polüesterkiududel on juba loomupäraselt kiu tugevusomadused paremad puuvilla- ja villakiududest. Ka ümbertöödeldud segakiud sisaldavad teatud hulgal sünteetilisi kiude, mis muudab nendest valmistatud lõngad tugevamaks. Lisaks omavad uued polüester- ja ümbertöödeldud segakiud suhteliselt kõrgeid kiudude pikkuse väärtusi ja pikkuse jaotuvust. Mõlematel kiududel on mõõdetud kiududest kõige suuremad kiu keskmise pikkuse väärtused oma kiu päritolu grupis (uus/ümbertöödeldud). Kuigi villakiud lõngade sitkust ei parandanud on katsetulemustest märgata, et need suurendavad lõnga pikenemist.

Kuigi Paragon Sleep AS-ist saadud puuvillakiudude pikkus on võrdväärne kaubandusest tellitud lõngades sisalduvate uute puuvillakiududega, siis omab kaubandusest saadud lõng palju kõrgemat sitkuse ja pikenemise väärtust. Siinkohal võib eeldada, et erinevus tuleneb kaubandusest saadud lõnga suuremast kordsusest, jämedusest ja paremast lõnga ühtlusest. Katsetulemustest on näha, et kaubandusest soetatud ümbertöödeldud lõngade sitkus on üldiselt suurem Viljandi Kultuuriakadeemias valmistatud lõngade sitkuse väärtustest. See on seletatav pikemate kiudude kasutamisega lõnga struktuuris ja lõnga parema ühtlusega. Lisaks omab viiekordne ümbertöödeldud lõng üheksakordselt natukene kõrgemat sitkust ja pikenemist, sest sisaldab märkimisväärselt kõrgema pikkusega lisatud kiudu.

Kirjanduse ülevaate põhjal võib järeldada, et üldiselt on lõng seda tugevam, mida suurem on selle jämedus ja keerdumus ning eri jämedusega lõngadel on erinev keerdumus. Lõngade katkekoormus ja -venivuse ning joontiheduse tulemustest on näha, et lõnga suurem jämedus ja kordsus parandab lõnga tugevust sama kiulise koostisega lõngadel. Lõngade tugevusomadusi ja keerdumusi võrreldes on märgata, et kaubandusest saadud lõngadele on suurema jämedusega lõngadel ka suurem keerdumus. Viljandi Kultuuriakadeemias kedratud lõngadele see seos ei kehti, sest keerdmused jäid neil kõigil samale tasemele, aga tugevused on erinevad. Vaadeldes lõngade joontiheduste ja keerdumuste jooniseid, siis üldiselt saab ütelda, et paarist erandist hoolimata on erineva joontihedusega lõngal erinev keerdumus. Näiteks tuleb see selgelt välja kaubandusest saadud lõngadel. Üldiselt on Viljandis valmistatud lõngadel samal tasemel keerdumus ja joontihedus erineb üksteisest vähesel määral, välja arvatud üks lõng. Lõngade keerdumuste tulemustest joonistub aga selgelt välja, et lõnga kordsuse kasv vähendab lõnga jämedust.

Kokkuvõtlikult saab järelda katsetulemustest järgmist:

- Lõngade omadused nagu joontihedus, keerdumus, tugevus sõltuvad suurel

määral lõnga ühtlusest.

- Ümbertöödeldud lõngadel varieeruvad lõngade omadused nagu joontihedus, keerdumus, sitkus ja pikenemine rohkem kui uutest kiududest valmistatud lõngadel.
- Lõnga ühtlust mõjutavad kiudude pikkus ja pikkuse jaotuvus.
- Lõngade ühtlus on parem uutest kiududest kedratud lõngadel.
- Ümbertöötlemisega kiudude pikkused vähenevad ja kiudude pikkuse jaotuvused suurenevad.
- Erineva joontihedusega lõngadel on ka erinev keerdumus.
- Lõngade katkekoormus- ja venivus on sõltuv kiudude päritolust, pikkusest ja pikkuse jaotusest, tugevusest ning lõngade ühtlusest.
- Lõnga suurem jämedus ja kordsus võib parandada lõnga sitkust sama kiulise koostise puhul.
- Lõnga korduse kasv vähendab lõnga keerdude arvu.
- Erineva joontihedusega lõngad omavad erinevat keerdude arvu.
- Polüesterkiudude lisamine teiste kiudude hulka parandab lõnga sitkust.
- Villakiud ei paranda lõngade tugevust, aga need võivad suurendada pikenemist.

Katsetulemusi analüüsi leidmaks optimaalne ümbertöödeldud lõngade koostis, mis tagab tugeva lõnga ja maksimaalse ümbertöödeldud kiudude kasutamise selle ketramisel. Tuginedes uuringutest saadud infole on ümbertöödeldud kiudude hulka kõige mõistlikum lisada 25-30% uusi kiudusid. Vaadates katkekoormus ja -venivuse tulemusi, siis järeldub, et lisatavate kiudude osakaal peab olema võimalikult suur, mistõttu tundub 30% olevat põhjendatult õige. Katsete tulemusi analüüsid selgus, et ülimalt oluline faktor lõnga suuremal tugevuses on lõnga ühtlusel (kaubandusest saadud lõngad omavad paremaid tulemusi arvatavasti seetõttu). Selleks, et taaskasutatud lõngade halvemat ühtlust kompenseerida, on vajalik segada ümbertöödeldud kiudude hulka võimalikult palju uusi kiude. Tähtis on leida lahendus ka sellele, et ümbertöödeldud lõngade ühtlust parandada. Võrreldes uute ja ümbertöödeldud puuvilla-, villa- ja polüesterkiudude omadusi, mida saadi teada uuringutest ja katsete tulemustest, siis järeldub, et kõige mõistlikum on kvaliteedi parandamiseks segada ümbertöödeldud kiudusid polüesterkiudega. Puuvilla ja villa tugevust parandavad nii uued kui ka ümbertöödeldud polüesterkiud.

Suurest ebaühtlusest tingituna ei ole Viljandis Kultuuriakadeemias kedratud ümbertöödeldud lõngad kõige parem valik edasi kudumiseks kangaks, mida kasutada rõivaste valmistamiseks. Ümbertöödeldud lõngadele omane suur ebaühtlus tagab ebameeldiva välimuse ja defektid nendest valmistatud kangastele ning rõivastele. Autor näeb parema kasutusvaldkonnana sisustustekstiile (nagu vaip ja mööblakangad).

Näiteks võiks lõngasid kasutada narmasvaipade valmistamisel nii vaiba aluskatte kui ka pealiskatte tegemisel.

KOKKUVÕTE

Täna seni populaarne „tooda-tarbi-viska minema“ põhimõttega lineaarne majandusmudel on viinud maailma olukorrani, kus tekstiilijäätmeid tekib aastaga väga suurtes kogustes. Igal aastal tekkivatest tekstiilijäätmetest jõuab ümbertöötlemiseni väga väike kogus. Suur osa tekstiilijäätmeid põletatakse või ladestatakse. Tekstiilijäätmete ümbertöötlemisega saab vähendada uute tekstiilmaterjalide tootmiskahtusid, mis omakorda minimeerib toormaterjali ja taastumatu ressursi kasutamist, vee, energia, värvainete ja kemikaalide tarbimist, tootmisheitmeid ja -reostust.

