



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

ÜMBERTÖÖDELDUD TEKSTIILKIUDUDE KASUTAMINE PLASTKOMPOSIITMATERJALIDE VALMISTAMISEKS

USE OF RECYCLED TEXTILE FIBRES FOR THE PRODUCTION OF PLASTIC COMPOSITE MATERIALS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Marianne Murd

Üliõpilaskood: 186019 EANB

Juhendaja: Tiia Plamus, vanemlektor

Kaasjuhendaja: Illia Krasnou, teadur

Tallinn 2021

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.

1. juuni 2021

Autor:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

1. juuni 2021

Juhendaja:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."2021

Kaitsmiskomisjoni esimees: Tiia Plamus

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Marianne Murd

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ümbertöödeldud tekstiilkiudude kasutamine plastkomposiitmaterjalide valmistamiseks“,

mille juhendaja on Tiia Plamus ja kaasjuhendaja on Illia Krasnou,

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.

1. juuni 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 loomingu 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: Marianne Murd, 186019
Õppekava, peeriala: Materjalitehnoloogia, EANB
Juhendaja: Tiia Plamus, vanemlektor, tel +372 56211653.
Kaasjuhendaja: Illia Krasnou, teadur, tel +372 6202906.

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Ümbertöödeldud tekstiilkiudude kasutamine plastkomposiitmaterjalide valmistamiseks

(inglise keeles) Use of recycled textile fibres for the production of plastic composite materials

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida, kuidas erinevad ümbertöödeldud tekstiilkiud mõjutavad plastkomposiitmaterjalide omadusi.
2. Võimalike kasutusvaldkondade leidmine ümbertöödeldud tekstiilkiududest plastkomposiitmaterjalidele.
3. Anda ülevaade tekstiilmaterjalidega seotud probleemidest ning praegustest lahendustest.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tekstiilmaterjalide probleemistiku ja praeguste lahenduste uurimine	01.03.21
2.	Ülevaade tekstiilmaterjalide ümbertöötlemisest	15.03.21
3.	Uurida varasemalt tehtud tekstiilmaterjalidega plastkomposiite	31.03.21
4.	Tekstiilmaterjalide hankimine katselise osa jaoks	31.03.21
5.	Töös kasutatavate tekstiilmaterjalide struktuuri, kiulise koostise ja pindtiheduse määramine	05.04.21
6.	Komposiitmaterjalide valmistamine	19.04.21
7.	Valmistatud komposiitmaterjalide omaduste uurimine	03.05.21
8.	Lõputöö eksperimentaalse osa kirjeldus ning tulemuste analüüs ja järeldused	17.05.21
9.	Lõputöö täiendamine, parandamine ning esitamine	01.06.21

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 1. juuni 2021

Üliõpilane: Marianne Murd 1. juuni 2021
/allkiri/

Juhendaja: Tiia Plamus 1. juuni 2021
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Illia Krasnou 1. juuni 2021
/allkiri/

Programmijuht: Tiia Plamus 1. juuni 2021
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	8
Terminoloogia	9
1. SISSEJUHATUS.....	10
2. ÜLEVAADE TEKSTIILMATERJALIDE PROBLEEMISTIKUST NING KASUTATUD RÕIVASTE JA TEKSTIILIDE SORTEERIMISEST	12
2.1 Tekstiiltoodete liigitus.....	13
2.2 Kasutatud rõivaste ja tekstiilide kogumine ja sorteerimine Eestis	14
2.3 Tekstiilkiudude määramise meetodid	17
2.4 Kasutatud tekstiilmaterjalide sorteerimise viisid.....	19
2.4.1 Käsitsi sorteerimine	19
2.4.2 Poolautomaatne sorteerimine.....	20
2.4.3 NIR-sorteerimine.....	20
2.4.4 RFID kasutamine sorteerimisel	21
3. TEKSTIILMATERJALIDE ÜMBERTÖÖTLEMINE	23
3.1 Mehaaniline ja keemiline ümbertöötlemine.....	23
3.2 Peamised tekstiilmaterjalide ümbertöötlust takistavad tegurid	24
3.3 Ümbertöödeldud tekstiilmaterjalide kasutusvaldkonnad	26
4. ÜMBERTÖÖDELDUD TEKSTIILKIUDUDE KASUTAMINE KOMPOSIITMATERJALIDES	27
4.1 Ümbertöödeldud tekstiilkiudude kasutamine plastkomposiitmaterjalides	27
4.2 Ümbertöödeldud tekstiilmaterjalidega plastkomposiitide valmistamine.....	29
4.3 Tekstiilkiudude omadused	30
4.4 Tekstiilmaterjalide omadused	31
4.5 Komposiitmaterjalide omadused	32
4.6 Plastkomposiitmaterjalide kasutusvaldkonnad	33
5. KATSELISE OSA KIRJELDUS	35
6. KASUTATUD MATERJALID JA MEETODID	37
6.1 Kasutatud materjalid.....	37
6.2 Kasutatud meetodid ja seadmed.....	38
6.2.1 Tekstiilmaterjalide struktuuri, kiulise koostise ja pindtiheduse määramine	38
6.2.2 Komposiitmaterjalide valmistamine.....	40
6.2.3 Valmistatud komposiitmaterjalide uurimine.....	44
7. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	45
7.1 Tekstiilmaterjalide struktuuri määramine	45
7.2 Tekstiilkiudude tuvastamine	46

7.2.1 FTIR-analüüs	49
7.3 Tekstiilmaterjalide pindtihedus	49
7.4 Komposiitmaterjalide valmistamine	50
7.5 Purustatud kiudude mõõtmed	54
7.6 Komposiitmaterjalide absorptsioonikatse	57
7.7 Kiudude jaotumine komposiitmaterjalis	59
8. JÄRELDUSED	66
8.1 Tekstiilmaterjalide uurimine	66
8.2 Komposiitmaterjalide valmistamine	66
8.3 Komposiitmaterjalide uurimine	67
8.4 Ümbertöödeldud tekstiilkiududega komposiitmaterjalide kasutusvaldkonnad ...	68
KOKKUVÕTE	69
SUMMARY	71
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	73
LISAD	77
LISA 1 Tekstiilkiudude omadused	77
LISA 2 FTIR-analüüsi tulemused.....	80
LISA 3 Pindtiheduse arvutamise lähteandmed	82
LISA 4 Purustatud tekstiilkiudude fotod	85
LISA 5 Purustatud tekstiilkiudude mõõtmed	87
LISA 6 Absorptsioonikatse algandmed ja vahetulemused	90

EESSÕNA

Bakalaureusetöös uuriti olemasolevaid lahendusi tekstiilmaterjalide ümbertöötlemise ja taaskasutamise kohta. Samuti uuriti erinevaid võimalusi tekstiilmaterjalide kasutamiseks komposiitmaterjalides. Lõputöös valmistati ümbertöödeldud tekstiilkiududega plastkomposiitmaterjalid ning analüüsi nende omadusi. Samuti pakuti välja võimalikud kasutusvaldkonnad valminud materjalidele.

Käesoleva bakalaureusetöö teema algatati Tallinna Tehnikaülikooli poolt, lõputöö pealkiri sõnastati materjalitehnoloogia programmijuhi abiga. Antud töö eksperimentaalse osa andmed koguti TalTechi laborites läbi viidud katsetel. Töö valmimisele aitas kaasa MTÜ Uuskasutuskeskus, kelle abiga leiti sobivad tekstiilmaterjalid komposiitmaterjalide valmistamiseks. Bakalaureusetöö koostamisel olid suureks abiks töö juhendajad: eriline tänuavaldus Tiia Plamusele ja Illia Krasnoule.

Võtmesõnad: tekstiilijäätmed, tekstiilmaterjalide taaskasutus, komposiitmaterjal, bakalaureusetöö.

Terminoloogia

Korduskasutus – mis tahes toiming, mille käigus tooteid või tootekomponente, mis ei ole jäätmed, kasutatakse uuesti nende esialgsel otstarbel [1].

Taaskasutus – on jäätmete ümbertöötamine toormaterjaliks ja seekaudu nende uus kasutuselevõtt; vana asja kasutuselevõtt (ühtlasi seda kohendades ja disainides), asjade uuesti kasutamine [2].

Ringlussevõtt – jäätmete taaskasutus, mille korral jäätmetes sisalduvat ainet kasutatakse tootmises esialgsel või muul otstarbel [3].

Tekstiilmaterjal – kiududest (lõngast, niidist) valmistatud materjal, nt riie ja vilt [4].

Tekstiiltooted – igasugused töötlemata tooted, osaliselt töödeldud tooted, töödeldud tooted, pooltooted, valmistooted, poolvalmis või valmis õmblustooted, mis koosnevad ainult tekstiilkiududest, olenemata kasutatud segamis- või ühendusmenetlusest [5].

Tekstiilkiud – saadus, mida iseloomustab painduvus, peenus ja suurima laiusmõõduga võrreldes suur pikkus ning mis seega on sobiv tekstiiltoodete valmistamiseks [5].

Jäätmed – ehk prügi on kasutuselt kõrvaldatud ained, esemed või nende jäägid [6].

Komposiitmaterjal – kahest või enamast faasist (osast) koosnev materjal, kusjuures üks faasidest on kõva ja tugev, teine plastne ja elastne; heterogeenne tehismaterjal, mille omadused erinevad lähtekomponentide (maatriks ja armatuur) omadustest [7].

Maatriks – komposiitmaterjali (polüfaasilise materjali) pidevfaas – struktuuriosa, milles asuvad teised faasid/struktuuriosad (nt kiud, täitematerjal) [8].

Sarrus – ehk armatuur on komposiitmaterjali tugevdav faas, mis eelkõige võtab vastu tõmbekoormusi [9].

1. SISSEJUHATUS

Tänapäevases tarbimisühiskonnas on levinud probleem massiline jäätmete teke ning nende kahjulik mõju keskkonnale. Varasemalt on tootmine ja tarbimine tuginenud lineaarsele majandusmudelile, kuid nüüdseks püütakse liikuda aina rohkem ringsema majandusmudeli poole. See tähendab, et olulisel kohal on materjalide taaskasutus. Kui näiteks plasti, paberit, klaasi ning muid monomaterjale saab ringlusesse võtta vähese vaevaga, siis tekstiilmaterjalide ringlussevõtt on keerulisem. Praegu on tekstiilijäätmete peamised käitluslahendused nende põletamine või prügilasse ladestamine. Vähesel määral toimub ka korduskasutus ning üpris väikse osa moodustab ümbertöötlemine.

Tekstiilmaterjalide ümbertöötlemise muudab keeruliseks nende heterogeenne koostis. Sageli koosneb tekstiilmaterjal erinevatest toormaterjalidest ning samuti on tekstiiltooted ise kombineeritud erinevatest materjalidest. Lisaks esineb rõivastel ka mittetekstiilseid komponente nagu näiteks lukud ja nõöbid. Samuti raskendab suuremahulist ümbertöötlust asjaolu, et kasutatud tekstiiltoodete kogumise ja sorteerimise süsteem on algeline või kohati isegi puudulik. Näiteks ei ole võimalik käsitsi sorteerides tuvastada kõiki materjale ning tundmatute materjalide edasised valikud on jällegi kesised. Kuigi efektiivsemad tehnoloogiad, näiteks sorteerimine NIR (lähi-infrapuna) - ja RFID (raadiosagedustuvastus) - tehnoloogia abil on arendamisel, on nende kasutamine hetkel piiratud.

Kuigi tekstiilmaterjalide taaskasutamine võib olla kulukas ning keeruline protsess, on see siiski võimalik. Ümbertöödeldud tekstiilkiududest on võimalik valmistada uusi materjale. Eriti huvipakkuv valdkond on tekstiilmaterjalide kasutamine komposiitmaterjalide valmistamiseks. Praeguseks on selliseid näiteid päris mitmeid, kuid siiski arenemisruumi veel on.

Bakalaureusetöös käsitletav teema on aktuaalne eelkõige uue Euroopa Liidu direktiivi jõustumise pärast: selle kohaselt peavad kõik liikmesriigid hakkama tekstiilijäätmeid liigiti koguma. See tähendab seda, et tekstiilmaterjale tuleks suunata ka oluliselt suuremal määral ringlusesse. Samuti aitab valitud teema kaasa üleüldistele tekstiilijäätmetega seotud probleemide lahendustele.

Lähtuvalt tekstiilmaterjalidega seotud probleemistikust valiti käesoleva bakalaureusetöö teemaks ümbertöödeldud tekstiilkiudude kasutamine plastkomposiitmaterjalide valmistamiseks. Lõputöö põhieesmärgid sõnastati järgnevalt:

- Uurida, kuidas erinevad ümbertöödeldud tekstiilkiud mõjutavad plastkomposiitmaterjalide omadusi.
- Võimalike kasutusvaldkondade leidmine ümbertöödeldud tekstiilkiududest plastkomposiitmaterjalidele.
- Anda ülevaade tekstiilmaterjalide seotud probleemidest ning praegustest lahendustest.

Eesmärkide täitmiseks valmistati ise kuus erinevat ümbertöödeldud tekstiilkiududega plastkomposiitmaterjali ning uuriti nende omadusi. Selle tarbeks hangiti Uuskasutuskeskuse abiga sobivad tekstiiltooted. Kõigepealt analüüsiti kasutatavaid materjale ning seejärel need purustati ning segati polümeermatriksiga. Seejärel analüüsiti valmistatud komposiitmaterjale. Vastavalt tulemustele pakutakse välja sobivad rakendusvaldkonnad taoliste materjalidele.

Töö tulemused aitavad kaasa tekstiilmaterjalidega seotud probleemide lahendamisele. Lähtuvalt tulemustest ning järeldustest on võimalik edasi arendada ümbertöödeldud tekstiilkiududega plastkomposiitide valmistamise tehnoloogiat ja meetodikaid. Samuti selguvad töö käigus erinevate taaskasutatud tekstiilkiududega valmistatud plastkomposiitmaterjalide omadused. Need määravad edasised valikud materjalide rakendamisel.

2. ÜLEVAADE TEKSTIILMATERJALIDE PROBLEEMISTIKUST NING KASUTATUD RÕIVASTE JA TEKSTIILIDE SORTEERIMISEST

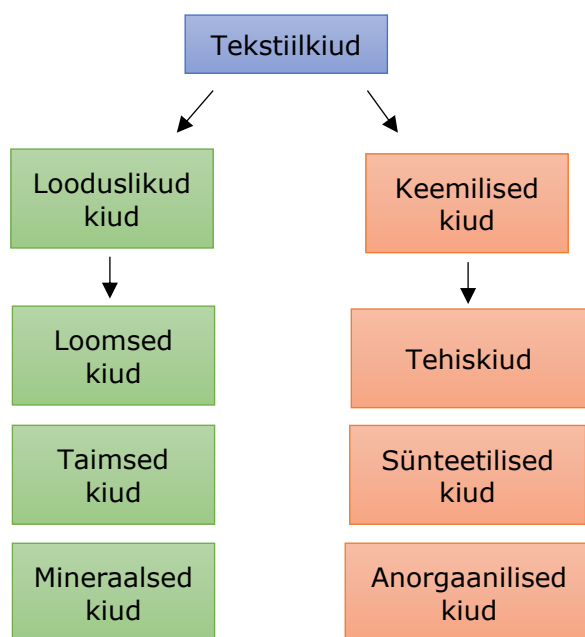
Tänapäevases heaoluühiskonnas on üheks kasvavaks probleemiks üha suurenev tekstiiljäätmete hulk. Iga aasta suurenevad tekstiili- ja rõivatööstuse tootmismahud hüppeliselt, mis omakorda toob kaasa ka jäätmeprobleemi süvenemise. Rahvastiku kasv, elatustaseme tõus ning kiirelt muutuvad trendid soodustavad kiirmoodi. See omakorda annab tootjale võimaluse kasutada halvema kvaliteediga materjale. Kehvade omadustega tekstiiltoodete madal hind ning lühike eluiga kiirendab samuti jäätmete kuhjumist. Probleemi teeb tõsisemaks asjaolu, et tekstiilmaterjalide ümbertöötlemine on keerukas ning ressursinõudlik protsess. Samuti ei tasu see sageli majanduslikult ära. Probleemist ajendatuna on rohkem tähelepanu hakatud pöörama ressursside mõistlikumale kasutamisele ning ringmajanduse kontseptsiooni edendamisele. Näiteks loob Euroopa Liit regulatsioone, mis toetavad ringmajandust ning soodustavad jäätmete tekke vähenemist. Samuti toetavad mitmed tuntud kaubamärgid oma tegevusega materjalide ringlust. [10, 11]