Tekstiilijäätmeid on võimalik ümber töödelda mehaaniliselt ja keemiliselt. Esimesel viisil tekstiilmaterjalid purustatakse tekstiilkiududeks. Teisel juhul viiakse läbi materjali depolümeerisatsioon ehk monomeeri kujule viimine, millele järgneb polümeerisatsioon. Antud bakalaureusetöös keskenduti tekstiilijäätmete mehaanilisele ümbertöötlemisele, mis sobib igat tüüpi kiulise koostisega tekstiilmaterjalidele ning mida iseloomustab kiu pikkuse ja tugevuse vähenemine ning kiudude pikkuse jaotuvuse suurenemine. Mehaaniliselt on võimalik ümber töödelda nii segakiududest kui ka ühe kiu sisaldusega tekstiilmaterjale, aga raske on määratleda täpset kiulist koostist segu korral. Käesolev lõputöö eesmärgiks oli katsetada erineva kiulise koostisega uutest ja mehaaniliselt ümbertööteldud kiududest valmistatud lõngade omadusi ja pakkuda välja optimaalne kiuline koostis ümbertööteldud kiududest valmistatud lõngadele ning anda ülevaade tekstiilijäätmete probleemist maailmas ja nende ümbertöötlemise meetoditest.

Lõngade omaduste uurimiseks viidi läbi erinevaid katseid standardite järgi: kiudude pikkuse, lõnga joontiheduse, keerdumuse, katkekoormuse ja -venivuse määramine ning ühtluse hindamine. Kokku teostati katseid 17 lõngale, millest 14 olid valmistatud Viljandi Kultuuriakadeemias ja ülejäänud 3 lõnga soetati kaubandusest. Valmistatud lõngad sisaldasid järgmisi kiudusid: uued ja ümbertööteldud puuvilla-, uued villa- ja polüester- ning ümbertööteldud segakiud.

Lõngade tugevused on seotud kiudude päritolu, kiudude pikkuse, kiudude pikkuse jaotuvuse ja lõnga ühtlusega. Lõngade sitkust ja pikenemist parandasid ümbertööteldud kiududest valmistatud lõngadele lisatud uued polüester- ja ümbertööteldud segakiud, sest need kiud omasid nii suuremat kiu pikkust kui ka tugevust. Ümbertööteldud kiudude pikkused esinevad suuremas kiudude pikkuse jaotuvuses, mis mõjutab nii lõnga joontihedust, keerdumust, tugevust kui ka üldist ühtlust. Katsetulemustest selgus kuivõrd oluline on lõnga tugevuse tagamisel ühtlane lõng.

Mehaaniliselt ümbertöödeldud tekstiilkiudude pikkus on küll lühem ja kvaliteet kehvem, aga uute tekstiilkiududega segamisel on neist võimalik kedrata lõnga. Lõputöös leiti, et optimaalne taaskasutatud lõnga kiuline koostis on 70% ümbertöödeldud kiudusid ja 30% omaduste parandamiseks lisatavaid tekstiilkiudusid. Analüüsidest puuvilla-, villa- ja polüesterkiudude omadusi ja läbi viidud katsete tulemusi lõngadega, siis sobib kõige paremini ümbertöödeldud tekstiilkiudude hulka segada polüesterkiudusid. Kusjuures kasutada võib nii uusi kui ka ümbertöödeldud polüesterkiude.

Käesolev bakalaureusetöö andis võimaluse süveneda tänapäeval aktuaalsesse tekstiilijäätmete temaatikasse ning saada põhjalikke teadmisi tekstiilmaterjalidest, millest valmistatakse palju teisi tekstiile, mida kohtab meie ümber. Tõestati, et tekstiilijäätmete ümbertöötlemisel saadud tekstiilkiududest on võimalik lõnga kedrata. Bakalaureusetööle püsitatud eesmärgid said täidetud. Antud teemat on võimalik edasi arendada lõngade kasutusvaldkondade uurimiseks. Lõngadest on võimalik valmistada trikootaži, mis annab võimaluse uurida nendest valminud trikootažkanga omadusi.

SUMMARY

Every year a lot of textile waste is created and only a small amount of it is recycled. Linear model of take, make and waste and absence of effective recycling methods are two reasons why only a small amount of textile waste is being recycled. Instead of recycling textile waste finds its way to landfills or incinerator. Also, there is less need for production of new textiles if more textile waste is recycled. Furthermore, recycling minimizes the need for raw materials, non-renewable resources, water, energy, dyes, chemicals and production of emissions and pollution.

As it is required to collect textile waste separately from other type of waste since 2025, the aim of this bachelor's thesis is to find one possible solution for recycling. Current thesis is focused on production of yarns from recycled fibres that are received from textile waste. Therefore, the aims of the bachelor thesis are as follows:

- To manufacture yarns from mechanically recycled textile waste with different fibre content and suggest optimal fibre content for recycled yarns.
- To give an overview of the global textile waste problem and recycling methods.
- To carry out tests with yarns of different fibre content.

There are two different recycling methods: mechanical and chemical. In the first case textile waste is shredded and in the second one it is depolymerized. This bachelor thesis concentrates on mechanical recycling which is suitable for recycling different fibres and their blends. Although it is hard to determine the exact fibre content of blends. This recycling method is characterized by the decrease of fibre length and increase of the fibre length distribution.

In this thesis fibre length, yarn linear density, twist, strength were measured and yarn evenness was estimated to study the properties of yarns. Yarns with different fibre content and structure were tested according to standards. A total of 17 yarns were tested, of which 14 were spun in University of Tartu Viljandi Culture Academy. Other three yarns were ordered from e-shop. Yarns contained different fibres: virgin and recycled cotton, virgin wool and polyester, recycled mixed fibres.

From testing results it appears that fibre origin, length, length spectrum and yarn evenness are very important properties to manufacture yarn. Yarn strength was improved with virgin and recycled polyester fibres. Wool fibres improved yarn elongation. Recycled fibres figure in a large fibre length distribution which affect yarn linear density, twist, strength and overall evenness. Testing results showed even yarn is one important factor that provides strong yarn.

Mechanically recycled fibres have short fibre length and worse quality, but from them it is possible to manufacture yarn when blending them with virgin fibres. In this thesis it was discovered that optimal recycled yarn fibre content is 70% recycled fibres and 30% additional fibres. After analysing cotton, wool, polyester fibre's properties and yarn testing results, it was found that polyester fibres are the best choice to blend with recycled fibres. Polyester fibres may be virgin and recycled.

Current thesis gave a great possibility to author to deep into textile waste topic and get to know textile materials that are used to make other textiles. Thesis showed that it is possible to manufacture yarn from recycled fibres. All aims of the bachelor thesis were achieved. It is possible to continue investigating current topic. Knitted fabrics are made from yarns, so it is possible to investigate properties of knitted fabric which is made from recycled yarns.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] IntechOpen, *Textile Wastes: Status and Perspectives*, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.intechopen.com/books/waste-in-textile-and-leather-sectors/textile-wastes-status-and-perspectives> Kasutatud: 10.02.2021
- [2] Keskkonnaministeerium, *Tekstiil ringlusse!*, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.envir.ee/et/tekstiilringlusse> Kasutatud: 06.05.2021
- [3] Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus, *Tekstiilkiudude nimetuste ja tekstiiltoodete kiukoostise märgistamise ja tähistamise kohta*, 2011. [Online]. Loetud aadressil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R1007&from=ET> Kasutatud: 30.05.2021
- [4] R. Sinclair, *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*. Cambridge: Elsevier Science & Technology, 2014. [E-book]. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/reader.action?docID=1838431&ppg=1> Kasutatud: 22.05.2021
- [5] D. Tuulik, *Õpiobjekt Sissejuhatus tekstiilmaterjaliõpetusse*, 2011. [Online]. Loetud aadressil: <https://eprints.ttkk.ee/id/eprint/154/1/index.html> Kasutatud: 12.02.2021
- [6] T. Cassidy ja G. Parikshit, *Textile and Clothing Design Technology*. CRC Press, 2018. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTCDT0006/textile-clothing-design/textile-clothing-design> Kasutatud: 22.05.2021
- [7] A. Palme, „Recycling of cotton textiles : Characterization, pretreatment, and purification,“ [Doktoridissertatsioon], Chalmersi Tehnikaülikool, Gothenburg, Rootsi, 2017. Loetud aadressil: <https://core.ac.uk/download/pdf/74356828.pdf> Kasutatud: 22.05.2021
- [8] A. Viikna, *Kiuteadus*. TTÜ Kirjastus, 2005.
- [9] Textile Exchange, „Preferred Fiber & Materials Market Report 2020“, 2020. [Online]. Loetud aadressil: https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2020/06/Textile-Exchange_PREFERRED-Fiber-Material-Market-Report_2020.pdf. Kasutatud: 15.02.2021
- [10] A. Rengel, „Recycled Textile Fibres and Textile Recycling“, 2017. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/wirtschaftskonsum/externe-studien-berichte/Recycled-Textile-Fibres-and-Textile-Recycling.pdf.download.pdf/study-on-recycled-textiles-and-textile-recyclability-ch.pdf> Kasutatud: 22.05.2021
- [11] M. Miao ja J. H. Xin, *Engineering of High-Performance Textiles*. Elsevier, 2018.

- [E-book]. Loetud aadressil:
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEHPT0003/engineering-high-performance/engineering-high-performance> Kasutatud: 22.05.2021
- [12] A. Das ja R. Alagirusamy, *Technical Textile Yarns - Industrial and Medical Applications*. Woodhead Publishing, 2010. [E-book]. Loetud aadressil:
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTTYIMA01/technical-textile-yarns/technical-textile-yarns> Kasutatud: 22.05.2021
- [13] A. Peterson, „Towards Recycling of Textile Fibers Separation and Characterization of Textile Fibers and Blends,” [Magistritöö], Chalmersi Tehnikaülikool, Gothenburg, Rootsi, 2015. Loetud aadressil:
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/218483/218483.pdf>.
 Kasutatud: 25.02.2021
- [14] A. Hein, *Õppematerjal Tekstiilkiud ja nende omadused*, 2010. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.tlu.ee/opmat/ku/MLT6040/index.html> Kasutatud: 12.02.2021
- [15] M. Clark, *Handbook of Textile and Industrial Dyeing, Volume 1 - Principles, Processes and Types of Dyes*. Woodhead Publishing, 2011. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHTIDVPP1/handbook-textile-industrial-2/handbook-textile-industrial-2> Kasutatud: 12.02.2021
- [16] B. C. Goswami, J. G. Martindale, ja F. L. Scardino, *Textile yarns: Technology, structure, and applications*. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- [17] P. R. Lord, *Handbook of Yarn Production: Technology, Science and Economics*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003.
- [18] K. Gandhi, (Ed.), *Woven textiles: Principles, Technologies and Applications*. Elsevier Science & Technology, 2019. [E-book]. Loetud aadressil:
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=5972516>
 Kasutatud: 22.05.2021
- [19] K. Amutha, *A Practical Guide to Textile Testing*. Woodhead Publishing India, 2016. [E-book]. Loetud aadressil:
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=4497398>
 Kasutatud: 20.03.2021
- [20] Y. Wang, *Recycling in textiles*. Cambridge: Woodhead, 2006.
- [21] A. Majumdar, A. Das, R. Alagirusamy, ja V. K. Kothari, *Process Control in Textile Manufacturing*. Elsevier Science & Technology, 2012. [E-book]. Loetud aadressil:
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=1574935>
 Kasutatud: 20.03.2021
- [22] Y. E. Elmogahzy, *Engineering Textiles - Integrating the Design and Manufacture*

- of Textile Products*, 2nd edition. Elsevier, 2020. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpETIDMTP2/engineering-textiles/engineering-textiles> Kasutatud: 12.02.2021
- [23] How Products Are Made, *Yarn*. [Online]. Loetud aadressil: <http://www.madehow.com/Volume-3/Yarn.html> Kasutatud: 19.05.2021
- [24] T. Plamus, *Aine Tekstiili- ja rõivamaterjalid loengumaterjal*, 2020.
- [25] B. P. Saville, *Physical Testing of Textiles*. Woodhead Publishing, 1999. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPTT00003/physical-testing-textiles/physical-testing-textiles> Kasutatud: 20.03.2021
- [26] J. G. Bralla, *Handbook of Manufacturing Processes - How Products, Components and Materials Are Made*. Industrial Press, 2007. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHMPHPCM1/handbook-manufacturing/handbook-manufacturing> Kasutatud: 22.05.2021
- [27] L. Aunaste, *Õmblusmaterjalid*. Tallinn: Valgus, 1973.
- [28] Y. Nawab, *Textile Engineering – An Introduction*. De Gruyter, 2016. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpTEAI0001/viewerType:toc/> Kasutatud: 22.05.2021
- [29] S. Rajendran, *Advanced Textiles for Wound Care*, 2nd ed. Elsevier, 2019. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpATWCE002/advanced-textiles-wound/advanced-textiles-wound> Kasutatud: 22.05.2021
- [30] Textile Apex, *A guide to Textile and Clothing. What Is Textile Waste | Definition, Meaning And Types*, 2018. [Online]. Loetud aadressil: <https://textileapex.blogspot.com/2018/12/what-is-textile-waste-definition.html> Kasutatud: 20.02.2021
- [31] Redress, *The Ecochic Design Award Sourcing Textile Waste*, 2014. [Online]. Loetud aadressil: https://static1.squarespace.com/static/582d0d16440243165eb756db/t/585a15a9bebafba69927c172/1482298805626/LEARN2014_Sourcing_ENG-07.pdf Kasutatud: 20.02.2021
- [32] Y. Wang, *Fiber and Textile Waste Utilization*, 2010. [Online]. Loetud aadressil: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-009-9005-y> Kasutatud: 28.02.2021
- [33] K. Le, „Textile Recycling Technologies, Colouring and Finishing Methods“, 2018. [Online]. Loetud aadressil: <https://static1.squarespace.com/static/579095c1b8a79bc4629250d1/5800bd2f6a4963389100302d/5800c0bdf7c5020f07d449> Kasutatud: 28.02.2021

- [34] Responsible Global Fashion LLC, *Tackling Textile Waste*, 2016. [Online]. Loetud aadressil: <http://www.responsibleglobalfashion.com/blog/2016/7/tackling-textile-waste> Kasutatud: 20.02.2021
- [35] Ellen MacArthur Foundation, *A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future*, 2017. [Online]. Loetud aadressil: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/A-New-Textiles-Economy_Full-Report.pdf Kasutatud: 18.05.2021
- [36] Euroopa Parlament, *Ringmajanduse tähendus, vajalikkus ja kasulikkus*, 2015. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.europarl.europa.eu/news/et/headlines/economy/20151201STO05603/ringmajanduse-tahendus-vajalikkus-ja-kasulikkus> Kasutatud: 20.02.2021
- [37] K. Shirvanimoghaddam, B. Motamed, S. Ramakrishna ja M. Naebe, *Death by waste: Fashion and textile circular economy case*, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720308275> Kasutatud: 20.02.2021
- [38] Ringmajandus, *Ringmajandus*. [Online]. Loetud aadressil: <https://ringmajandus.envir.ee/et/ringmajandus> Kasutatud: 20.02.2021
- [39] S. S. Muthu, *Circular Economy in Textiles and Apparel: Processing, Manufacturing and Design*. Elsevier Science & Technology, 2018. [E-book]. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=5589268> Kasutatud: 23.02.2021
- [40] European Environment Agency, *Textiles in Europe's circular economy*, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-in-europes-circular-economy> Kasutatud: 23.02.2021
- [41] European Commission, *Sustainable Products in a Circular Economy - Towards an EU Product Policy Framework contributing to the Circular Economy*, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/?fuseaction=list&coteId=10102&year=2019&number=91&version=ALL&language=en> Kasutatud: 23.02.2021
- [42] S. Björquist, „Separation for regeneration – Chemical recycling of cotton and polyester textiles,” [Magistritöö], Rootsi tekstiilikool, Boras, Rootsi, 2017. Loetud aadressil: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/249870/249870.pdf> Kasutatud: 25.02.2021
- [43] M. Shabbir, *Textiles and Clothing - Environmental Concerns and Solutions*. John Wiley & Sons, 2019. [E-book]. Loetud aadressil:

- <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTCECS008/textiles-clothing-environmental/textiles-clothing-environmental> Kasutatud: 22.02.2021
- [44] The Balance Small Business, *The Basics of Textile Recycling*, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.thebalancesmb.com/the-basics-of-recycling-clothing-and-other-textiles-2877780> Kasutatud: 27.02.2021
- [45] N. N. Mahapatra, *Textiles and Environment*. Woodhead Publishing India, 2015. [E-book]. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=5850067> Kasutatud: 27.02.2021
- [46] Ellen MacArthur Foundation, *Vision of a circular economy for fashion*, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Vision-of-a-circular-economy-for-fashion.pdf> Kasutatud: 23.02.2021
- [47] P. Fontell ja P. Heikkilä, *Model for circular economy in textiles*, 2017. [Online]. Loetud aadressil: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/model-of-circular-business-ecosystem-for-textiles-11-2017.pdf> Kasutatud: 14.03.2021
- [48] S. S. Muthu, *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Elsevier, 2015. [E-book]. Loetud aadressil: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHLCALCA1/handbook-life-cycle-assessment/handbook-life-cycle-assessment> Kasutatud: 28.02.2021
- [49] Cattermole Consulting INC, *Fiber recycling using mechanical and chemical processes*, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.cattermoleconsulting.com/fiber-recycling-using-mechanical-and-chemical-processes/> Kasutatud: 29.02.2021
- [50] Medium, *Textile Waste — Resource or Trash?*, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://medium.com/@stonev/textile-waste-resource-or-trash-151114d1fcff> Kasutatud: 27.02.2021
- [51] S. Roos jt, „White paper on textile recycling”, [Raport], Stockholm, Roots, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <http://mistrafuturefashion.com/wp-content/uploads/2019/10/S.-Roos.-White-paper-on-textile-recycling.-Mistra-Future-Fashion.pdf> Kasutatud: 28.02.2021
- [52] GREENBLUE, „Chemical Recycling: Making Fiber-to-Fiber Recycling a Reality for Polyester Textiles”, 2017. [Online]. Loetud aadressil: <http://greenblue.org/work/chemical-recycling/> Kasutatud: 27.02.2021
- [53] S. S. Muthu, *Textiles and Clothing Sustainability: Recycled and Upcycled Textiles and Fashion*. Springer Singapore Pte. Limited, 2016. [E-book]. Loetud aadressil:

- <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=4627969>
Kasutatud: 27.02.2021
- [54] A. Telli ja O. Babaarslan, „Usage of recycled cotton and polyester fibers for sustainable staple yarn technology“, [Uuring], Cukurova ülikool, Adana, Türgi 2017. Loetud aadressil: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/345775> Kasutatud: 23.05.2021
- [55] S. Uyanık, „A study on the suitability of which yarn number to use for recycle polyester fiber“, [Uuring], Gaziantep ülikool, Gasiantepe, Türgi, 2019. Loetud aadressil: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00405000.2018.1550889> Kasutatud: 23.05.2021
- [56] A. Demiroz Gun ja E. Oner, „Investigation of the quality properties of open-end spun recycled yarns made from blends of recycled fabric scrap wastes and virgin polyester fibre“, [Uuring], Usak ülikool, Usak, Türgi, 2019. Loetud aadressil: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00405000.2019.1608620> Kasutatud: 23.05.2021
- [57] M. E. Yuksekkaya, G. Celep, G. Dogan, M. Tercan, ja B. Urhan, „A comparative study of physical properties of yarns and fabrics produced from fresh and recycled fibres“, [Uuring], Usak ülikool, Usak, Türgi, 2016. Loetud aadressil: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/155892501601100209> Kasutatud: 23.05.2021
- [58] A. K. Samanta, „Effect of blend ratio on yarn evenness and imperfections characteristics of wool / polyester ring-spun yarn“, [Uuring], India, 2014. Loetud aadressil: <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-blend-ratio-on-yarn-evenness-and-of-wool-Samanta/b95160467deaf7b1032aab8b184670a7486f683f> Kasutatud: 23.05.2021
- [59] V. Sangannavar ja K. Sannapapa, „Effect of blend ratio on physical properties of pure UAS sheep breed wool/ recycled-polyethylene terephthalate blended yarns“, [Uuring], Karnataka, India, 2017. Loetud aadressil: <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-blend-ratio-on-physical-properties-of-UAS-Sangannavar-Sannapapa/e225a0c9c9c13d95f5c1fdc00792c771d4e2fbff> Kasutatud: 23.05.2021
- [60] H. Meena, D. Shakyawar, ja R. Varshney, „Tensile and Frictional Properties of Wool-Cotton Union Khadi Fabrics“, [Uuring], India, 2019. Loetud aadressil: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15440478.2019.1568348> Kasutatud: 23.05.2021

- [61] E. Sarioglu, „Ecological Approaches in Textile Sector: The Effect of r-PET Blend Ratio on Ring Spun Yarn Tenacity“, [Uuring], Gaziantep ülikool, Gaziantep, Türgi, 2017. Loetud aadressil:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Ecological-Approaches-in-Textile-Sector%3A-The-Effect-Sar%C4%B1o%C4%9Flu/e44d02fb34d810d4a27d4dcfd80983acdb7af07c>
 Kasutatud: 23.05.2021
- [62] European Outdoor Group ja Greenroom Voice, *Recycled wool*, 2018. [Online].
 Loetud aadressil: https://global-uploads.webflow.com/5ed628f951e6c112227290bb/5f3819d90d27c906a6a13208_FINAL%20-%20EOG%20Recycled%20Wool%20Report.pdf Kasutatud: 23.05.2021
- [63] A. Helal, R. Agamy, A. Allah, ja E. Al-Betar, „Effect of a Subjective Grading System and Blending with Polyester on Selected Wool and Yarn Characteristics of Subtropical Egyptian Barki Sheep“, [Uuring], Egiptus, 2019. Loetud aadressil:
https://www.researchgate.net/publication/336924624_Effect_of_a_Subjective_Grading_System_and_Blending_with_Polyester_on_Selected_Wool_and_Yarn_Characteristics_of_Subtropical_Egyptian_Barki_Sheep Kasutatud: 23.05.2021
- [64] W. Béchir, B. H. Mohamed, ja A. Béchir, „Industrial cotton waste: Recycling, reclaimed fiber behavior and quality prediction of its blend“, [Uuring], Taibah Ülikool, Mediina, Saudi Araabia, 2018. Loetud aadressil:
<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/451241> Kasutatud: 23.05.2021
- [65] *Tekstiil. Standardkeskkond konditsioneerimiseks ja testimiseks*, EVS-EN ISO 139:2005/A1:2011, EVS. [Online]. Loetud aadressil:
<https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-139-2005-a1-2011> Kasutatud: 06.03.2021
- [66] *Textile fibres - Determination of length and length distribution of staple fibres (by measurement of single fibres)*, ISO 6989:1981. [Online]. Loetud aadressil:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4534213/mod_folder/content/0/Exper%C3%AAncia%201%20-%20comprimento%20fibras/norma_iso_determinacao_comprimento_fibra.pdf?forcedownload=1 Kasutatud: 18.03.2021
- [67] *Standard Test Method for Length and Length Distribution of Manufactured Staple Fibers (Single-Fiber Test)*, ASTM D 5103 - 01. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, 2004.
- [68] *Tekstiilikiud. Joontiheduse määramine. Gravimeetiline ja vibroskoopiline meetod*, EVS-EN ISO 1973:2000, EVS. [Online]. Loetud aadressil:
<https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-1973-2000> Kasutatud: 30.10.2020
- [69] *Textile fibres - Determination of breaking force and elongation at break of*