Tekstiilmaterjalide tootmine esmasest (inglise k *virgin*) toorainest jätab keskkonda väga suure jalajälje. Tuleb arvestada ka seda, et materjali valmistamisel kasutatakse sageli palju ohtlikke kemikaale. Mitmed hiljutised uuringud on näidanud, et tekstiilitööstuse tegevus ohustab magevee ning atmosfääri mikrosüsteeme, kuna kasutatavad kemikaalid eralduvad tekstiiltoodete eluea jooksul keskkonda. Samuti on need töötlusvahendid sageli toksilised ka inimesele ning võivad omada kantserogeenset või mutageenset mõju organismile. Omaette saaste on tohutu energia- ja veekulu, samuti ka transport ning liigne pakendamine. Tootmine ise põhjustab kahjulike ainete emissioone looduskeskkonda ja atmosfääri ning tekstiiltoote kasutamisel tarbija poolt eraldub materjalist samuti toksilisi ühendeid ning muid sünteetilisi kemikaale. [10, 11]

Praegu on peamised tekstiilmaterjalide käitluslahendused põletamine ja prügilasse ladestamine. Põletamine energia saamiseks on mõistlik siis, kui korduskasutus ja ümbertöötlus pole võimalik. Samas aga jäätmete ladestamine ei õigusta ennast mitte mingil moel. Jäätmete lagunemine seal võtab aega aastakümneid või rohkemgi veel. Märkimata ei tohi ka jätta seda, et jäätmete ladestamisel võivad sattuda kahjulikud ained ümbritsevasse pinnasesse ning põhjavette. Kuigi korduskasutamine ja ümbertöötlemine lükkavad jäätmeprobleemi lihtsalt edasi, on see kindlasti keskkonnasõbralikum variant kui põletamine ja ladestamine. Samuti võimaldab see vähendada esmaste toorainete kasutust. [10]

2.1 Tekstiiltoodete liigitus

Tekstiilmaterjalide valmistamiseks kasutatakse nii looduslikke kui ka keemilisi kiude ning nende erinevaid koosluseid. Kiudude liigitus on näha joonisel 2.1. Looduslikud kiud esinevad meid ümbritsevas looduses ning võivad olla loomse, taimse või mineraalse päritoluga. Loomsete kiudude hulka kuuluvad näiteks loomade vill või siid. Taimseid kiudusid saab näiteks puuvilla, lina või kanepi taimedest. Mineraalsed kiud võivad olla tehtud näiteks asbestist. Keemilised kiud võivad olla tehiskiud, sünteetilised või anorgaanilised kiud. Tehiskiud valmistatakse looduslike kiudude keemilise muundamise või lahustamise teel. Tehiskiud omavad sama või modifitseeritud keemilist koostist nagu looduslikud kiud, millest nad valmistati. Tuntud tehiskiud on näiteks viskoos, modaal ja atsetaat. Sünteetiliste kiudude tegemiseks valmistatakse madalmolekulaarsetest lähteainetest tootmiseks sobivad kõrgmolekulaarsed ühendid ehk polümeerid ning nendest tehakse tekstiilkiud. Mõned näited nendest oleksid polüamiid ehk nailon, polüester, aramiid ja elastaan. Anorgaanilised kiud võivad olla valmistatud näiteks metallist, klaasist või süsinikust. [12]



Joonis 2.1. Tekstiilkiudude liigitus [12]

Tekstiiljätmeid võib üldises plaanis jagada kaheks: tootjajärgne ning tarbijajärgne. Esimene puudutab rõiva- ja tekstiilmaterjale, mis tekivad enne tarbijani jõudmist. Need on näiteks tootmises ülejäänud materjal ja praaktooded, samuti ka müümata jäänud kaup. Kuna enamasti on tootmises teada täpne materjali koostis ning jääke on võimalik lihtsamini õigesti sorteerida, siis on neid jätmeid kergem suunata ka ringlusesse. Samuti tegeleb tootmisüksus sageli ise oma jätmete taaskasutamise või õigesse kohta

suunamisega. Tarbijajärgsed jäätmed on need, mis tulevad tarbijatelt. Sinna kuuluvad näiteks igat tüüpi rõivad, mida enam ei kasutata, kodutekstiilid, lapid jm; kõik, mis on toodetud tekstiilmaterjalidest. Selliseid jäätmeid sageli ei sorteerita ning seetõttu need satuvad koos segaolmejäätmetega prügilasse või põletusse. Teatud osa rõivastest ja kodutekstiilidest suunatakse teisele ringile tänu kogumiskastidele ja annetuskampaaniatele, sel puhul on ühe eseme eluiga veidi pikem. Taaskasutamise vaatest on lihtsam ja vähem kulukam tootjajärgset jäädet taaskasutada. [13]

2.2 Kasutatud rõivaste ja tekstiilide kogumine ja sorteerimine Eestis

Seni on tekstiilmaterjalide tootmine ja tarbimine tuginenud lineaarsele majandusmudelile. See tähendab, et pärast tootmist, tarbimist ja kasutamist muutuvad esemed jäätmeteks. Ligi 73% maailmas toodetud ja tarbitud tekstiilmaterjalidest lõpetavad prügilas või põletusahjus, kuigi neid saaks käsitleda ka väärtusliku ressursina [14]. Nüüdseks on hakatud rohkem mõtlema tekstiilmaterjalide taaskasutamisele ja ringmajandusse suunamisele. Euroopa Liidu direktiivi (EU) 2018/851 (millega muudetakse direktiivi 2008/98/EC, mis käsitleb jäätmeid) kohaselt peavad kõik liikmesriigid hakkama tekstiilijäätmeid liigiti koguma aastaks 2025 [15, 16]. Käesoleval ajal puudub aga Eestis lihtne ja mugav tekstiilijäätmete kogumissüsteem.

Praegu kogutakse kasutatud tekstiilmaterjale valdavalt kas korduskasutuse eesmärgil või jäätmetena. Kasutuskõlblikud rõivad saab viia vastavatesse kogumiskastidesse ja -punktidesse, mis võivad asuda avalikus ruumis, korduskasutusega tegelevates asutustes, rõivakauplustes või kaubanduskeskustes. Projekti "Põhjamaade-Baltikumi ringse tekstiilisüsteemi suunas" Eesti analüüsi kokkuvõtte väidab, et tuvastati üheksa suuremat organisatsiooni, kes koguvad kasutatud rõivaid ning tekstiilmaterjale korduskasutuse eesmärgil. Kasutuskõlbmatuid tekstiilmaterjale võetakse vastu kohalike omavalitsuste jäätmejaamades. Märkimisväärne osa kasutatud tekstiiltoodetest jõuab peale kasutusea lõppu segaolmejäätmete hulka. [18]

2018. aastal oli Eestis 106 kogumiskonteinerit korralike kasutatud rõivaste ja tekstiiltoodete jaoks (joonis 2.2). Umbes pooled nendest kuuluvad kohalikele omavalitsustele. Nendesse kogumiskastidesse võib panna ainult selliseid rõivaid ja kodutekstiile, mis sobivad korduskasutuseks. Konteinereid tühjendab kohaliku omavalitsusega koostööd tegev korduskasutusorganisatsioon. Lisaks omavalitsuste

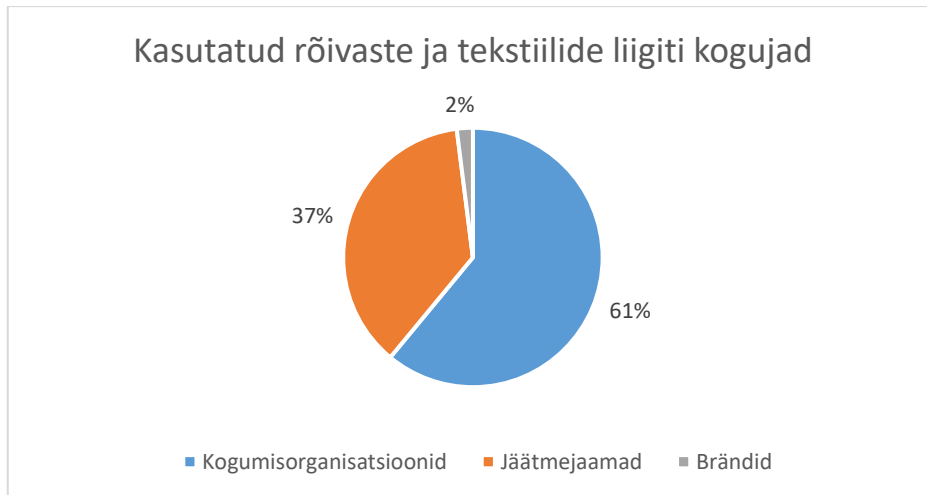
konteineritele on avalikes kohtades ka korduskasutusorganisatsiooni enda konteinerid tekstiiltoodetele. [18]



Joonis 2.2. Tekstiiltoodete kogumiskonteiner [17]

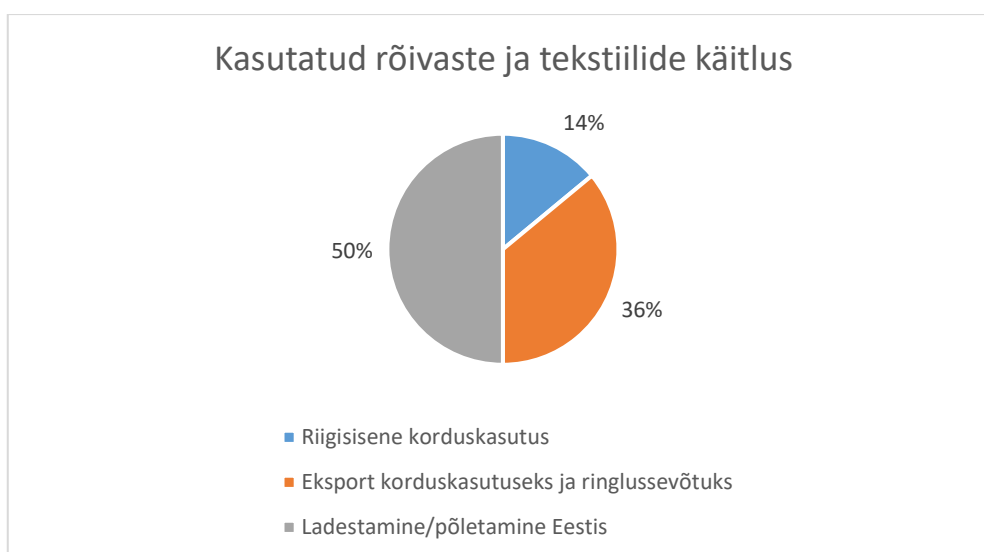
Mainitud projekti Eesti analüüsi kokkuvõtte on välja toonud, et kokku tarbiti Eestis 2018. aastal rõivaid ja muid tekstiilmaterjale (nii uusi kui ka kasutatuid) hinnanguliselt 19 530 tonni ehk 14,8 kg inimese kohta. Sellest kogusest ligikaudu 16% moodustavad kasutatud rõivad ja tekstiilmaterjalid. Kokku tekib Eestis umbkaudu 16 646 tonni tekstiiljätmeid aastas. Uuring ei kajastanud tarbijate välismaalt ostetud rõivaid ning tarbimistsükleid- ja harjumusi, samuti jäid vaatlusest välja väiksemad korduskasutuspoed. Seetõttu võib esineda andmetes ebatäpsusi.

Sama projekti analüüsi tulemused näitavad, et Eestis koguti 2018. aastal liigiti hinnanguliselt 4870 tonni kasutatud rõivaid ja tekstiilmaterjale. See number sisaldab nii korduskasutuse eesmärgil kogutud tekstiile kui ka jäätmetena lõpetanud materjale. Sellest hulgast üle poole kogutakse korduskasutusorganisatsioonide poolt, mingi osa jäätmejaamades ja väike osa rõivabrändide poolt (joonis 2.3). Tuleb mainida, et need numbrid on hinnangulised, kuna selle projekti tarbeks avaldasid oma andmed vaid teatud organisatsioonid ja ettevõtted. Võrreldes uute rõivaste ja tekstiilide tarbimise kogusega, mis oli 2018. aastal 16 371 tonni, kogutakse Eestis liigiti kokku hinnanguliselt 30% aasta jooksul turule paisatud uutest tekstiiltoodetest. Samas segaolmejäätmetes on hinnanguliselt 5% tekstiiltooteid ehk sinna läheb umbes 14 842 tonni aastas. [18]



Joonis 2.3. Aastal 2018 liigiti kogutud rõivaste ja tekstiilide osakaalud kogujate kaupa [18]

Jäätmejaamade kaudu koguti aastal 2018 liigiti tekstiilmaterjale 1804 tonni. Sama aasta seisuga kogus tekstiilmaterjale teistest jäätmetest eraldi 25 jäätmejaama üle Eesti, mis tähendab, et märkimisväärne osa jäätmejaamadest tekstiilijäätmete liigiti kogumise nõuet ei täida. Mõned jäätmejaamad võimaldavad ära anda tekstiilmaterjale ka korduskasutuse eesmärgil. Eestis rõivaid ja tekstiilijäätmeid kahjuks veel suuremas mahus ringlusse ei võeta, jäätmeks muutunud tekstiilmaterjalid käideldakse üldjuhul prügilasse ladestades või põletades. Ehk liigiti kogutud tekstiilmaterjale käideldakse samamoodi nagu segaolmejäätmeid. Sellisel viisi suunatakse lõppkäitlusesse üle poole kogutud rõivastest ja tekstiilidest ehk ligikaudu 2408 tonni aastas (joonis 2.4). Valdav osa sellest on kogutud jäätmejaamades. Vähemal määral toodetakse jäätmeteks märgitud kasutatud rõivastest ja tekstiilidest puhastuslappe. [18]



Joonis 2.4. Liigiti kogutud rõivaste ja tekstiilide käitlus aastal 2018 [18]

Hea märk on see, et aasta-aastalt suureneb kogumiskastidega kogutud tekstiiltoodete hulk. Kuigi kogus on suurenenud, märgiti seda, et korduskasutusse suunatud toodete ja jäätmena lõppkäitlusesse saadetud kauba osakaal on jäänud samaks. Levinud nähtus on see, et inimesed viskavad oma tekstiiljätmeid korduskasutuseks mõeldud kogumiskohta. Kuigi uuringute tulemustest selgub, et kasutatud tekstiilmaterjale kogutakse liigiti kokku kõigest kolmandik turule jõudnud tekstiilidest, on näha, et inimeste teadlikus suureneb ning kogumispunktide arv on kasvutrendis.

Organisatsioonid, kes koguvad kasutatud rõivaid ja tekstiile korduskasutuse eesmärgil, sorteerivad need riigisisest erinevatesse kategooriatesse. Eestis kogutud kõrgema kvaliteediga riided müüakse kohalikes korduskasutuspooides ja -keskustes. Tooted, mida ei õnnestu müüa, kuid sobivad veel korduskasutuseks, lähevad annetuseks erinevatele sotsiaalhoolekandeametustele ja mittetulundusühingutele. Ning tekstiiltooted, mis pole kõlblikud korduskasutuseks, suunatakse prügilasse. [18]

2.3 Tekstiilkiudude määramise meetodid

Tekstiilkiudude määramiseks on mitmeid võimalusi. Näiteks aitab tuvastada kiude nende käitumine põletamisel ja keemilistes reaktsioonides. Samuti saab määrata kiude valgusmikroskoobi abil nagu tehti käesoleva bakalaureusetöö raames. Lisaks on võimalik kasutada skaneerivat elektronmikroskoopi (SEM), millel on suurem suurendus kui valgusmikroskoobil ning FTIR-mikrospektroskoopiat. Tekstiilkiudude tuvastamiseks võib kasutada ka näiteks infrapuna (IR), lähii infrapuna (NIR) ja Raman'i spektroskoopiat ning gaasi- ja vedelikkromatograafiat.