- individual fibres*, EVS-EN ISO 5079:2020, EVS. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-5079-2020> Kasutatud: 28.03.2021
- [70] *Textile fibres - Some methods of sampling for testing*, ISO 1130:1975. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, 1975.
- [71] *Textiles - Universal system for designating linear density (Tex System)*, ISO 1144:2016, EVS. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/iso-1144-2016> Kasutatud: 09.03.2021
- [72] *Tekstiil. Lõng pakmelt. Joontiheduse (massi pikkusühiku kohta) määramine vihimeetodiga*, EVS-EN ISO 2060:2000, EVS. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-2060-2000> Kasutatud: 09.03.2021
- [73] *Textiles - Determination of twist in yarns - Direct counting method*, EVS-EN ISO 2061:2015, EVS. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-2061-2015> Kasutatud: 09.03.2021)
- [74] Standard Test Method for Grading Spun Yarns for Appearance, ASTM D 2255 – 02. [Online]. Loetud aadressil: <http://file.yzimgs.com/175706/2012013011094596.pdf> Kasutatud: 26.04.2021
- [75] *Textiles – Unevenness of textile strands – Capacitance method*, ISO 16549:2004. [Online]. Loetud aadressil: https://www.kebs.org/images/standards/systematic_review_standards/2019/November_2019/KS-ISO_16549_2004.pdf Kasutatud: 26.04.2021
- [76] *Textiles - Yarns from packages - Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester*, EVS-EN ISO 2062:2010, EVS. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-2062-2010> Kasutatud: 20.03.2021
- [77] Pietro Ramella & C. Veebileht, *Our products*. [Online]. Loetud aadressil: <http://www.ramella.com/> Kasutatud: 02.05.2021
- [78] DROPS Design veebileht, *DROPS Lõngasordid*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.garnstudio.com/yarns.php?cid=29> Kasutatud: 18.10.2020
- [79] Quick Quality Measuring, *Yarn Appearance Board Winder*, 2012. [Online]. Loetud aadressil: <http://www.qqm.cz/planiskop.html> Kasutatud: 02.05.2021

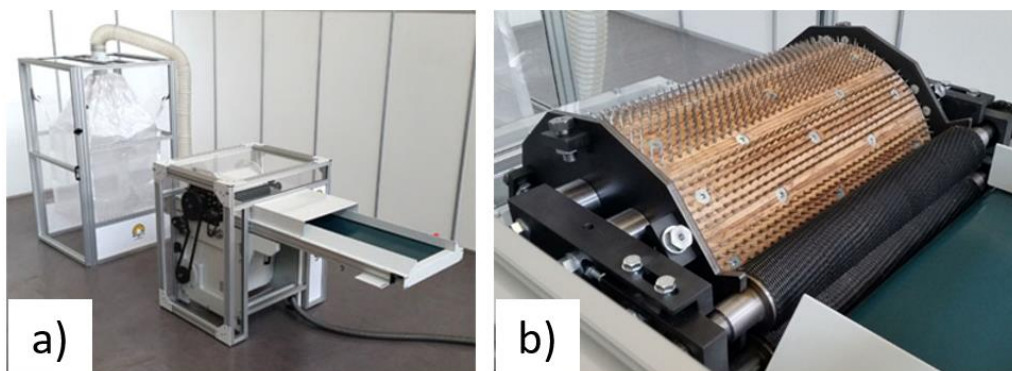
LISAD

Lisa 1 Kaubandusest soetatud lõngade maksumus

Tabel 5.3 DROPS Design kaubandusest tellitud lõngad [78]

Lõnga nimi	Lõnga värv	Kaal	Kogus, tk	Hind, €
DROPS Paris Denim	Kulunud sinine	50 g	1	1,04
DROPS ♥ You 6	Lilla	50 g	1	0,83
DROPS ♥ You 7	Valge	50 g	1	0,83
			KOKKU	2,7

Lisa 2 Viljandi Kultuuriakadeemias lõnga ketramiseks kasutatavad seadmed



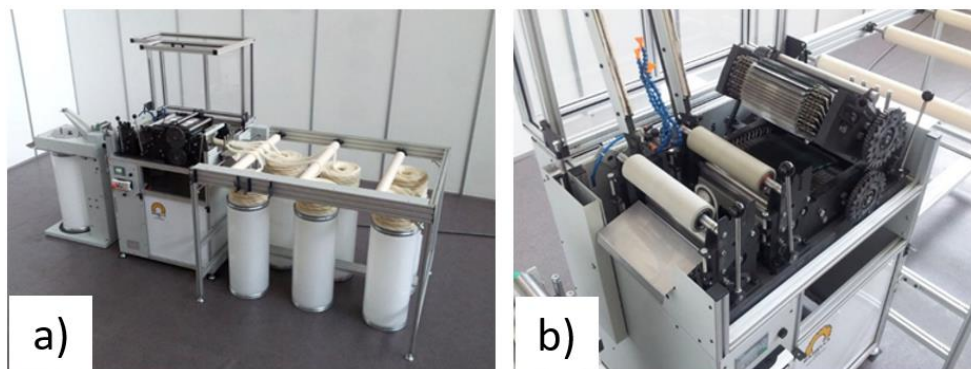
Joonis 5.9 Ramella villahunt: väljast (a), seest (b) [77]



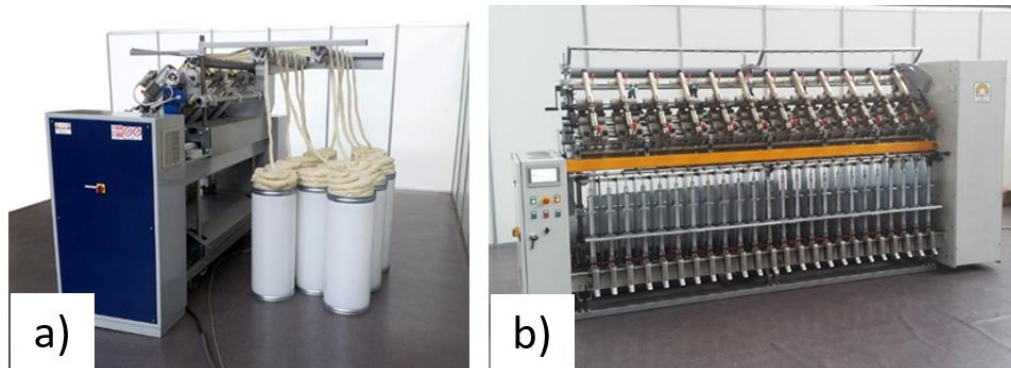
Joonis 5.10 Ramella kraasimismasin [77]