Visuaalsel vaatlusel läbi mikroskoobi tuvastatakse kiude nende vastavate eripärade järgi. Looduslike kiude on selle meetodiga üpris lihtne tuvastada, tehiskiudude ja sünteetiliste kiudude määramiseks tavaliselt ainult valgusmikroskoobist ei piisa. Kiudude põletamisel uuritakse samuti erinevaid iseärasusi ning iseloomulikke tunnuseid. Uuritavad omadused võivad olla näiteks põlemise kiirus, põlemisjäägi iseloom ning tekkiv lõhn. Keemiliste reaktsioonidega tuvastamiseks kasutatakse tavaliselt lahustuvusmeetodit. Identifitseerimisel on olulised lahusti ning selle kontsentratsioon, lahustumise kestus ning temperatuur. [19]

Skaneeriv elektronmikroskoop on seade, mis võimaldab luua huvipakkuvast proovist kujutise elektronkiire abil skaneerides. Suure energiaga kiirt moodustavad elektronid tekitavad vastastikmõju proovi pinda moodustavate aatomitega. Seetõttu tekitavad elektronid signaale, mis sisaldavad teavet proovi pinna erinevate omaduste kohta nagu

näiteks kuju, koostis ja elektrijuhtivus. Skaneeriva elektronmikroskoobi suurendus on oluliselt suurem kui valgusmikroskoobil, sest elektronide lainepikkus on väike. [20]

FTIR-mikrospektroskoopia (Fourier-transformeeritud infrapunaspetspektroskoopia, inglise keeles *Fourier-transform infrared spectroscopy*) puhul kasutatakse materjali uurimiseks infrapunavalgust. Analüüsi käigus mõõdetakse neeldunud valguse ja peegeldunud valguse hulka keemiliste mustrite tuvastamiseks ja materjali määramiseks. Selle käigus on saad infot uuritava proovi keemiliste sidemete ja molekulide struktuuri kohta. Selleks toimub molekulides neeldunud IR kiirguse intensiivsuse mõõtmine. FTIR spektri saamiseks kasutatakse infrapunaakiirt, mis lastakse uuritavast proovist läbi. Kiirgus neeldub proovis olevatele molekulidele iseloomulikele võnkesagedustele vastava sagedusega. Infrapunase kiirguse neeldumisel liiguvad molekulid kõrgematele võnkeenergia nivooidele ning tuumade võnkumiste amplituud suureneb. Selle võnkesignaali registreerib seade teatud aja jooksul. Saadud signaali puhul kasutatakse Fourier' teisendust ning tulemuseks on IR spekter graafikus lainearv ja neelduvus. [21, 22]

FTIR-analüüs on tehnika, mida kasutatakse tahke, vedeliku või gaasilise aine neeldumise või kiirguse infrapunaspetspektri saamiseks. FTIR spektromeeter (joonis 2.5) kogub samaaegselt suure eraldusvõimega spektraalandmeid laias spektrivahemikus. Analüüsi nimi tulenebki sellest, et lähteandmete tegelikuks spektriks teisendamiseks on vajalik Fourier' teisendus. [21]



Joonis 2.5. FTIR spektromeeter [23]

2.4 Kasutatud tekstiilmaterjalide sorteerimise viisid

Käesoleval ajal saab tekstiilmaterjale sorteerida nii käsitsi kui ka poolautomaatsel viisil. Lisaks on arendamisel NIR- ja RFID-tehnoloogial põhinevad sorteerimisprotsessid, mis aitaksid tuvastada kergemini ja kiiremini erinevaid tekstiilmaterjale.

2.4.1 Käsitsi sorteerimine

Käsitsi sorteerimine on üks lihtsamaid ja levinumaid viise. See aitab kindlaks teha, milliseid esemeid on võimalik korduskasutada. Seda kasutatakse sageli ka enne automatiseeritud protsesse: sellisel juhul eraldataksegi käsitsi rõivad, mida saab olemasoleval kujul uuesti kasutada. Sorteerimisjaama töötajad eraldavad sisse tulnud massist kõigepealt mittetekstiilsed tooted ning kasutuskõlbmatud materjalid. Seejärel käivad töötajad läbi kogutud partii ning sorteerivad selle vastavalt üksuse sorteerimiskriteeriumitele. Viimased sõltuvad eelkõige sorteeritud materjali edasisest otstarbest. Osades kohtades sorteeritakse materjale tüübi, värvi ja seisukorra järgi. Mõningates sorteerimiskeskustes eraldatakse tooted kanga materjali järgi, samuti võidakse tuvastada kiudude koostist. Ka korduskasutatavaid rõivaid sorteeritakse mitmetesse kategooriatesse: näiteks vastavalt rõivaste seisundile, värvusele, tüübile, aastaajale, sihtrühmale jne. Ka need kategooriad on igas sorteerimisjaamas erinevad.

Sorteeritud esemete kvaliteet sõltub peamiselt tekstiilmaterjalide kogumissüsteemist: kuidas, kus ja millist materjali kogutakse. Ka sorteerimisprotsess ise mõjutab väljundi kvaliteeti. Näiteks kogenenum töötaja sorteerib täpsemini ja paremini. Käsitsi sorteerimise üks eeliseid on see, et on võimalik eemaldada sobimatud fraktsioonid ning välja võtta korduskasutuseks sobilikud tooted. Samuti saab vaid käsitsi hinnata korduskasutuseks sobivate rõivaste ja tekstiilmaterjalide kvaliteeti. Samas on siinkohal miinuseks see, et materjalide ja kiudude koostise äratundmine võib olla keerulisem, aeganõudvam või isegi võimatu. Materjalide ja kiudude tuvastamise raskused võivad viia olukorrani, kus ebapiisavalt sorteeritud materjale saab kasutada ainult vähemnõudlikumates rakendustes, samas kui tegelikult oleks võimalik nende materjalidega asendada esmased toorained (inglise k *virgin materials*). Miinuseks on ka see, et käsitsi sorteerimine on üsna kulukas, just kõrge sissetulekuga riikides. Samas kasutades madalama sissetulekuga riikide tööjõudu, jäetakse töötajate heaolu ning inimlikud tingimused sageli tahaplaanile. [24]

2.4.2 Poolautomaatne sorteerimine

Poolautomaatne sorteerimisprotsess on põhimõttelt sarnane käsitsi sorteerimisega. Vaid teatud protsessi osad on automatiseeritud. Näiteks söödetakse sorteeritavad rõivad ja tekstiilmaterjalid ette automaatselt või transporditakse materjale konveierlintidel (joonis 2.6). Samuti võidakse kasutada poolautomaatseid presse, mis tihendavad sorteeritud fraktsioonid enne edasist transporti. Mõnes sorteerimisettevõttes kasutatakse ka masinat, mis lõikab übertöötuse tarbeks sorteeritud materjalid väiksemateks tükkideks. Sorteermise protsess ise toimub peamiselt ikka käsitsi.

Osaline automatiseerimine sorteermise protsessis vähendab tööjõu vajadusi ning samuti kiirendab tegevust. Ka töötajate koormus on väiksem. Samuti võib see hoida raha kokku: suurema sissetulekuga riikides võivad seadmete soetamise kulud olla väiksemad kui tööjõukulud. Automatiseerituse miinuseks on võimalikud katkestused seadmete töös, näiteks masinate rikked või muud takistused. Sellised olukorrad võivad kogu protsessi peatada ning tekitada seisaku sorteermises. Lisaks on võimalus, et automatiseeritud protsessis toimub materjalide määrdumine, näiteks konveierlintidel. [24]



Joonis 2.6. Automaatne tekstiilmaterjalide transport konveierlindil [25]

2.4.3 NIR-sorteerimine

Tekstiilmaterjalide sorteermisel võib abiks olla NIR-spektroskoopia. NIR ehk lähi-infrapuna spektroskoopia (inglise keeles *near-infrared*) on meetod, mis kasutab elektromagnetilise spektri lähi-infrapunast ala [26]. Infrapunavalgus neeldub sihtpinnal osaliselt ja valikuliselt ning peegeldunud valgus loob igale kiutüübile või segu kombinatsioonile iseloomuliku spektri. Seejärel võrreldakse spektrit etteantud andmebaasiga ja seeläbi on võimalik materjali tuvastada [27]. See viis suudab

tuvastada tekstiilmaterjale lähtuvalt selle kiulisest koostisest. Lähi-infrapuna meetodi abil saab tuvastada nii monomaterjalidest tekstiile kui ka segakiududest valmistatud tooteid. NIR-spektroskoopiat tekstiilmaterjalide sorteerimisel võidakse kasutada koos käsitsi sorteerimisega. [24]

Lähi-infrapuna meetodiga sorteerimistehnoloogia koosneb konveierlintidest ning NIR-anduritest. Tekstiilmaterjalid jaotatakse liinile ükshaaval ning neid analüüsitakse andurite abiga. Andurid võrdlevad kanga peegeldumist andmebaasis oleva teabega ning sõltuvalt koostisest eemaldatakse ese lindilt ning suunatakse vastavasse fraktsiooni. Tehnoloogia on võimeline eraldama ligi 300 fraktsiooni, kuid reaalselt kasutatakse hetkel veel märkimisväärselt väiksemat hulka, 5-10 fraktsiooni. [24]

NIR-sorteerimine võimaldab eraldada rohkem materjalipõhiseid fraktsioone kui käsitsi sorteerimine. See vähendab käsitsi sorteerimise osakaalu. Ringlussevõtu koha pealt on see efektiivsem lahendus, kuna vähendab segatekstiilmaterjali väljundvoogu. Tänu kiudude ja lisaainete keerukatele segudele on hetkel NIR-tehnoloogia rakendamine tekstiilmaterjalide puhul raskendatud. Lisaks on selle tehnoloogia hind üpris kõrge, see tähendab, et sorteeritava tekstiilmaterjali maht peab olema suur, et see meetod ära tasuks. [24]

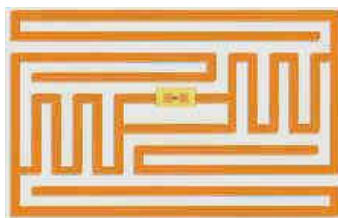
NIR-sorteerimise tehnoloogia on veel arendamisel. Rootsis loodi selle tarbeks uurimisprojekt SIPTex. Selle projekti raames testiti ja hinnati tekstiilmaterjalide automatiseeritud sorteerimist, ehitades ja käitades Rootsis pilootrajatist. Sealsed tuvastus- ja sorteerimisseadmed põhinevad just NIR-tehnoloogial. See projekt aitab kaasa ressursitõhususele ning võimaldab luua tekstiilmaterjalidele ringse süsteemi. Arendamisel pöörati tähelepanu materjale ümbertöötlevate klientide kvaliteedinõuetele ning ülitäpse sorteerimistehnoloogia loomisele. Peale projekti lõppemist, mis oli aastal 2018, toodi välja, et selline tehnoloogia on näidanud suurt potentsiaali tekstiilmaterjalide sorteerimiseks kiu koostise ja värvi järgi. [25]

2.4.4 RFID kasutamine sorteerimisel

Rõivatööstust on võimalik digitaliseerida RFID ehk raadiosagedustuvastuse (inglise keeles *Radio Frequency Identification*) abil. Tööstuse digitaliseerimine muudab kogu ahela läbipaistvamaks ning soodustab ringmajandust ja jätkusuutlikkust. Selle abil on võimalik jälgida näiteks tooteid väärtus- ja hooldusahelas. RFID-tehnoloogia kasutab raadiolaineid, et tuvastada ning lugeda infot spetsiaalsetelt elementidelt, mis on

paigaldatud toote sisse. Peamiselt sisaldavad need elemendid või kiibid infot toote kohta, millele need on kinnitatud. Nende abil on võimalik ka jälgida toote asukohta.

RFID-tehnoloogia tootesse paigaldatavad imepisikesed elemendid sarnanevad idee poolest triipkoodidega, kuid neid kiipe saab tuvastada ka ilma optilise skaneerimiseta (joonis 2.7). See tähendab, et tuvastusseade loeb kiipi ka lihtsalt lähedale asetades. Samuti on võimalik selle tehnoloogiaga tuvastada mitmeid kiipe korraga. Tooteid on võimalik sildistada kolme erineva elemenditüübiga: passiivse, poolpassiivse või aktiivse kiibiga. Passiivne element ei sisalda endas patareisid, see ammutab energiat lugemisseadmelt. Poolpassiivne kiip sisaldab endas patareid ning aktiveerub RFID-lugeja läheduses. Aktiivne element omab patareid ning selle abil on võimalik reaalajas jälgida toote liikumist. [28]



Joonis 2.7. RFID-tehnoloogia element: keskel asub mikrokiip ja ülejäänud osa on antenn [29]

Kuigi RFID-tehnoloogia on veel arendamisel, omab see suurt potentsiaali. Selle abil oleks võimalik tuvastada lihtsalt tekstiilmaterjali koostis. Samuti võib kiip anda teavet toote päritolu kohta. Ka tootmist ning müüki saab selline tehnoloogia lihtsustada. [28]

3. TEKTIILMATERJALIDE ÜMBERTÖÖTLEMINE

Jäätmete ümbertöötlemise ja taaskasutuse tehnoloogiad jagunevad lähtuvalt kasutatud toorainest ja lõpp-produktist üldises plaanis neljaks: primaarne, sekundaarne, tertsiaarne ja kvaternaarne lähenemisviis. Primaarne viis hõlmab toote ringlussevõttu selle algsel kujul, siia kuulub näiteks tööstusjäätmete taaskasutus ja ka rõivaste korduskasutus. Sekundaarne ringlussevõtt on jäätmeiks muutunud toote mehaaniline ümbertöötlemine: saadud produkti mehaanilised, füüsilised ja keemilised omadused on enamasti kehvemad eelnevast. Tertsiaarne lähenemine on keemiline ümbertöötlus: see viis hõlmab sageli pürolüüsi ja hüdrolyüsi protsesse, mis muudavad algse toote lihtkemikaalideks, monomeerideks või kütuseks. Kvaternaarne ringlussevõtt tähendab jäätmete põletamist ja tekkiva soojuse kasutamist. [30]

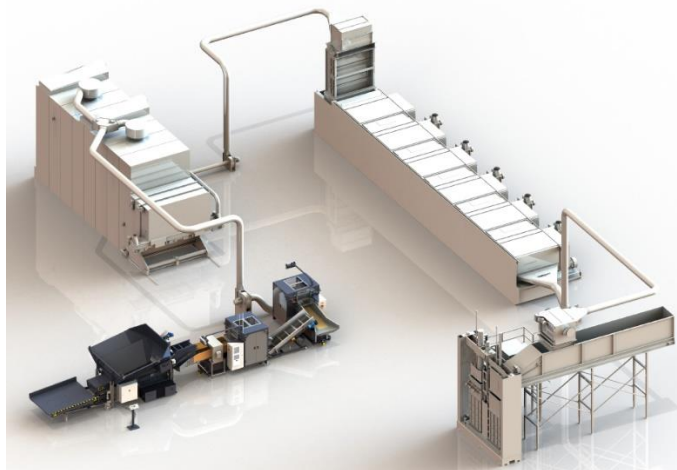
Isegi, kui kõik tekstiilmaterjalid suunatakse taaskasutusse või ümbertöötlusesse, siis teatud aja jooksul muutuvad materjali mehaanilised omadused kriitiliseks ning selle kasutamine samal eesmärgil pole enam võimalik. Madalakvaliteedilist kiudu saab küll kasutada täitematerjalina, kuid uut tekstiilmaterjali sellest teha pole mõttekas. Et võtta materjalist maksimumi võib tekstiilmaterjali viimane kasutus olla energia tootmine. Tänapäeval on võimalus kasutada tekstiilijäätmeid alternatiivse kütuseallikana, selle asemel, et ladestada need prügilasse. [13]

3.1 Mehaaniline ja keemiline ümbertöötlemine

Tooted, mis ei kõlba enam kasutuseks olemasoleval kujul, saab suunata ümbertöötlemisse. Tekstiilmaterjale saab uueks kiuks töödelda mehaanilisel või keemilisel meetodil. Pärast seda saab taaskasutatud toormest teha uusi suurema väärtusega tooteid.