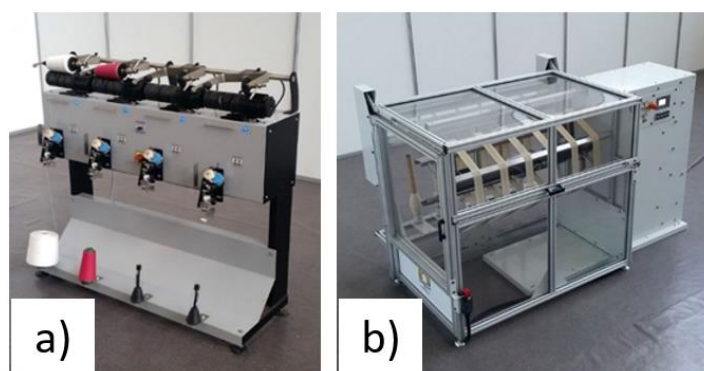
Joonis 5.11 Ramella taru kraas- ja heidelindi kogumiseks ning transportimiseks [77]



Joonis 5.12 Ramella kammimismasin: väljast (a), seest (b) [77]

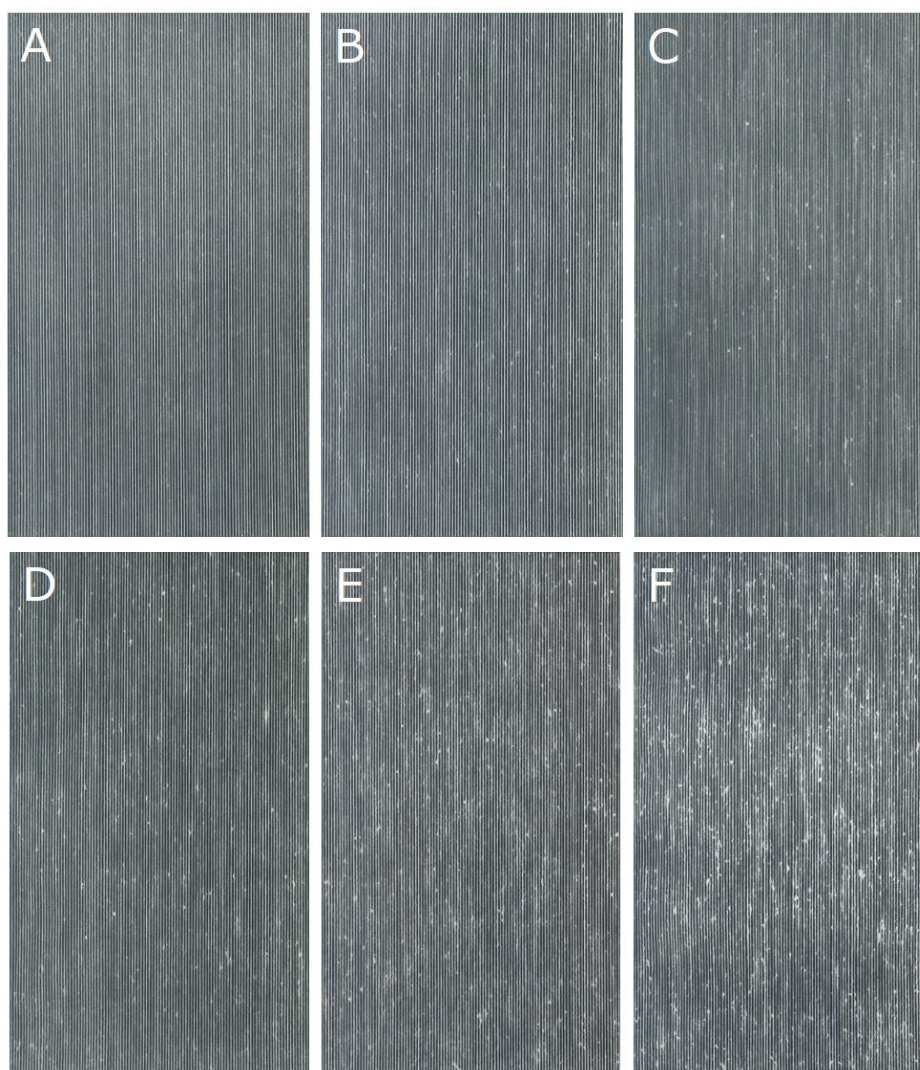


Joonis 5.13 Ramella ketrusseade: tagantvaade (a), eestvaade (b) [77]



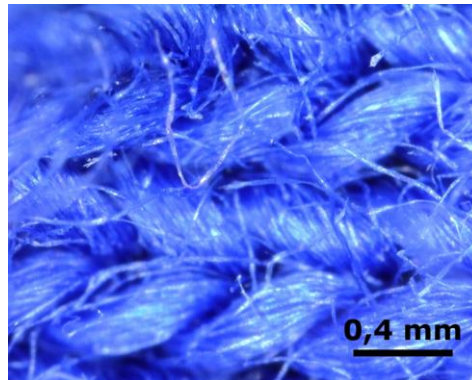
Joonis 5.14 Ramella kerimismasinad: poolija (a), vihimasin (b) [77]

Lisa 3 Lõngade ühtluse määramise etalonfotod

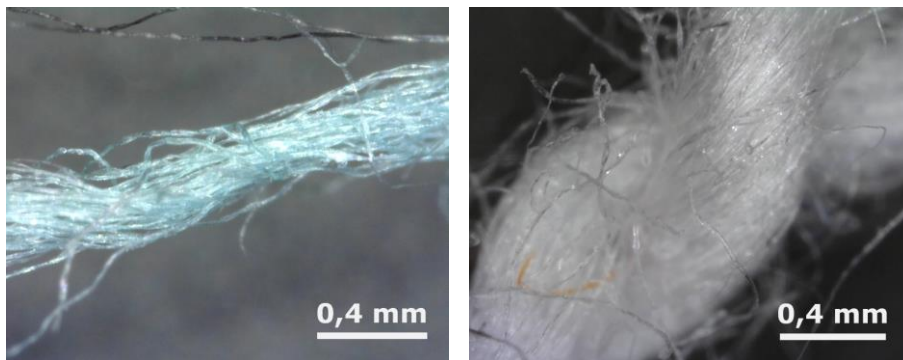


Joonis 5.15 ASTM D2255-02 lõnga ühtluse standardpildid koos hinnetega [79]

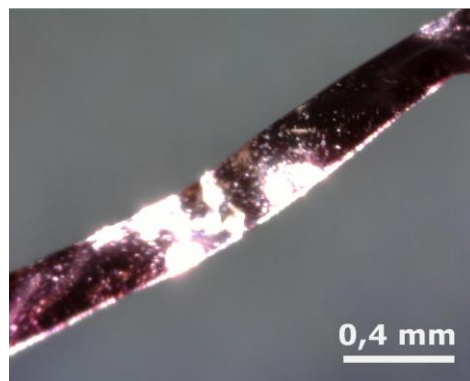
**Lisa 4 Digitaalse mikroskoobi fotod tekstiilmaterjalide tükkidest
ümbertööteldud kiududes**



Joonis 6.15 Ümbertööteldud puuvillakiudude hulgast leitud trikotaaži struktuuriga kangatükk

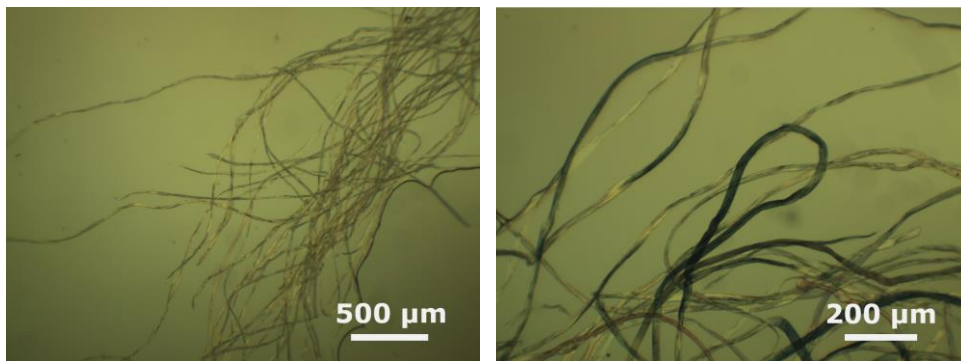


Joonis 6.16 Ümbertööteldud puuvillakiudude hulgast leitud erineva jämedusega lõngajupid