Mehaanilise ringlussevõtu protsesside tulemuseks võib olla kangas, lõng või kiud, mida kasutatakse uutes toodetes. Mehaanilise ümbertöötamise puhul sorteeritud jäätmed lõigutakse ja purustatakse. Magnetite abil on jäätmetest võimalik eemaldada metallist osad, näiteks lukud, trukid jne. Kasutatakse veel selliseid meetodeid nagu tuulekamber ja kraasimine ning hiljem võib toimuda ketramine ja kudumine. Seda viisi kasutatakse peamiselt looduslikest kiududest materjalide puhul. Sünteetiliste kiudude puhul kasutatakse sulatamist, mille järgselt on hiljem võimalik sulatisketrusmenetlusel uuesti kiudu ketrata. Kiude saab mehaaniliselt eraldada tiheduse erinevusel põhineva meetodiga, samuti ka tsentrifuugimise ja sulatamise teel. [13, 24]

Näide mehaanilise ümbertöötuse liinist on joonisel 3.1. Jooniselt on näha, et vasakul all on automaatne materjali ettesöötja, seejärel liiguvad tekstiilmaterjalid giljotiini alla. Järgmisena eemaldatakse mittetekstiilsed osad ning toimub protsess, kus tekstiilmaterjalidest tehakse uued kiud. Lõpuks toimub produkti automaatne pakkimine. [31]



Joonis 3.1. Mehaanilise ümbertöötuse liin [31]

Keemiline ümbertöötus on veidi keerulisem ning seetõttu ka kallim. Samuti kulutab see rohkem energiat kui mehaaniline ümbertöötus, kuid samas uute kiudude kvaliteeti on lihtsam ette ennustada. Selle meetodiga lõhutakse tekstiilmaterjalis olevad kiud molekulaarsel tasemel. Keemilisel töötusel toimub materjali osaline või täielik depolümeerisatsioon, segu puhastamine ning polümeerisatsioon. Tekstiilkiudude eraldamiseks kasutatakse erinevaid lahusteid ja meetodeid. Näiteks võidakse kasutada ensüümset, termilist, glükolüüsi või metanolüüsi meetodit. Keemilist ringlussevõttu kasutatakse sünteetiliste kiudude või segakiudude puhul ehk selle meetodiga on võimalik ka ekstraheerida ühte komponenti materjalide segust. [13, 24]

3.2 Peamised tekstiilmaterjalide ümbertöötlustakistavad tegurid

Esimene probleem tekstiilmaterjalide ringlusesse suunamisel, saab alguse ahela tipust: tekstiilmaterjalide valmistamisel, täpsemalt mittejätkusuutlikust disainist. Sageli on tekstiiltooted ja tekstiilmaterjalid oma olemuselt heterogeensed: tihti kasutatakse ühes esemes mitut erinevat toormaterjali. Siinkohal võib tuua näiteks tavalise jope: sellel on vihma- ja tuulekindel pealismaterjal, sisuks vatiin ja vooder, mis kõik võivad olla

valmistatud erinevatest materjalidest. Samuti on populaarne toota mitmekiulise koostisega tekstiilmaterjale: lõngad ning niidid on nende puhul valmistatud mitmest erinevast kiust. Kokku segatakse nii looduslikku ja keemilist kui ka mitut erinevat keemilist kiudu. Selline materjal raskendab aga hilisemat ümbertöötlust. On keeruline tuvastada toote materjale ning tundmatute ja segakiududest valmistatud tekstiilmaterjalidega pole eriti midagi peale hakata. Nendest valmistatud uute toodete kvaliteeti ei saa ette ennustada. [13]

Tekstiiltoodete ümbertöötlust takistavaks teguriks on mittetekstiilsed komponendid toodetel. Näiteks on peamiselt tarbijajärgsetel toodetel erinevad lisad nagu lukud, nõöbid, nõörid, trukid, needid jm. Furnituur ei ole tavaliselt ülejäänud tootega samast materjalist. Ümbertöötlusel tekitavad need elemendid probleeme, mittemetalseid materjale on raske välja sorteerida. Igasugune materjalide mitmekesisus tootes on takistavaks asjaoluks selle ringlusse võtmisel.

Ümbertöötlust takistab ka asjaolu, et tekstiilmaterjalide kogumise süsteem on puudulik. Väga suur osa läheb koos segaolmejäätmetega prügilasse või põletamisele. Tarbija jaoks on keeruline eraldi tekstiilijäätmete ära andmine, kuna näiteks paljudes riikides on ainuke võimalus vanad kaltsud jäätmejaama viia. Kasutuskõlblikud rõivad ja tekstiilmaterjalid saab küll osades kohtades kogumiskastidesse viia, aga reaalseid jäätmeid on kasutajal kõige lihtsam olmeprügi hulka panna. Võrdluseks võib tuua siinkohal, et näiteks pakendijäätmetele ja mitmetele muudele materjalidele on Eestis välja töötatud üpris hästi toimiv kogumissüsteem. Teatud rolli mängib kindlasti ka sotsiaalne mõjutamine ning inimeste teadmatuse jäätmete valdkonnas.

Tekstiilmaterjalide tööstuslik sorteerimine ning ümbertöötlemine on üpris keeruline ja kulukas ning sageli ei tasu see end ära. Seda just sellepärast, et praegu veel on uuest (ingl k *virgin*) toorainest tekstiilmaterjalide tootmine tundvalt odavam, kuna nende turuhind on madalam. Ümbertöödeldud tekstiilmaterjalide ja kiudude hind on arvatust kõrgem. Seetõttu puudub nõudlus teise ringi materjalidele. Tööstuslik sorteerimine on raskendatud ka tehnoloogia puudumise tõttu: sageli pole käsitsi sorteerimise puhul võimalik tuvastada materjali koostist ning muud tuvastussüsteemid on veel arendamisel, seega on tekstiiltoote edasine teekond piiratud.

Põhjus, miks tootjad eelistavad uut tooret, on ka see, et taaskasutatud materjal on enamasti halvema kvaliteediga. Ümbertöödeldud kiud on lühemad ning need mõjutavad oluliselt ka valmistatava tekstiilmaterjali mehaanilisi omadusi. Samuti võib nendes esineda teatud võõrseid, mis on pärit eelmiselt tootelt. See kõik alandab materjali kvaliteeti. Tekstiilmaterjale pole võimalik lõpmatult ümber töödelda, kuna iga korruga väheneb nende kvaliteet. [32]

3.3 Ümbertöödeldud tekstiilmaterjalide kasutusvaldkonnad

Kuigi tekstiilmaterjalide taaskasutamine pole veel eriti populaarne, siis tegelikult on nende rakendamiseks kasutusvaldkondi palju. Alustades sellest, et vanast tekstiilmaterjalist saab teha uue: ümbertöödeldud kiust valmistatud rõivad ja muud esemed on saadaval ka meie turul. Mitmed rõivabrandid kasutavad oma toodetes taaskasutatud materjali: näiteks Timberland, Nike, Speedo, Adidas, H&M, The North Face, Levi Straus & Co jt. Sellise taaskasutusviisi jaoks kasutatakse valdavalt mehaanilist ümbertöötlust. [30]

Joonisel 3.2 on näha H&M rõivafirma taaskasutatud materjalist kleite. Pildil olevad kleidid on valmistatud kahest eri sorti taaskasutatud polüestrist: vanadest tekstiilmaterjalidest ümbertöödeldud polüesterkiududest ja plastjätmetest (näiteks PET pudel) valmistatud polüesterist. [32]



Joonis 3.2. Taaskasutatud materjalidest H&M rõivafirma kleidid [32]

Tekstiilmaterjal on ka sobivaks koostisosaks erinevatele isolatsioonmaterjalidele, näiteks heli ja soojuse tõkestamiseks või hoidmiseks. Samuti saab neid jäätmeid kasutada täite- ja polsterdusmaterjalidena: madratsites ja mööblis leiab see koha. Samuti on võimalus kasutada ümbertöödeldud tekstiilkiude komposiitmaterjalides. [13]

4. ÜMBERTÖÖDELDUD TEKSTIILKIUDUDE KASUTAMINE KOMPOSIITMATERJALIDES

Tekstiilijäätmete probleem on ajendanud läbi viima mitmeid teadusuuringuid. Eksperimentaalsetes töödes uuritakse tekstiilkiudude mõju erinevates matriksites. Üheks kiudude taaskasutamise võimaluseks on lisada need komposiitmaterjalidesse. Matriksisse lisatud tekstiilkiud võivad parandada materjali mehaanilisi omadusi ning täitematerjalina kasutades vähendavad need toormaterjali kulu. Komposiitmaterjalidesse sobivad nii looduslikud kui ka keemilised kiud, samuti segakiud. Kiud on potentsiaalsed komposiitmaterjali mehaaniliste omaduste parandajad. Võimalikud matriksid tekstiilkiududele on näiteks erinevad vaigud, termoplastid aga ka betoon. [10]

Teatud rakendusvaldkondades on võimalik klaaskiud komposiitmaterjaliga asendada tekstiilkiududega. Kui kasutada sarrusena näiteks puuvillakiudu ning hoida selle mahuosa segus 30% juures, siis saab materjali löögitugevust võrrelda klaaskiudkomposiidiga. Samas vähenes selles materjalis tõmbe- ja paindetugevus. Ümbertöödeldud tekstiilkiududega komposiitmaterjale oleks sel puhul mõistlik kasutada väiksemate mehaaniliste pingete ja vähesema kasutusala kohtades, näiteks vaheseinad, uksepaneelid jms. Kuigi mõned mehaanilised omadused halvenevad, võib siiski tekstiilkiu kasutamine toimuda ka majanduslikel eesmärkidel. Näiteks tekstiilijäätmetest toorme maksumus on madalam klaaskiuhinnast. [34]

Polüpropüleenist kiud tugevdavad betooni. Segusse lisatud kiud suurendavad betooni tõmbetugevust. Samas tuleb märkida, et survetugevus sellisel materjalil jällegi kahaneb. Kiudude olemasolu materjalis vähendab ka betooni pragunemist ja ka töödeldavust. Sellise materjali vastupidavus happelises keskkonnas suureneb kiudude mahuosa suurendamisega. [35]

4.1 Ümbertöödeldud tekstiilkiudude kasutamine plastkomposiitmaterjalides

Üks tekstiilmaterjalide taaskasutusvõimalus, mida on ka juba uuritud ning katsetatud, on nende kasutamine polümeermatriksis. Sellise segu omadusi saab varieerida väga suures vahemikus, see tähendab, et ka kasutusvaldkondi on palju. Kiudude lisamisel

maatriksisse on taotletud lõpptoote funktsionaalsete ja struktuursete omaduste parenemist. [10]

Näiteks on võimalik tugevdada puhast PLA-d ehk polüpiimhapet, mis on loomult biolagunev ning üpris kallis polümeer, termoplastse tärglise ning puuvillakiududega. Tulemuseks on võrreldes puhta PLA-ga odavam ning endiselt biolagunev komposiitmaterjal. Maatriksmaterjali piiravaid omadusi vähendatakse tänu lisatud kiududele ning tärglisele. Näiteks suurenes komposiitmaterjali sitkus võrreldes puhta polümeeriga. Lisandite osakaalu reguleerides on võimalik saada erinevate omadustega materjale. [36]

Loodusliku kiuga tugevdatud komposiitmaterjalil on palju häid omadusi: näiteks kerge kaal, biolagunemise võimalus, madal hind, kõrge eritugevus, keskkonnasõbralikkus ning korrosioonikindlus. Linakiud on samuti üks potentsiaalsetest kiududest, millega on võimalik suurendada polümeerkomposiitide tugevust. Näiteks on segatud linakiudusid epoksüvaiguga, et suurendada materjali tõmbetugevust ning vähendada kulumist. [37]

Üheks võimaluseks on kasutada tekstiilmaterjalidega plastkomposiite heliisolatsioonmaterjalide valmistamiseks. Kui segada õiges vahekorras kokku polüuretaanvaht purustatud tekstiilmaterjaliga, siis on võimalik saada väga hea kvaliteediga heli isoleeriv kiht (joonis 4.1). Selle isoleerimisvõime on isegi parem kui puhtal polüuretaanvahul. Kuna levinud probleemiks on nii tekstiilijätmed kui ka mürareostus, siis on see variant üheks heaks lahenduseks. [38]



Joonis 4.1. Näidis heliisolatsioonmaterjalist, mis koosneb 70% polüuretaanvahust ja 30% tekstiilijätmetest (mis koosnevad sünteetilistest kiududest: 15% polüamiidi, 40% polüakrüüli, 45% modaali) [38]

Tekstiilkiududega plastkomposiitmaterjale on võimalik kasutada erinevate ehitusmaterjalidena. Nendel võivad olla nii heli- kui ka soojusisolatsiooni omadused. Näiteks villa ja polüestri segu võib omada kuni 75%-list helineelduvust [39]. Isoleermaterjalides võivad tekstiilkiud asendada mitmeid sünteetilisi ehitusisolatsioonmaterjale. Viimased avaldavad keskkonnale suurt mõju oma

taastumatute ressursside tõttu. Samuti võivad olla need inimese tervisele kahjulikud. Seetõttu võib isolatsioonimaterjalide tootmiseks olla parem võimalus kasutada looduslikke või sünteetilisi taaskasutatud kiude. Tekstiilmaterjalide kasutamine heli ja soojuse isolatsiooni jaoks võib aidata parandada energiatõhusust, vähendada taastumatute ressursside tarbimist, vähendada keskkonnale tulenevat koormust ning parandada inimeste ja teiste elusolendite elukvaliteeti. [40]

Joonisel 4.2 on näha vanadest teksapükstest saadud puuvillakiududega isolatsioonimaterjali, kus kiudude osakaal on 80%. [41]



Joonis 4.2. Taaskasutatud puuvillakiududega isolatsioonimaterjal [42]

4.2 Ümbertöödeldud tekstiilmaterjalidega plastkomposiitide valmistamine

Tekstiilmaterjalid võivad komposiitmaterjalis esineda nii purustatud kujul kui ka kangana. Samuti võivad purustatud tekstiilmaterjali osakeste mõõtmed varieeruda. Olenevalt lõpptulemuse soovist valitakse tekstiilmaterjali ja polümeermaatriksi osakaal materjalis. Tekstiilmaterjali osakaal tootes mõjutab suuresti komposiitmaterjali lõplikke mehaanilisi omadusi. Maatriksite valik komposiitmaterjalide valmistamisel on üpris suur, sobivad nii termosetid kui ka termoplastid, looduslikud ja sünteetilised polümeerid. [37, 40, 10]

Komposiitmaterjali on võimalik valmistada erinevate meetoditega. Näiteks on võimalik kasutada otsepressimise meetodit. Sellisel puhul kasutatakse spetsiaalset vormi ning hüdraulilist pressmasinat. Esialgu soojendatakse seade vajaliku temperatuurini ning lisatakse otse vormi töödeldavad materjalid. Seejärel suletakse vorm ning asetatakse seadmesse, kus sellele rakendatakse vajalik surve. Temperatuuri ja surve mõjul valmib komposiitmaterjalist plaat. [43]

Samuti saab komposiitmaterjale valmistada käsitsi lamineerides, kihilise paigutamise meetodiga. Selle meetodi töötlemise- ja seadmekulud on väiksemad, samas suuremahuline tootmine on ajakulukas. Käsitsi valmistamise tehnikaga valmistatakse komposiitplaat erinevatest kihtidest, vaheldumisi pannakse kangas või tekstiilkiud ning polümeermaatriks. Kihtide paksused, arv ning massiline vahekord valitakse vastavalt soovitud tulemusele. [37]

Tekstiilkiududega komposiitmaterjali on võimalik valmistada ka teoga ekstruuderi abil. Seadmesse pannakse tekstiilkiud ning polümeer, seal need segunevad temperatuuri ning hõõrdejõu mõjul. Ekstruuderist välja tulnud segumaterjal pressitakse sobivas vormis vajaliku paksusega plaadiks. Taolisel meetodil valmistati käesolevas bakalaureusetöös ümbertöödeldud tekstiilkiududega komposiitmaterjalid, ekstruuderi asemel kasutati kompaundereid. [44]

4.3 Tekstiilkiudude omadused

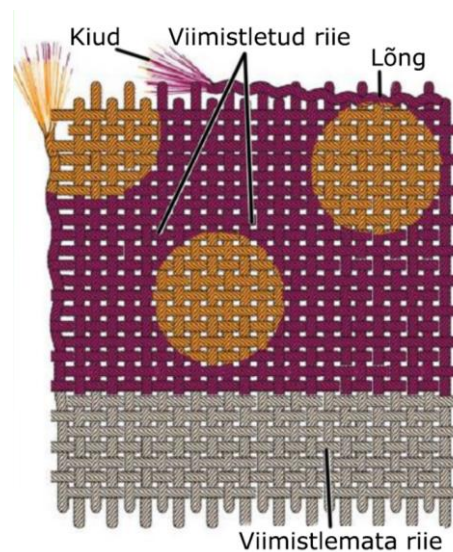
Komposiitmaterjalide valmistamisel on olulise tähtsusega kasutatud tekstiilkiudude omadused. Looduslikud kiud erinevad keemilistest kiududest paljude omaduste poolest. Looduslikel kiududel on väga spetsiifilised ja üpris konkreetsed omadused, mille põhjal on neid ka hea tuvastada. Keemilised kiud võivad pealtnäha olla üpris sarnased. Samuti on võimalik keemiliste kiudude omadustega üpris suures ulatuses manipuleerida. Looduslike kiudude puhul on omaduste muutmise piiratud.

Looduslikud kiud on tavaliselt tselluloosi- või proteiinipõhised. Tselluloossed kiud on pärit taimedelt, taimede üks peamisi ehitusmaterjale on just tselluloos. Sellised kiud on mikroskoobist vaadelduna omapärase kujuga, mistõttu on need hästi tuvastatavad. Loomadelt pärinevad kiud koosnevad suures osas proteiinidest, ka neid saab mikroskoobi abil hästi eristada. Tehiskiudude tooraineks on looduslikud polümeerid, mistõttu nende omadused sarnanevad. Looduslikud ja tehiskiud on üldiselt niiskuse suhtes tundlikud. Puuvilla-, lina-, villa- ja viskooskiu mõned konkreetsamad omadused on toodud Lisas 1 tabelitena. Sünteetilised kiud on valmistatud taastumatust toorainest. Neid tehakse sünteetilistest polümeeridest, mille omadusi modifitseeritakse soovitud tulemuseni. Sünteetilisi kiude on mikroskoobi all keeruline tuvastada. Sünteetilisi kiude mõjutab niiskus vähe või üldse mitte. Polüester- ja akrüülkiudude konkreetsamad omadused on samuti välja toodud Lisas 1 tabeli kujul. [45]

4.4 Tekstiilmaterjalide omadused

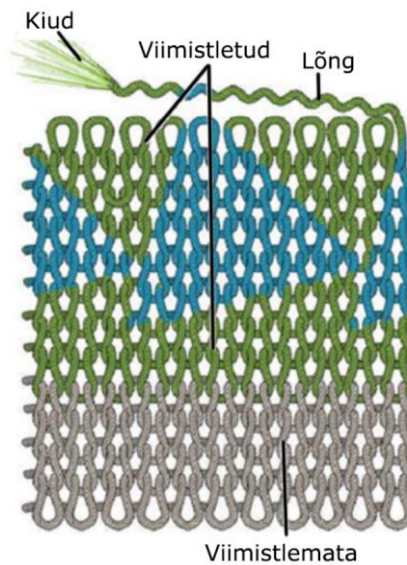
Tekstiilmaterjalide struktuur võib mõjutada komposiitmaterjali valmistamise tehnoloogia valikut. Sellepärast on oluline teada tekstiilmaterjali struktuuri. Näiteks sõltub materjalide purusti valik ning keerukuse aste just sellest.

Tekstiilmaterjalid võib struktuuri järgi jagada kolmeks: riie, trikotaaž ja lausmaterjal. Riide valmistamine toimub lihtsalt öeldes kahe niidi või lõnga komplekti põimimisel (joonis 4.3). Riide pikisuunas kulgevad lõmelõngad ning nende vahele risti põimitakse koelõngad. Seda tehakse näiteks kangastelgedel. Riide kudumisel saab moodustada erinevate valemite järgi mustreid ehk siduseid. Siduste järgi saab klassifitseerida riidet. Riie on tavaliselt lõngade asetuse tõttu teistest tekstiilmaterjalidest tugevam ja jäigem. Riide lõimesuunas on suurem tõmbetugevus, koesuunas suurem tõmbevenivus. Üheks riidet iseloomustavaks parameetrik on ka riide tihedus ehk väärtus, mis näitab lõime- ja koelõngade arvu mingil pindala ühikul. Samuti saab riideid jagada kaalu ehk pindtiheduse järgi kergeteks ja rasketeks materjalideks. Üldjuhul on suurema kaaluga riie ka paksem. [46, 12]



Joonis 4.3. Riide struktuur [47]

Trikotaaži ehk silmkoekanga struktuur koosneb omavahel seotud silmuste reast (joonis 4.4). Silmkoekanga omadused erinevad oluliselt riidest. Kootud tekstiilmaterjalid on vähem stabiilsed ning rohkem painduvad. Nende struktuur võimaldab materjali suuremat venivust. Ka trikotaaži on võimalik kududa erinevate mustrite ja struktuuridega ning nende siduste alusel saab samuti kangaid klassifitseerida. Silmkoekangaste valmistamiseks kasutatavad lõngad on tavaliselt väiksema keerduvusega kui riide struktuurides kasutatavad lõngad. [46, 12]



Joonis 4.4. Silmuskudum ehk trikotaaž [47]

Lausmaterjalid sarnanevad välimuselt riidele, kuid struktuurilt erineb see täielikult traditsioonilistest tekstiilmaterjalidest. Tegelikult on lausmaterjal ühest või mitmest tekstiilmaterjalikihist valmistatud tasapinnaline tekstiilne toode. Selle struktuurielemendid on ühendatud erinevate moodustega ning see erineb olemuselt traditsioonilisest riidest või silmuskudumist. Lausmaterjalid valmistatakse samuti kiududest, enamasti kasutatakse keemilisi kiude. See koosneb peamiselt üksikutest kiududest mitte lõngadest nagu riie või trikotaaž. Nende valmistamiseks saab kasutada madalasordilisi lühikesi kiude. Materjali struktuur oleneb kiudude asetusest, poorsusest, paksusest ning läbiõmblemise tihedusest. Lausmaterjalide paksus oleneb otstarbest. Lausmaterjale kasutatakse näiteks mähkmete, puhastuslappide, kirurgiliste näomaskide, kaitseülikondade, teepakkide, isolatsioonmaterjalide valmistamiseks. [46, 12]

4.5 Komposiitmaterjalide omadused

Komposiitmaterjalideks nimetatakse materjali, mis koosneb kahest või enamast faasist. Faaside omadused on selgelt erinevad. Komposiitmaterjal on heterogeenne ning sellel on teatavad erilised omadused, mida ei ole koostisse kuuluvatel faasidel eraldi. Üldiselt koosneb komposiitmaterjal maatriksist ja sarrusest. Maatriks annab materjalile vormi ja monoliitsuse ning sarrus tagab mehaaniliste omaduste säilimise. Komposiitmaterjalide omadused sõltuvad faaside omadustest (sarruse ja maatriksi),

faaside osakaaludest ja faasidevahelise sideme tugevusest. Samuti ka sarruse osakese suurusest, kujust, jaotusest ning orientatsioonist.

Polümeerkomposiidid pakuvad arvestatavat konkurentsi nii metallidele kui ka teistele materjalidele. Nende eelised on näiteks madal tihedus ning suur tugevuse ja elastsuse suhe tihedusega. Samuti on võimalik polümeerkomposiitide omadusi suunata soovitud tulemuste saavutamiseks. Neid on võimalik lihtsasti vormida ning valmistada ka suuregabariidilisi tooteid ühe tükina. Polümeerkomposiitidel on ka plastidele omane keemiline inertsus ning madal elektri- ja soojusjuhtivus. Polümeerkomposiitide puudusteks on piiratud töötemperatuur, madal nihketugevus ja jäikus. [48, 49]

Kuna komposiitmaterjalide omadused sõltuvad nii maatriksist kui ka sarrusest, siis võib tekstiilkiududega materjalide kasutamine välistes tingimustes seada teatud piiranguid. Lisaks sellele, et UV-kiirgus mõjutab paljusid materjale, tuleb arvestada niiskusega. Materjalide vee imavuse võime võib piirata nende kasutusalasid. Eriti tundlikud ümbritsevale keskkonnale on looduslikke kiudusid sisaldavad komposiitmaterjalid. Niiskuse imendumine materjalidesse põhjustab mõõtmete muutusi ning see omakorda tekitab mikropragusid, mis halvendavad mehaanilisi omadusi. Vee imavust mõjutab ka looduslike kiudude osakaal materjalis: mida rohkem kiude, seda suurem on veeimavus. Keemiline töötlus võib vähendada materjalide veeimavust. Kuid siiski niiskust sisaldavate materjalide tõmbetugevus väheneb. Samuti võib väheneda materjali painde- ja löögitugevus, kõvadus ning purunemiskindlus. [44, 50]

Kiudude orienteeritus ning paiknemine mõjutavad samuti komposiitmaterjalide omadusi. Orienteeritud kiududega materjalide tõmbetugevus, elastsusmoodul, eritugevus ja erijäikus on suuremad kui orienteerimata kiududega komposiitmaterjalil. Samuti on oluline ühtlane kiudude paigutus materjalis, et vältida lõpptulemuse anisotroopsust. [49]

4.6 Plastkomposiitmaterjalide kasutusvaldkonnad

Plastkomposiitmaterjale kasutatakse praegu üpris laialdaselt. Kiudarmeeringuga plastkomposiidid on levinud lennuki- ja laevaehituses. Samuti on hakatud järjest rohkem kasutama neid suuremates seeriates valmistatavates transpordivahendites: näiteks sõidu- ja veoautode, eriotstarbelised sõidukite ja rongivagunite puhul. Plastkomposiidid leiavad rakendust ka laevanduses, sh avamere naftaplatvormidel. Samuti on märkimisväärne polümeerkomposiitide kasutus elektrienergia tootmiseks mõeldud tuulikute valmistamisel.

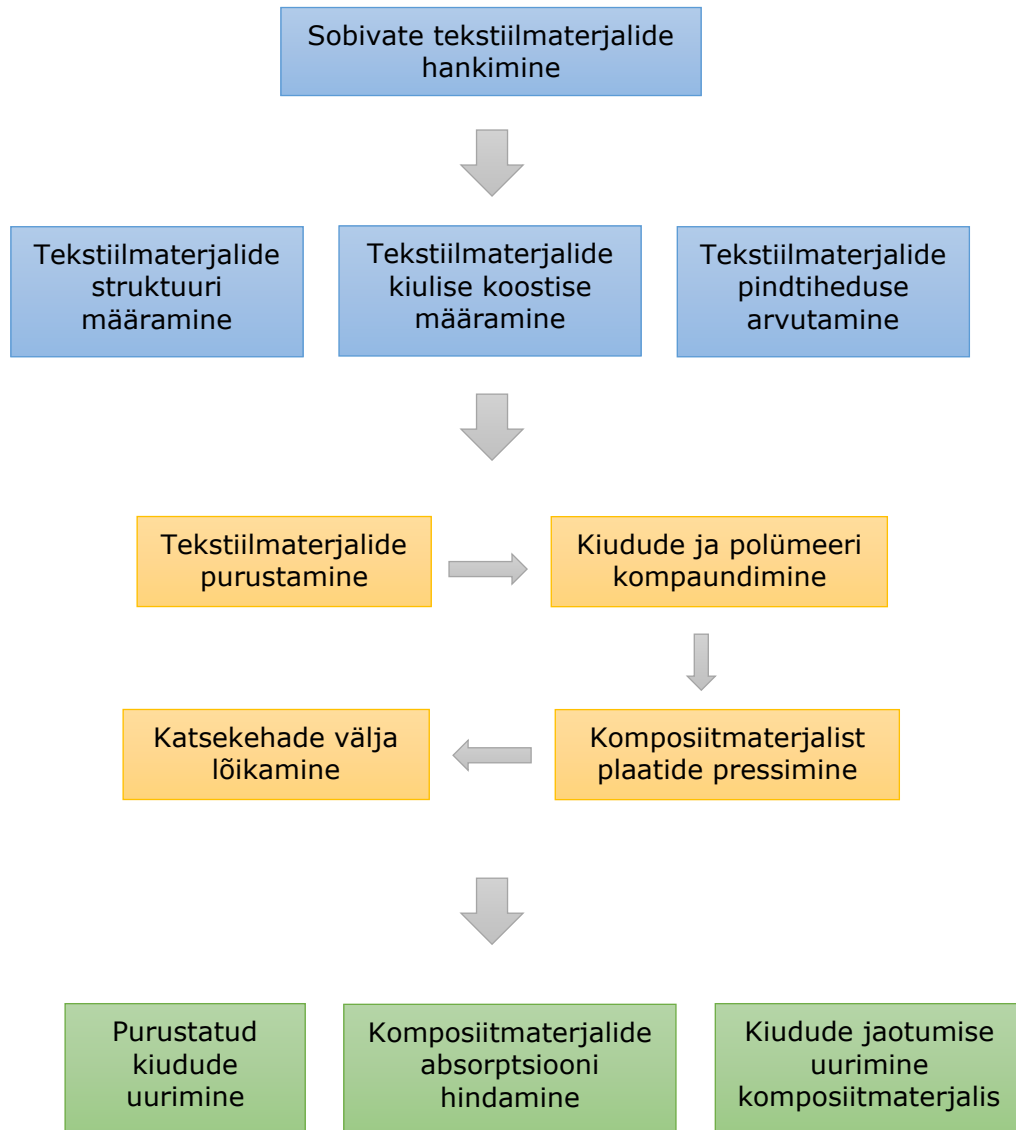
Polümeerkomposiidid on olulised ka spetsiaalsete tehnoloogiliste torustike, mahutite ja muude seadmete valmistamisel, mis peavad vastama kõigile konstruktiivsetele ja korrosioonikindluse nõuetele. Ehitus-, energeetika- ja masinatööstus on paljudes maades märkimisväärsed polümeerkomposiitide tarbijad. Samuti kasutatakse komposiitmaterjale spordivahendites ja ehitusmaterjalides. [48]

5. KATSELISE OSA KIRJELDUS

Käesoleva töö raames valmistati kuus erinevat ümbertöödeldud tekstiilkiududega plastkomposiitmaterjali. Selleks hangiti Uuskasutuskeskusest sobivad tekstiiltooted. Eksperimentaalse töö esimeses osas uuriti saadud sisendmaterjale. Esiteks määrati tekstiilmaterjalide struktuur: kas tegu on riidega või trikotaažmaterjaliga. Samuti kontrolliti rõivaste sees olevate siltide koostise kirjelduse õigsust. Selleks tuvastati valgusmikroskoobi ja FTIR-tehnoloogia abil kiude, millest tekstiiltooted olid valmistatud. Arvutati ka iga tekstiilmaterjali pindtihedus.

Eksperimentaalse töö teine osa oli komposiitmaterjalide valmistamine. Selleks purustati kõigepealt tekstiilmaterjalid. Igas komposiitmaterjalis kasutati erinevat tekstiilkiudu sarrusena. Taaskasutatud tekstiilkiud segati polümeermaterjalist maatriksiga, see on igas materjalis sama. Kõikides katsekehades on kiudude osakaal 20%. Sellise madala kiudude osakaaluga komposiitmaterjali on hiljem parem analüüsida: on hästi näha kuidas ümbertöödeldud tekstiilkiud jaotuvad polümeerses maatriksis. Saadud kiudude ja polümeeri segu pressiti komposiitmaterjaliplaadiks, millest sai omakorda välja lõigata katsekehasid edasisteks uuringuteks.

Eksperimentaalse töö kolmas osa oligi valmistatud materjalide uurimine. Esiteks vaadeldi eraldi purustatud kiudude mõõtmeid, mida kasutati materjalide valmistamiseks. Samuti hinnati iga komposiitmaterjali absorbeerimise võimet. Uuriti ka taaskasutatud tekstiilkiudude jaotumist maatriksis. Kogu katselise osa töökäik on lihtsustatud kujul välja toodud joonisel 5.1, kus sinised kastid iseloomustavad praktilise töö esimest osa, kollased teist osa ning rohelised kolmandat osa.



Joonis 5.1. Katselise osa töökäik lihtsustatud kujul

6. KASUTATUD MATERJALID JA MEETODID

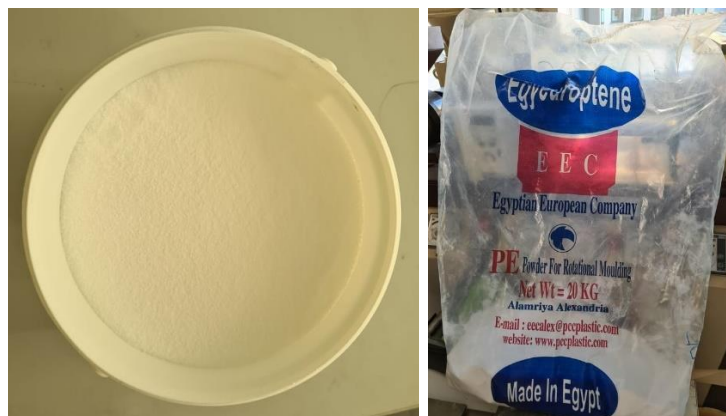
6.1 Kasutatud materjalid

Tekstiilmaterjalid, mida kasutati komposiitmaterjalide valmistamiseks, saadi MTÜ Uuskasutuskeskusest. Autor käis mittetulundusühingu sorteerimishoones sobivaid materjale ise otsimas. Alloleval joonisel (6.1) on näha, milliseid tekstiiltooteid kasutati komposiitmaterjalide valmistamiseks.