Joonis 6.17 Ümbertööteldud segakiudude hulgast leitud lõng ja metalliseeritud riba

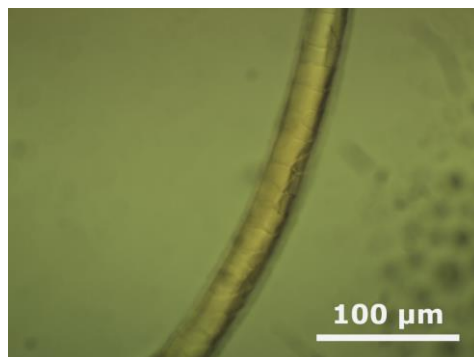
Lisa 5 Valgusmikroskoobi fotod ümbertöödeldud kiududest



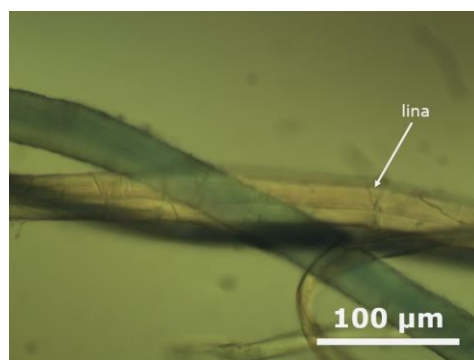
Joonis 6.18 Ümbertöödeldud puuvillakiud 40-kordse ja 100-kordse suurendusega



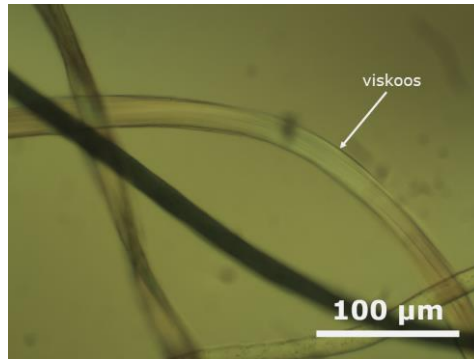
Joonis 6.19 Ümbertöödeldud segakiud 40-kordse suurendusega



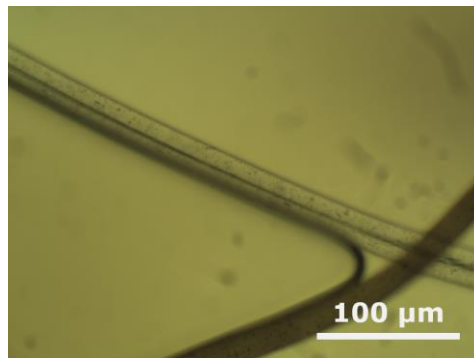
Joonis 6.20 Ümbertöödeldud segakiudude hulgast tuvastatud villakiud 400-kordse suurendusega



Joonis 6.21 Ümbertöödeldud segakiudude hulgast tuvastatud linakiud 400-kordse suurendusega



Joonis 6.22 Ümbertöödeldud segakiudude hulgast tuvastatud viskooskiud 400-kordse suurendusega



Joonis 6.23 Ümbertöödeldud segakiudude hulgast tuvastatud sünteetiline kiud 400-kordse suurendusega

Lisa 6 Kiudude pikkused

Tabel 6.4 Mõõdetud kiudude pikkused

	Kiudude hulk				Kaubandusest soetatud lõngad			
	CO	PES	üCO	üMIX	Valge	Lilla	Lilla lisatud kiud	Sinine
Kiu nr	Kiu pikkus, mm							
1	30,5	47,0	9,0	25,0	25,5	20,0	35,5	31,0
2	26,5	50,0	11,0	18,5	26,5	10,0	39,0	11,5
3	20,0	46,5	14,0	31,0	13,0	18,0	38,5	19,0
4	18,0	51,0	7,0	22,0	22,0	25,0	36,0	38,0
5	20,5	50,0	24,0	18,0	19,5	8,0	40,0	15,0
6	31,0	51,0	11,0	5,0	15,5	19,0	36,0	25,0
7	29,0	49,5	11,0	16,0	36,0	9,0	33,0	13,5
8	26,0	50,5	14,0	24,0	25,0	7,0	24,0	15,0
9	28,0	48,5	8,0	5,5	33,5	21,0	23,5	22,5
10	21,5	54,0	4,0	12,5	28,0	16,5	37,0	10,0
11	25,0	51,0	11,0	6,0	24,0	17,0	17,5	6,0
12	19,0	51,0	18,5	10,0	31,0	10,0	31,0	18,0
13	19,5	49,0	9,5	22,0	32,0	7,0	38,0	34,0
14	24,0	50,5	10,5	18,5	23,5	12,0	35,5	7,5
15	27,5	51,0	5,0	11,0	24,0	8,0	39,0	22,0
16	22,5	51,0	6,0	14,0	22,0	17,5	34,5	6,5
17	30,0	50,5	15,0	16,0	31,0	12,0	38,5	19,0
18	29,0	51,5	26,0	27,0	17,5	16,5	36,0	22,5
19	30,5	52,0	5,0	25,0	26,0	11,5	38,0	10,0
20	28,5	51,0	6,5	17,0	17,0	18,0	35,5	6,0
21	25,0	51,0	3,5	20,0	23,0	18,5	37,0	35,5
22	21,5	46,0	5,0	9,0	23,0	21,0	36,0	9,0
23	24,0	52,0	13,0	16,0	21,0	15,0	35,5	18,0
24	20,5	51,5	15,0	11,0	25,5	30,0	40,0	28,5
25	32,5	48,5	8,0	13,0	30,0	22,0	38,0	19,5
26	30,0	49,5	19,0	24,0	31,0	10,5	36,0	7,0
27	25,5	44,0	7,0	21,5	26,0	18,5	33,0	12,0
28	23,0	50,0	9,0	15,0	23,0	12,0	34,5	39,5
29	21,0	47,0	5,5	27,0	25,0	5,5	36,0	33,0
30	16,0	50,5	13,0	21,0	29,5	6,5	31,0	18,0
31	20,0	49,0	26,0	24,5	23,0	21,0	37,0	7,5
32	39,0	51,5	20,5	9,5	30,0	19,0	39,5	9,0
33	24,5	53,0	4,0	47,0	29,0	9,0	38,0	6,5
34	22,0	52,5	4,5	12,0	30,5	13,0	33,0	34,5
35	27,0	51,0	12,0	14,5	28,5	5,0	35,0	15,0
36	30,0	48,0	4,5	43,0	13,5	12,5	38,5	5,0
37	22,5	53,0	5,0	27,5	34,0	13,5	36,5	38,0
38	23,5	54,0	5,0	18,0	18,0	9,0	39,5	20,5
39	15,0	48,5	3,0	21,5	18,5	23,5	36,0	36,0