Joonis 6.1. Uuskasutuskeskusest toodud tekstiiltooted, mida kasutati plastkomposiitmaterjalide valmistamiseks. Rõivaste eeldatav kiuline koostis alustades ülemiselt realt vasakult: lina, puuvill, vill. Alumine rida vasakult: viskoos, akrüül, polüester.

Komposiitmaterjali sarruse jaoks kasutati kuut erinevat tekstiilmaterjali kiudu: lina, puuvill, vill, viskoos, akrüül ja polüester. Materjali maatriksiks kasutati polümeeri LDPE-d ehk madaltihedat polüetüleen, mis on pärit ettevõttest *Egyptian European Company*. Pulbrilisel kujul polüetüleen on näha joonisel 6.2.



Joonis 6.2. Komposiitmaterjali valmistamiseks kasutatud polümeer LDPE

6.2 Kasutatud meetodid ja seadmed

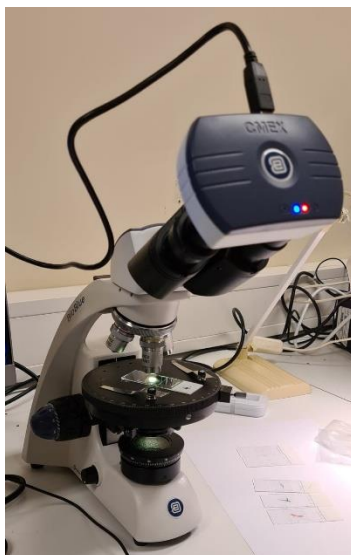
6.2.1 Tekstiilmaterjalide struktuuri, kiulise koostise ja pindtiheduse määramine

Tekstiilmaterjalide struktuuri määramiseks kasutati digitaalset mikroskoopi Dino-Lite, mida oli võimalik oma arvuti külge ühendada ning koos allalaetava tarkvaraga (DinoCapture 2.0) kasutada. Mikroskoopi on näha joonisel 6.3. Tekstiilmaterjalide struktuuri määramiseks lõigati uuritavatest rõivaesemetest välja sobiva suurusega tükid ning asetati need mikroskoobi alla. Kasutati 40-kordset suurendust. Tehti kindlaks, kas tegemist on riide või trikotaažiga.



Joonis 6.3. Digitaalne mikroskoop Dino-Lite

Kiudude tuvastamiseks kasutati valgusmikroskoopi BioBlue, mis on nähtav joonisel 6.4. Mikroskoop ühendati kaamera abil arvutiga ning kiudude vaatlemiseks kasutati tarkvara ImageFocus4. Kiudude tuvastamiseks asetati tekstiilmaterjalitükist eemaldatud väike kimp kiude alus- ja pealisklaasi vahele koos destilleeritud veega ning asetati see mikroskoobi alla. Kiudude määramiseks kasutati suurendusi 100 korda ja 400 korda.



Joonis 6.4. Mikroskoop BioBlue

Lisaks kasutati sünteetiliste kiudude määramiseks FTIR spektroskoopi Interspec 200-X (joonis 6.5). Analüüsimiseks asetati tükike kangast mitmekordselt seadmesse.



Joonis 6.5. FTIR spektroskoop Interspec 200-X

Rõivaste materjalidel määrati ka pindtihedus, aluseks võeti standard EVS-EN 12127:2000 [51]. Pindtiheduse arvutamiseks lõigati kääridega tekstiiltoodetest katsekehad suurusega 10 cm x 10 cm. Igast materjalist lõigati kolm katsekeha. Seejärel jäeti väljalõigatud ruudud 24 tunniks relakseeritud olekus konditsioneerima. Pärast seda

kaaluti katsekehad ning mõõdeti uuesti üle pikkused ja laiused katsekeha kolmest kohast. Kaaluti Mettler AE 200 kaalul, mille mõõtühikuks on grammid ning täpsuseks neli kohta peale koma. Kaal on nähtav joonisel 6.6.



Joonis 6.6. Kaal Mettler AE 200

Seejärel arvutati pindtihedus standardis toodud valemi (6.1) abil:

$$M = \frac{m \times 10000}{A} \quad (6.1)$$

kus M – pindtihedus, g/m²,

m – katsekeha mass, g,

A – katsekeha pindala, cm².

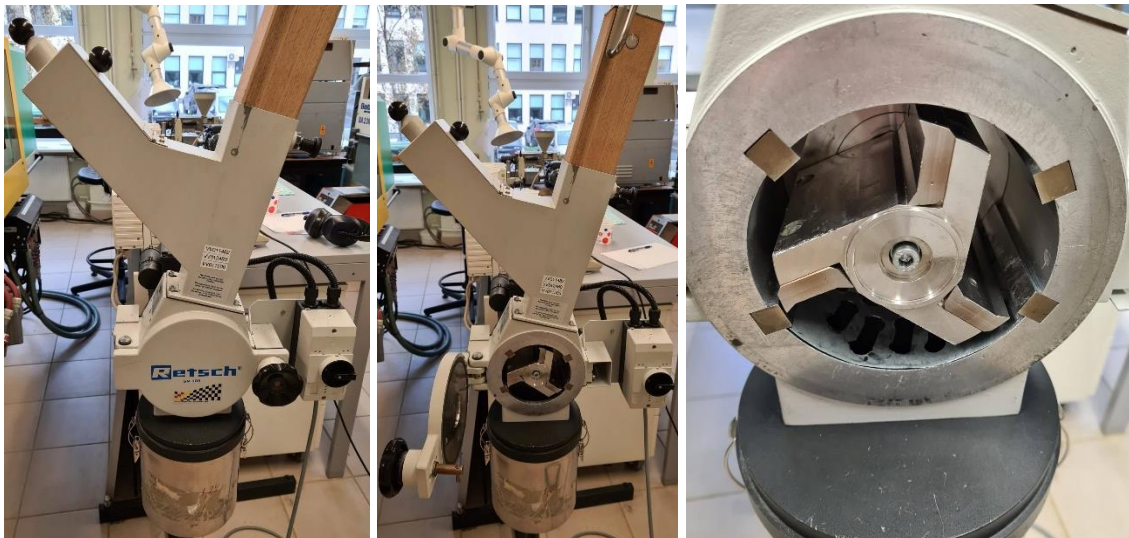
6.2.2 Komposiitmaterjalide valmistamine

Komposiitmaterjalide valmistamise töökäik oli järgmine:

1. Tekstiilmaterjalide purustamine
2. Algmaterjalide koguse kaalumine
3. Kiudude ja tahke polümeeri käsitsi kokku segamine
4. Materjalide segamine ja sulatamine kompaundersis
5. Saadud homogeense segu jahtumine
6. Tahke komposiitmaterjali segu käsitsi tükeldamine

7. Komposiitmaterjali segu tükikeste asetamine vormi
8. Materjali pressimine plaadiks
9. Vormi ja selles oleva komposiitmaterjaliplaadi jahutamine veega
10. Komposiitmaterjaliplaadi eemaldamine vormist ja kuivatamine
11. Katsekehade välja löikamine
12. Katsekehade kuivatamine

Järgnevalt on detailselt kirjeldatud komposiitmaterjalide valmistamisprotsess. Kõigepealt purustati tekstiilmaterjalid peeneks. Purustamiseks kasutati spetsiaalset purustit Retsch SM 100, mis on näha joonisel 6.7. Seadme tööpõhimõte on järgmine: ülaosast söodetakse sisse purustamist vajav materjal, seadme keskosas paikneb pöörlev nugapurusti ning allosas on anum, kuhu koguneb purustatud materjal. Tekstiilmaterjal lasti läbi purusti kaks korda, et saavutada vajalik kiudude purustusaste. Esimesel korral kasutati seadmes sõela avasuurusega 1 cm. Teise purustuse jaoks pandi seadmesse väiksemate avadega sõel, mille ühe ava läbimõõt oli 2 mm.

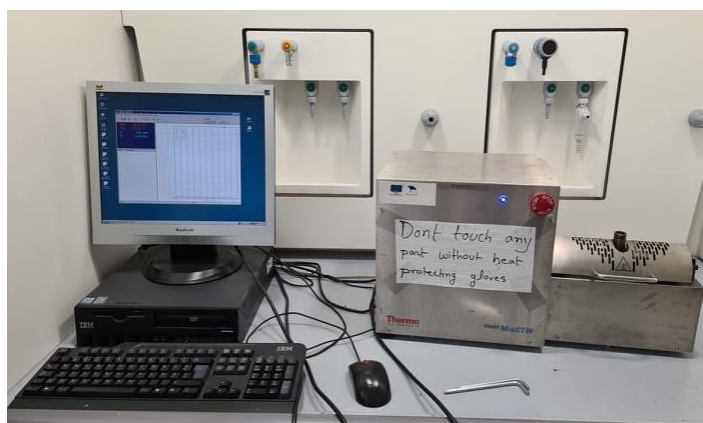


Joonis 6.7. Purusti Retsch SM 100. Vasakpoolne foto - töörežiimis seade; keskmine foto - avatud luugiga seade; parempoolne foto – purustusmehhanism.

Peale purustamist kaaluti komposiitmaterjali mõlemast toormest sobiv kogus. Tekstiilkiudude ja polümeeri osakaaluks materjalis valiti 20/80. Kaaluti 2 g igast tekstiilmaterjali kiu liigist ning seejärel lisati igale liigile 8 g polümeeri. Esialgu segati

materjalid omavahel käsitsi toetemperatuuril, et vähendada kompaundersis segunemise aega ning soodustada segu ühtlust. Seejärel lisati segu kompaundersisse.

Materjalide kokkusegamiseks kasutati kompaunderit HAAKE MiniCTW (joonis 6.8). Seadme juhtimiseks kasutati arvutitarkvara MiniCTW. Käsitsi segatud materjalid lisati lehtri abil väikesest avast masinasse sulatamiseks ja täielikuks segunemiseks. Seadme töötamiskiirus materjalide segunemisel oli 50 rpm (pööret minutis, inglise *k revolutions per minute*) ning segunenud materjali väljutamisel 100 rpm. Seadmest tuleb välja juba segunenud mass. Sellel lasti jahtuda toetemperatuuril.



Joonis 6.8. Kompaunder HAAKE MiniCTW

Tekstiilkiudude ja polümeeri segu suruti hüdraulilise pressi ja spetsiaalsete vormide abil plaatiks. Komposiitmaterjalist plaatide valmistamiseks tükeldati eelnevalt kompaundersis segatud mass käsitsi väikesteks tükkideks. Väiksemaid tükke on lihtsam vormi jaotada ning samuti sulab materjal kiiremini ja ühtlasemalt. Kiudude ja polümeeri segu tükid asetati 2 mm kõrgusesse ümarate nurkadega nelinurksesse vormi. Vormi alumiseks ja ülemiseks osaks oli õhuke metallist leht. Vorm koosnes kolmest detailist: alumine leht, kuju andev ning servadeks olev kiht ja pealmine leht. Vormi osad ei ole omavahel kinnitatud.

Hüdraulilise pressi mõlemad pooled olid soojendatud 180 °C-ni. Seade on näha joonisel 6.9. Esiialgu asetati vormid koos materjaliga eelsoojendatud seadme plaatide vahele viieks minutiks soojenema, rakendati madalat survet, umbes 30 bar'i. Materjali pressimisel plaatiks suurendati survet, selleks rakendati vormidele umbes 70 bar'i rõhku ning hoiti seda jälle viis minutit.

Ettenähtud aja möödumisel eemaldati vormid koos komposiitmaterjaliplaatidega kuumast seadmest ning jahutati veega. Peale jahutust eemaldati valmis materjal vormist ning kuivatati.



Joonis 6.9. Hüdrauliline soojendatud plaatidega press

Valmistatud komposiitmaterjaliplaatidest ümmarguste katsekehade välja lõikamiseks kasutati Dezimalpresse DP 36 hüdraulilist pressi ning 18 mm diameetriga vormi. Need on näha joonisel 6.10. Komposiitmaterjalist plaat asetati koos alusega pressi alumisele pinnale, materjalile asetati teravate servadega lõikevorm. Pressi ülemine pool liigub alla ning surve jõul lõikab vorm plaadist kettakujulise tüki.



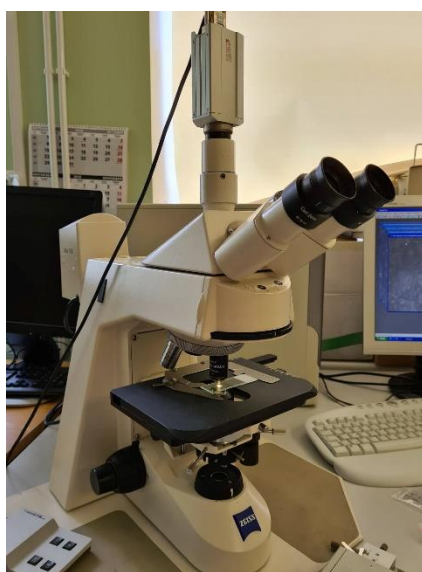
Joonis 6.10. Dezimalpresse DP 36 hüdrauliline press ning 18 mm diameetriga lõikevorm

6.2.3 Valmistatud komposiitmaterjalide uurimine

Kiudude läbimõõdu ja pikkuse määramine. Purustatud tekstiilkiudude uurimisel vaadeldi kiudude diameetreid ja pikkuseid mikroskoobi abil. Kasutati sama seadet, mida kiudude tuvastamisel: mikroskoopi BioBlue (joonis 6.4). Pikkuseid vaadeldi mikroskoobis suurendusega 40 korda ning diameetreid suurendusega 400 korda. Kiudude mõõtmete määramiseks kasutati programmi ImageJ, mille abil sai mõõta mikroskoobipildil esinevaid objekte. Andmetest loodi kokkuvõttev tabel ning toodi välja keskmised väärtused ning standardhälbed.

Absorptsioonikatse. Hinnati iga materjali absorbeerimise võimet. Selleks kasutati eelnevalt valmistatud komposiitmaterjaliplaatidest väljalõigatud väikeseid katsekehasid. Eelnevalt kuivatati katsekehad vaakumahjus. Seejärel mõõdeti ära katsekehade paksus, diameeter kahest kohast ning iga katsekeha algkaal. Kasutati jälle Mettler AE 200 kaalu (joonis 6.6). Katsekehad jäeti destilleeritud vette seisma ööpäevaks. Peale ettenähtud aja möödumist katsekehad kuivatati paberiga ning sooritati samad mõõtmised: määrati katsekeha paksus, diameeter kahest kohast ning mass. Arvutati välja iga katsekeha parameetrite muutused.

Kiudude jaotumine komposiitmaterjalis. Kiudude jaotumist komposiitmaterjalis uuriti valgusmikroskoobiga Axioskop 2 (joonis 6.11). Seadmel kasutati suurendust 230 korda. Digitaalse kaamera abil, mis käis mikroskoobi külge, oli võimalik otseülekandena manada nähtav pilt arvutisse. Kiudude jaotumise uurimiseks komposiitmaterjalis lõigati skalpelli ja noa abil katsekehadest õhukesed lehed. Lehed lõigati nii horisontaalselt plaadi pinnaga kui ka risti plaadi pinnaga. Neid erinevaid lõikeid vaadeldi eraldi.



Joonis 6.11. Valgusmikroskoop Axioskop 2

7. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

7.1 Tekstiilmaterjalide struktuuri määramine

Tekstiilmaterjalide struktuuri määramisel tuvastati kas tegu on riide või trikotaažiga. Mikroskoobiga vaatlemiseks välja lõigatud katsekehad ning nende kiuline koostis on näha joonisel 7.1. Tulemused on märgitud tabelis 7.1.