Tabel 6.4 järg

	Kiudude hulk				Kaubandusest soetatud lõngad			
	CO	PES	üCO	üMIX	Valge	Lilla	Lilla lisatud kiud	Sinine
Kiu nr	Kiu pikkus, mm							
40	26,0	50,5	13,0	12,0	16,0	9,5	35,0	9,0
41	25,0	50,0	6,0	8,0	29,0	11,0	37,5	31,5
42	28,5	51,0	10,0	14,0	34,5	10,0	38,0	26,5
43	31,0	53,0	2,0	33,0	33,0	18,0	30,0	34,5
44	29,5	49,0	5,5	20,5	29,5	37,0	41,0	22,0
45	18,5	46,0	16,0	18,0	19,0	16,5	37,5	32,5
46	21,0	47,0	10,5	47,0	20,0	8,5	35,0	34,0
47	19,0	54,0	11,0	37,0	26,0	19,0	33,5	9,0
48	29,0	50,5	16,0	20,0	26,5	17,5	36,0	8,5
49	18,0	49,0	23,0	29,5	24,0	7,5	27,0	21,5
50	31,5	52,0	9,0	18,0	19,0	18,5	38,5	7,5
Keskmine	24,92	50,18	10,61	19,92	25,02	14,82	35,3	19,61
Standard-hälve	4,99	2,18	6,13	9,72	5,73	6,52	4,47	10,85

Lisa 7 Lõngade joontihedus

Tabel 6.5 Lõngade joontiheduse katsetulemused

Lõnga koostis	Lõnga kordsus	Joontihedus, tex				
		1	2	3	Keskmine	Standardhälve
100% CO	1x	150,25	131,1	128,2	136,52	11,98
100% CO	2x	283,21	293,44	293,51	290,05	5,93
50% CO 50% PES	1x	157,82	153,48	139,08	150,13	9,81
50% CO 50% PES	2x	302,92	284,46	297,52	294,97	9,49
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	1x	194,87	215,64	174,6	195,04	20,52
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	Jämedam 1x	103,09	128,89	139,53	123,84	18,74
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	2x	416,78	405,81	461,77	428,12	29,65
50% CO 50% üCO	2x	442,13	398,74	387,39	409,42	28,89
50% üCO 50% WO	1x	220,93	234,98	190,57	215,49	22,7
50% üCO 50% WO	Jämedam 1x	350,42	346,89	366,82	354,71	10,64
50% üCO 50% WO	2x	379,74	419,46	372,74	390,65	25,2
50% üCO 50% WO	Jämedam 2x	793,16	838,37	774,87	802,13	32,69
35% CO 35% üCO 30% WO	1x	216,56	228,83	229,01	224,8	7,14
35% CO 35% üCO 30% WO	2x	430,85	456,83	417,54	435,07	19,98
100% CO	4x	306,12	295,64	301,39	301,05	5,25
100% üCO	5x	420,72	435,33	424,93	426,99	7,52
100% üCO	9x	794,15	781,17	794,77	790,03	7,68

Lisa 8 Lõngade keerdumus

Tabel 6.5 Lõngade keerdumused katsetulemused

Lõnga koostis	Lõnga kordsus	Keerdumus, keerdu/m					Keskmine	Standardhävle
		1	2	3	4	5		
100% CO	2x	142,8	158,4	157,6	156	152,8	153,52	6,36
50% CO 50% PE	2x	160,8	158	144,8	162	150,8	155,28	7,3
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	2x	153,6	135,6	148	148	154,8	148	7,61
50% CO 50% üCO	2x	138,8	146,4	160,8	156	200,4	160,48	23,89
50% üCO 50% WO	2x	131,2	137,6	166	111,2	149,6	139,12	20,48
50% üCO 50% WO	Jämedam 2x	148,4	125,6	167,6	138,4	159,6	147,92	16,68
35% CO 35% üCO 30% WO	2x	125,6	126,8	151,6	155,6	168,8	145,68	18,89
100% CO	4x	152,4	147,6	138,8	132,8	131,6	140,64	9,13
100% üCO	5x	91,2	92	96	92,8	90,4	92,48	2,16
100% üCO	9x	62,4	56	62,8	70,8	58,8	62,16	5,58

Lisa 9 Lõngade mehaanilised omadused

Tabel 6.6 Lõngade sitkuse katsetulemused

Lõnga koostis	Lõnga kordsus	Sitkus, cN/tex					Keskmine	Standardhälve
		1	2	3	4	5		
100% CO	1x	2,73	4,07	1,19	3,10	3,53	2,92	1,09
100% CO	2x	6,82	5,82	7,68	8,88	6,68	7,18	1,16
50% CO 50% PES	1x	14,17	14,36	16,06	16,59	16,58	15,55	1,20
50% CO 50% PES	2x	14,60	14,46	15,64	14,27	13,90	14,57	0,65
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	1x	5	4,83	5,03	3,83	3,63	4,46	0,68
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	Jämedam 1x	3,87	3,54	3,86	4,68	5,57	4,30	0,82
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	2x	8,10	5,18	6,39	8,22	6,76	6,93	1,27
50% CO 50% üCO	2x	1,96	3,24	3,53	4,03	2,79	3,11	0,78
50% üCO 50% WO	1x	1,03	1,88	1,93	2,95	2,36	2,03	0,71
50% üCO 50% WO	Jämedam 1x	3,49	3,70	3,86	4,50	3,42	3,80	0,43
50% üCO 50% WO	2x	2,62	3,63	3,08	3,96	4,85	3,63	0,86
50% üCO 50% WO	Jämedam 2x	2,78	3,86	4,22	4,89	3,95	3,94	0,76
35% CO 35% üCO 30% WO	1x	1,66	1,97	1,18	0,91	4,03	1,95	1,23
35% CO 35% üCO 30% WO	2x	3,32	5,05	4,71	3,92	3,44	4,09	0,77
100% CO	4x	11,95	12,21	13,80	13,55	12,45	12,79	0,83
100% üCO	5x	8,43	8,72	8,45	8,64	8,76	8,60	0,15
100% üCO	9x	6,14	6,24	6,31	6,14	6,38	6,24	0,11

Tabel 6.7 Lõngade pikenemise katsetulemused

Lõnga koostis	Lõnga kordsus	Pikenemine, %					Keskmine	Standardhälve
		1	2	3	4	5		
100% CO	1x	6,19	6,44	4,17	6,51	6,99	6,06	1,08
100% CO	2x	8,57	6,58	7,38	8,25	7,19	7,59	0,81
50% CO 50% PES	1x	20,52	19,88	19,92	21,28	20,4	20,4	0,57
50% CO 50% PES	2x	23,71	20,77	22,91	21,04	20,85	21,86	1,36
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	1x	15,18	18,23	12,65	9,7	7,32	12,61	4,32

Tabel 6.7 järg

Lõnga koostis	Lõnga kordsus	Pikenemine, %						
		1	2	3	4	5	Keskmine	Standardhälve
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	Jämedam 1x	10,55	12,2	13,06	13,45	11,23	12,10	1,22
30% CO 30% üMIX 10% PES 30% WO	2x	13,09	11,20	12,12	14,59	13,87	12,98	1,35
50% CO 50% üCO	2x	6,79	7,49	7,6	8,94	7,52	7,67	0,78
50% üCO 50% WO	1x	7,81	10,4	12,04	11,6	8,14	10	1,94
50% üCO 50% WO	Jämedam 1x	16,76	12,61	12,94	15,22	11,78	13,86	2,06
50% üCO 50% WO	2x	12,31	12,99	13,34	12,33	15,27	13,25	1,21
50% üCO 50% WO	Jämedam 2x	17,88	21,34	21,51	22,46	22,06	21,05	1,83
35% CO 35% üCO 30% WO	1x	7,31	6,7	4,88	5	6,7	6,12	1,1
35% CO 35% üCO 30% WO	2x	7,89	13,06	8,34	8,19	7,77	9,05	2,25
100% CO	4x	11,56	13,5	13,46	12,6	13,91	13,01	0,94
100% üCO	5x	14,33	14,46	13,67	14,68	14,14	14,25	0,38
100% üCO	9x	12,65	14	13,31	12,97	13,01	13,19	0,51