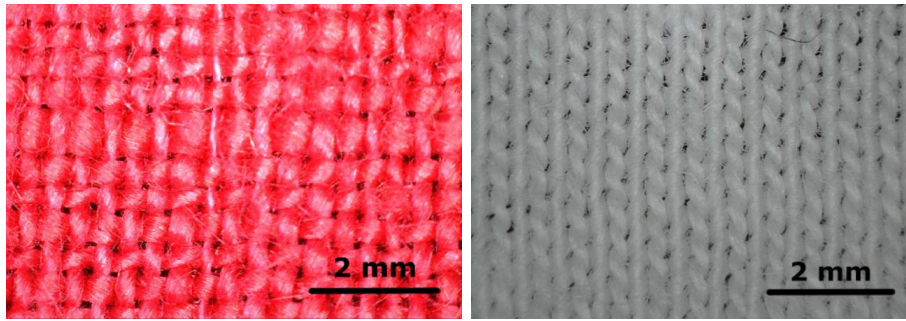


Joonis 7.1. Tekstiilmaterjalidest katsekehad. Ülevalt vasakult: akrüül, puuvill, polüester. Alt vasakult: lina, vill, viskoos.

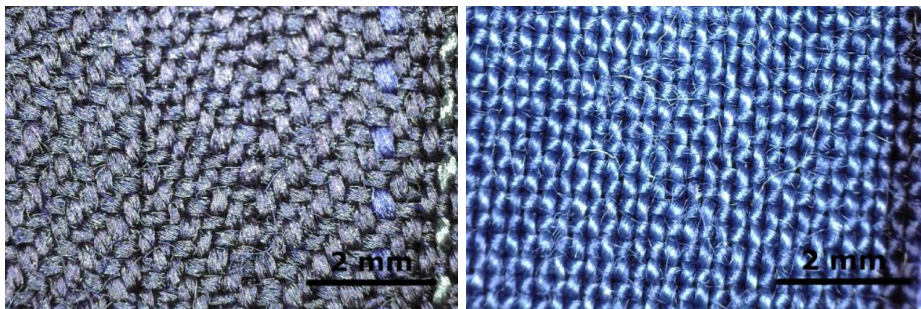
Tabel 7.1. Tekstiilmaterjalide struktuurid

Tekstiilmaterjal	Struktuur
1. Lina	riie
2. Puuvill	trikotaaž
3. Vill	riie
4. Viskoos	riie
5. Akrüül	trikotaaž
6. Polüester	trikotaaž

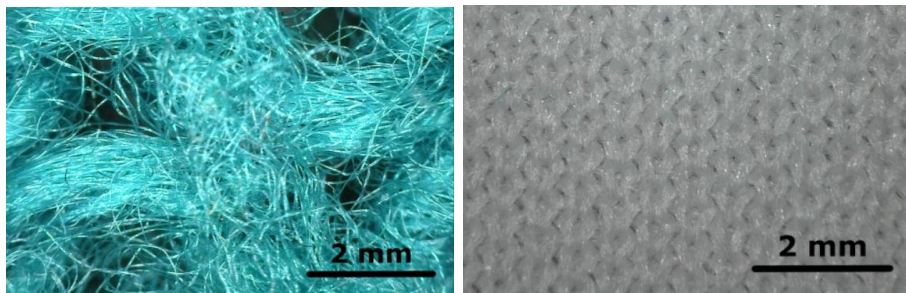
Nii riide kui ka trikotaaži struktuuriga tekstiilmaterjale oli võrdses koguses, mõlemat on kolm. Tekstiiltoodete valimisel Uuskasutuskeskuses ei lähtunud materjali stukturist, selline tulemus on juhuslik. Joonistel 7.2 kuni 7.4 on näha mikroskoobist avanevat pilti tekstiilmaterjalide struktuuri uurimisel.



Joonis 7.2. Vasakul on tekstiilmaterjal nr 1 (lina), paremal tekstiilmaterjal nr 2 (puuvill)



Joonis 7.3. Vasakul on tekstiilmaterjal nr 3 (vill), paremal tekstiilmaterjal nr 4 (viskoos)

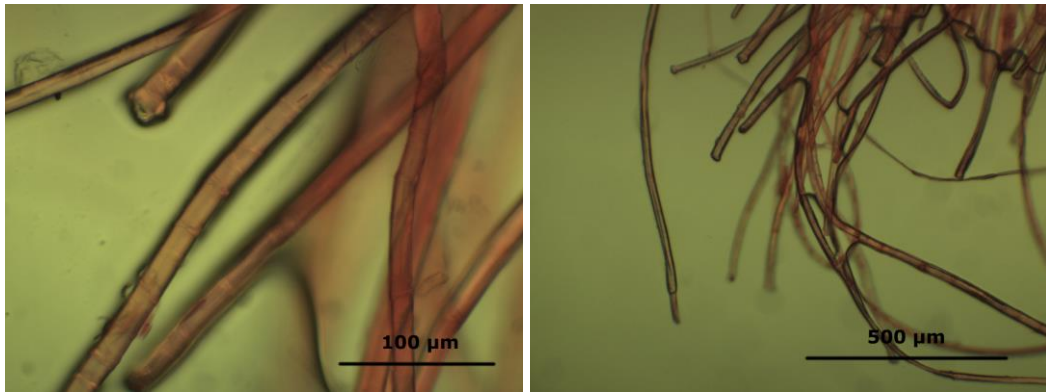


Joonis 7.4. Vasakul on tekstiilmaterjal nr 5 (akrüül), paremal tekstiilmaterjal nr 6 (polüester)

7.2 Tekstiilkiudude tuvastamine

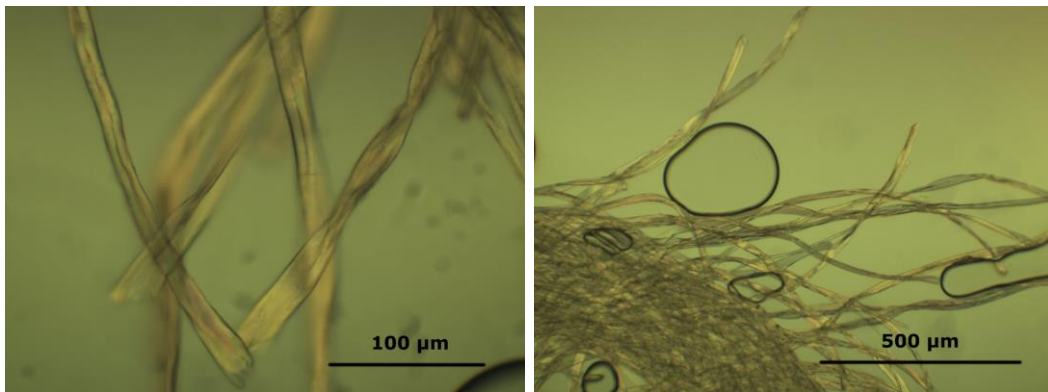
Kuigi tekstiiltoodete küljes olevatel siltidel oli märgitud, mis materjaliga on tegu, kontrolliti siiski nende õigsust. Valgusmikroskoobi abil tuvastati lihtsasti lina, puuvill, vill ja viskoos. Akrüül- ja polüesterkiudusid ei olnud võimalik tuvastada antud meetodiga.

Linakiule on iseloomulikud kiu pinnal teatud vahemaade tagant asetsevad ristisuunalised sõlmed, mida on näha ka piisava suurendusega mikroskoobi pildilt. Linakiude on näha kahe erineva suurendusega joonisel 7.5.



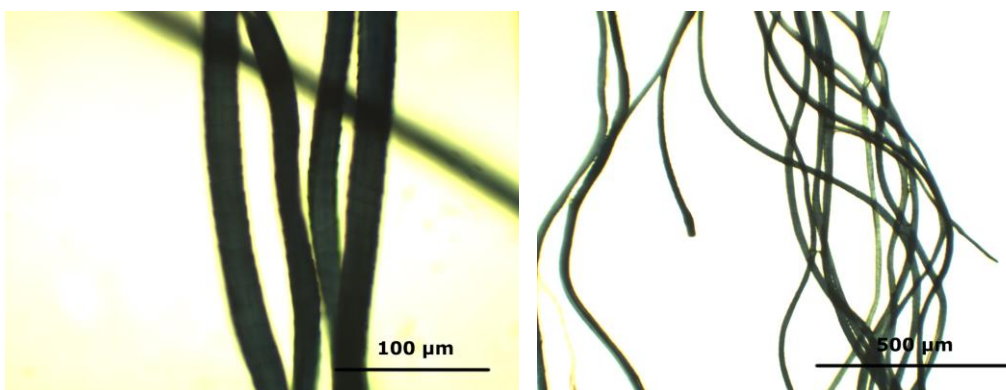
Joonis 7.5. Linakiud mikroskoobipildis: vasakul suurendusega 400x, paremal suurendusega 100x

Puuvillakiule on iseloomulik selle keerduvus, mida on näha ka joonisel 7.6. Joonisel olevad mustad jooned on õhumullid destilleeritud vee sees.



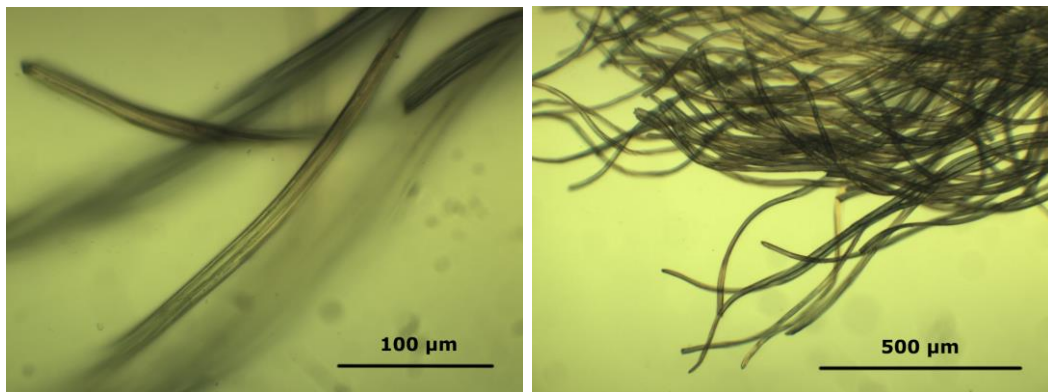
Joonis 7.6. Puuvillakiud mikroskoobipildis: vasakul suurendusega 400x, paremal suurendusega 100x

Villakiule on iseloomulik selle pinna „soomuseline“ ehitus. Suurema suurendusega on seda üpris hästi näha joonisel 7.7.



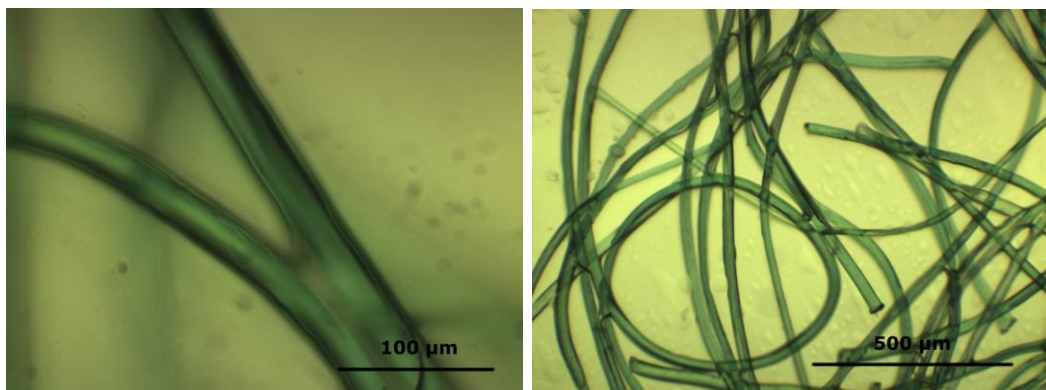
Joonis 7.7. Villakiud mikroskoobipildis: vasakul suurendusega 400x, paremal suurendusega 100x

Viskoosile omaseks tunnuseks on selle kiul esinevad jooned. Pikisuunalisi jooni ning viskooskiudu on näha joonisel 7.8.

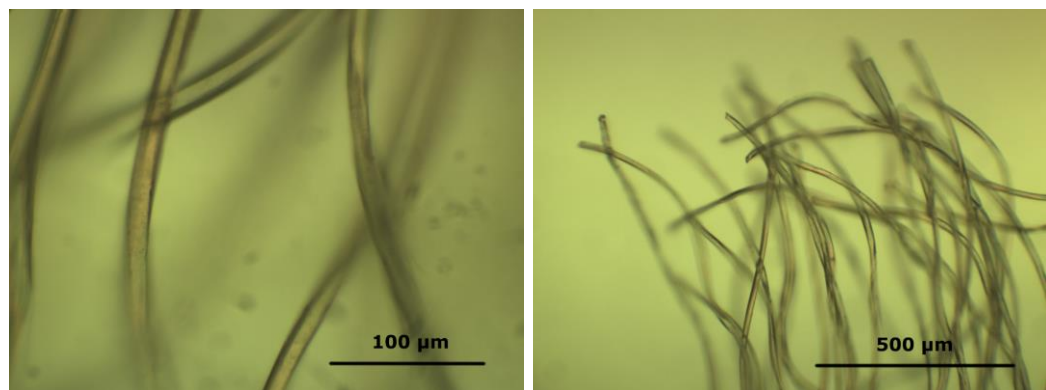


Joonis 7.8. Viskooskiud mikroskoobipildis: vasakul suurendusega 400x, paremal suurendusega 100x

Akrüül- ja polüesterkiud on mikroskoobi pildis suhteliselt sarnased. Ehk tegelikult ei saa neid tuvastada valgusmikroskoobi abil. Nende tuvastamiseks kasutati FTIR-analüüsi. Valgusmikroskoopiaga uuritud akrüül- ja polüesterkiude näeb joonistel 7.9 ja 7.10.



Joonis 7.9. Akrüülkiud mikroskoobipildis: vasakul suurendusega 400x, paremal suurendusega 100x



Joonis 7.10. Polüesterkiud mikroskoobipildis: vasakul suurendusega 400x, paremal suurendusega 100x

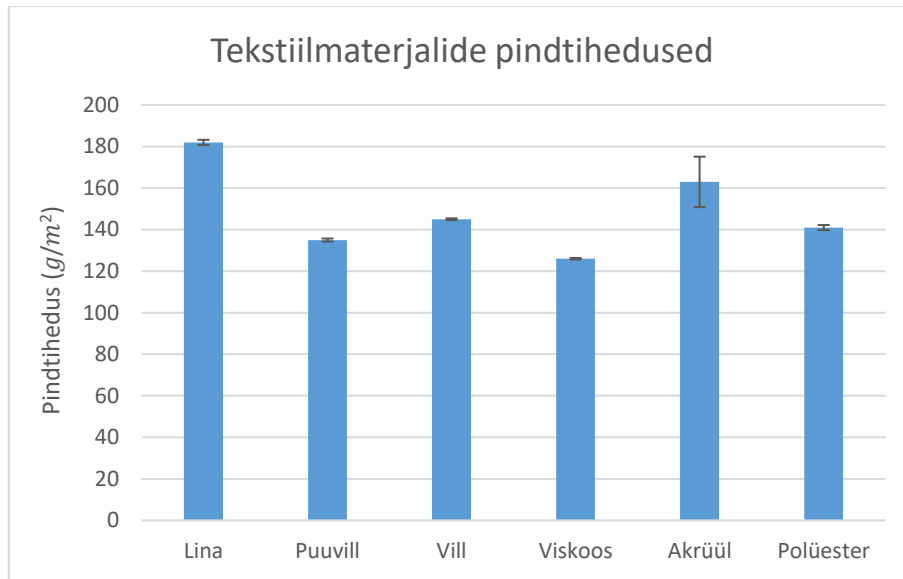
7.2.1 FTIR-analüüs

Sünteesilisi kiude tuvastati FTIR spektromeetri abil. Analüüsi käigus saadud spektreid võrreldi FTIR tarkvara andmebaasis olevate spektritega. Saadud spektreid võrreldakse puhaste materjalide spektritega. Seega tekstiilmaterjalides olevad lisaained, näiteks pigmendid, mõjutavad tulemust. Polüesterkiududest materjal tuvastati lihtsasti. Analüüsi tulemus väitis, et 94%-lise tõenäosusega on tegemist polüestriga. Akrüülkiududest materjali tuvastamisega oli aga raskusi. FTIR-analüüs ei pakkunud uuritud kiu spektrile sobivat vastet. Suure tõenäosusega sisaldavad selle tekstiilmaterjali kiud palju lisaaineid, mis segasid materjali tuvastamist. Lisas 2 on välja toodud FTIR-analüüsi täpsed tulemused. Seal on näha mõningaid andmebaasi materjale, millega katsekeha võrreldi. Välja on toodud andmebaasi poolt pakutud materjali ja katsekeha vaheline suhteseos (inglise k *Score*).

Antud juhul oli tänu tekstiiltoodete sees olevatele siltidele aimdus materjali kiulise koostise kohta. Vaatamata sellele, et on tõenäosus, et tegu võib olla mõnest muust materjalist kiududega, lähtutakse edasises töös, et üks tekstiiltoode on valmistatud polüesterkiududest ning teine on akrüülkiududest. Tulevikus oleks mõistlik kasutada spetsiaalset tekstiilmaterjalide andmebaasi, mitte polümeeride andmebaasi nagu tehti käesolevas töös.

7.3 Tekstiilmaterjalide pindtihedus

Iga tekstiiltoote materjalile arvutati pindtihedus. Arvutuslikud keskmised pindtihedused on toodud diagrammina (joonis 7.11), juurde on märgitud ka standardhälbed. Lisas 3 on toodud tekstiilmaterjalide pindtiheduse arvutamisel kasutatud algandmed ning vahetulemused tabelite kujul.



Joonis 7.11. Tekstiilmaterjalide pindtihedused (g/m²)

Arvutustest selgub, et tekstiilmaterjalidest on kõige suurema pindtihedusega linane materjal, keskmiselt (182±1,27) g/m² ning kõige väiksema väärtusega on viskoosist materjal, (126±0,36) g/m². Akrüülkiududega tekstiilmaterjali keskmine pindtihedus on (163±12,14) g/m². Villa- ja polüesterkiududest tekstiilmaterjalide pindtihedused on sarnase väärtusega, vastavalt (145±0,45) g/m² ja (141±1,21) g/m². Puuvillakiuga valmistatud tekstiilmaterjali keskmine pindtihedus on (135±0,73) g/m². Diagrammilt on näha ka, et akrüülkiududest materjali standardhälve on teistest suurem. Siinkohal võib olla põhjuseks katsekehade lõikamise ja mõõtmise ebatäpsused, kuna see materjal oli väga kohev ning ebastabiilne. Pindtihedus oleneb materjali valmistamise viisist ja lõnga joontihedusest ning võib suures ulatuses varieeruda. Antud tulemused näitavad selle töö jaoks kogutud tekstiilmaterjalide pindtiheduste väärtuseid. Materjalide pindtihedusest sõltub aga edasisel komposiitmaterjalide valmistamisel purustamise viis ja raskus. Mida tihedam ja raskem on materjal, seda rohkem kulub energiat selle purustamiseks.

7.4 Komposiitmaterjalide valmistamine

Komposiitmaterjalide valmistamisel alustati tekstiilmaterjali purustamisest. Et saavutada sobiv purustusaste, oli vaja materjali purustada kaks korda. Peale esimest purustamist oli väljatuleva segu sees näha veel kanga tükikesi ning lõngajuppe. Nii

suure osakese suurusega sarruse materjal raskendaks ühtlase koostisega plastkomposiitmaterjali valmistamist. Peale teist purustamist, kui kasutati seadmes väiksema avaga sõela, oli väljund pulbritaoline. Enam ei olnud võimalik eristada kanga või lõnga tükke. Mõlemat varianti on näha joonisel 7.12.



Joonis 7.12. Purustatud tekstiilmaterjalid: vasakul on ühekordselt purustatud materjal, mille puhul kasutati sõela avasuurusega 1 cm; paremal on kahekordselt purustatud materjal, mille teisel purustamisel kasutati väiksema avaga ehk 2 mm sõela.

Kahekordselt purustatud tekstiilmaterjal oli väga lendlev ning staatilist elektrit täis. Kõik purustatud tekstiilmaterjalid pandi selletõttu suletavasse plastkotti hoiule kuni kompaundimiseni (joonis 7.13).

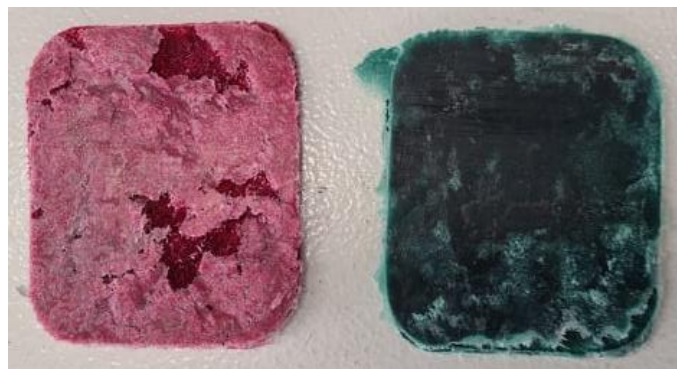


Joonis 7.13. Komposiitmaterjali tegemiseks valmis purustatud tekstiilmaterjal

Peale kompaundimist ning segu pressimist plaadiks, tuli valmis komposiitmaterjal eemaldada vormist. Komposiitmaterjal tuli vormist välja väga raskelt, õhukesed metallist lehed olid kleepunud materjali külge. Loodusliku ja tehiskiuga (lina, puuvill, vill ja viskoos) valmistatud materjalid tulid vormist eriti raskelt välja. Oli näha, et komposiitmaterjalist plaadi pind oli eemaldamise käigus saanud kahjustada.

Samuti oli näha, et lina-, puuvilla-, villa- ja viskooskiududega komposiitmaterjal ei täitnud korralikult kogu vormi: kohati oli plaadi paksus ebahütlane ning õhuline, esines vormi pinnast madalamaid kohti. Kuna palju materjali oli vormist välja pressinud, siis ei tohiks olla põhjuseks ebapiisav materjali kogus antud vormi jaoks. Siinkohal võib olla asi vormis: kolmest osast koosnev vorm, mille osad ei ole üksteise suhtes liikumatud ei sobi selliste materjalide valmistamiseks. See tähendab, et taoline vorm ei suuda hoida piisavalt hästi vormitavat materjali enda sees.

Süntheetiliste kiududega (polüester ja akrüül) komposiitmaterjalist plaatide valmistamisel oli vähem probleeme: need tulid vormist välja sileda ja ühtlase pinnaga ning materjal oli vormi üpris korralikult ära täitnud. Kuigi ka nende puhul oli palju materjali vormist välja pressinud. Valmis komposiitmaterjaliplaate on näha joonistel 7.14 kuni 7.16.



Joonis 7.14. Komposiitmaterjalist plaadid: punane on linakiuga ja roheline akrüülkiuga

Joonisel 7.14 on näha, milline on loodusliku ja sünteetilise kiuga valmistatud komposiitmaterjalide vahe. Akrüülkiuga komposiitmaterjali pind on sile ja ühtlane. Linakiuga komposiitmaterjali pind on puudulik ning suures osas defektne, osa pinnast on jäänud kas vormi külge või polnud vormi jäänud piisavalt materjali, et tekitada ühtlane pind.



Joonis 7.15. Komposiitmaterjalist plaadid: valge on puuvillakiuga, must villakiuga



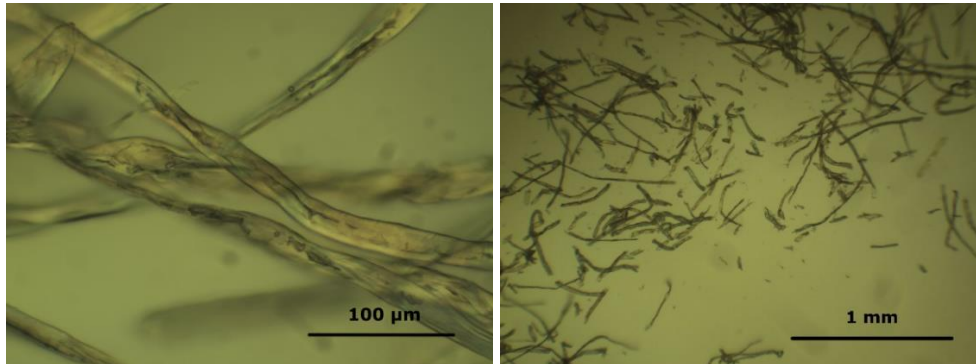
Joonis 7.16. Komposiitmaterjalist plaadid: valge on polüesterkiuga, tumesinine viskooskiuga

Heledatel komposiitmaterjaliplaatidel (joonis 7.15 ja 7.16) on näha ka kuidas mingi osa vormi pinnaviimistlusest jäi eemaldamisel produkti külge. Mustjad või määrdunud välimusega kohad on osakesed vormi küljest. Samuti on polüesterkiuga plaadil näha, kuidas materjal on vormist välja pressinud.

Komposiitmaterjalide valmistamine võis olla raskendatud kuna tekstiilmaterjalid sisaldavad palju lisaaineid, näiteks pigmente. Samuti võivad tarbijajärgsed tekstiiltooted sisaldada mustust, erinevaid võõriseid ning olla ka üleüldiselt kehva kvaliteediga. Ilmselt on oluline kasutatavaid tekstiilkiude eelnevalt töödelda, et hõlbustada komposiitmaterjalide valmistamist. Järgmisel korral tuleks kasutada teistsuguse pinnaviimistluse või materjaliga vormi või kasutada lisaaineid, mis hõlbustaksid materjali eemaldamist vormist. Kahjustunud komposiitmaterjali pind võib mõjutada ka edasisi analüüse.

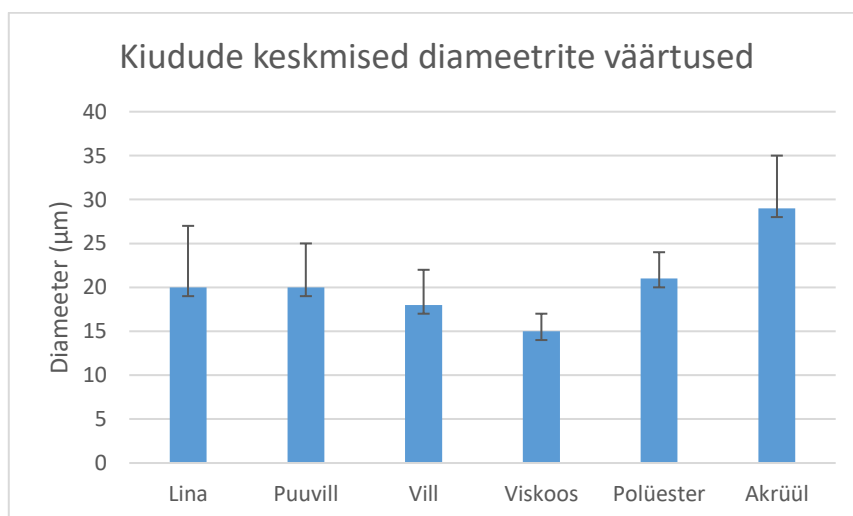
7.5 Purustatud kiudude mõõtmed

Lähemalt uuriti komposiitmaterjalide valmistamiseks kasutatud purustatud tekstiilmaterjali kiudude mõõtmeid. Vaadeldi kiudude diameetreid ja pikkuseid. Joonisel 7.17 on näha, milline pilt avanes mikroskoobist purustatud kiudude mõõtmete analüüsimisel. Teiste purustatud kiudude fotod on toodud välja Lisas 4.



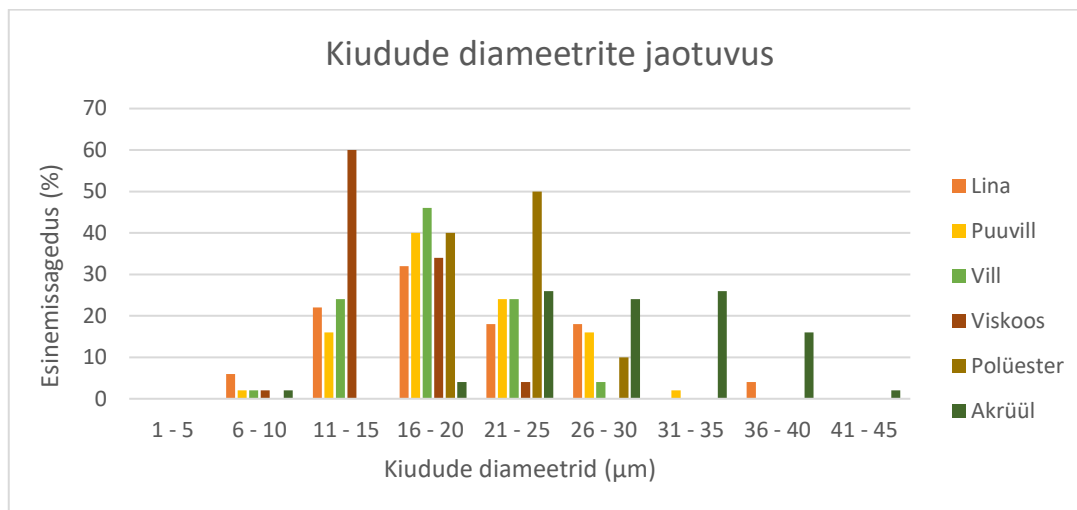
Joonis 7.17. Näide mikroskoobis avanevast pildist purustatud puuvillakiu näol: vasakpoolne foto on suurendusega 400x ja parempoolne 40x

Uuritud purustatud kiudude diameetrite keskmised väärtused mikromeetrites ning standardhälbed on näha joonisel 7.18. Tulemustest on näha, et eranditult kõige suurema keskmise diameetriga on akrüülist tekstiilmaterjali kiud, 29 µm. Ning märgatavalt väiksema keskmise läbimõõduga on viskooskiud, 15 µm. Polüesterkiudude keskmine diameeter on 21 µm. Lina- ja puuvillakiu keskmised väärtused on samad, 20 µm. Villakiu keskmine diameeter on 18 µm. Standardhälbed näitavad siin, kui palju erinesid mõõtetulemused keskmisest väärtusest.



Joonis 7.18. Purustatud kiudude keskmised diameetrite väärtused (µm)

Kiudude diameetrite jaotuvust on näha joonisel 7.19. On näha, et akrüülkiud on väga erinevate läbimõõtudega. Polüester- ja viskooskiudude diameetrid on enam-vähem samas suurusjärgus. Lina-, puuvilla- ja villakiud on samuti väga erinevate diameetrite väärtustega.



Joonis 7.19. Kiudude diameetrite jaotuvuse graafik

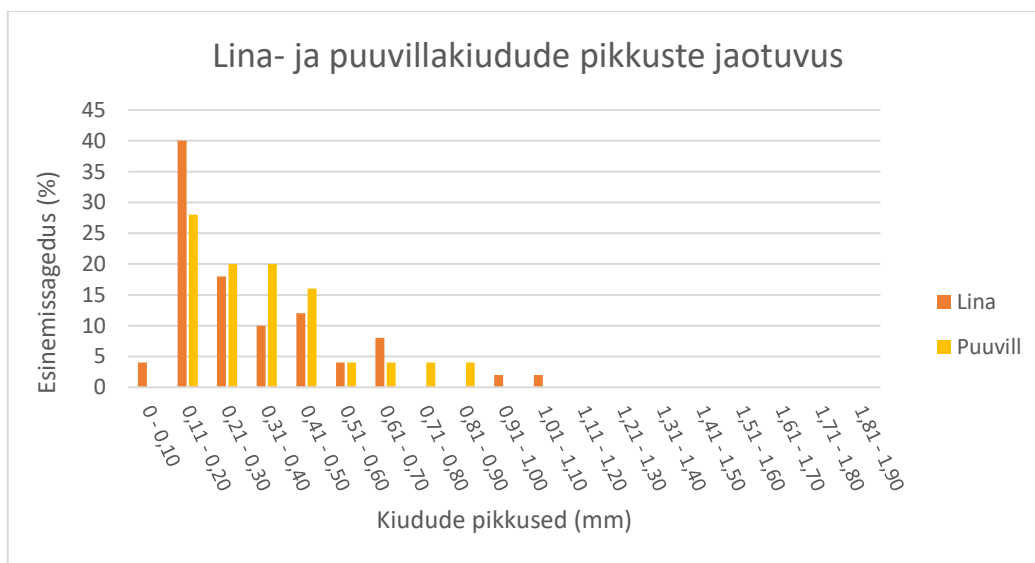
Kiudude pikkuste keskmised väärtused millimeetrites ning standardhälbed on näha tabelis 7.2. Kõige suurema väärtusega on akrüülkiud ning kõige väiksema keskmise pikkusega on viskooskiud. Samuti on näha, et polüestri keskmise pikkuse väärtus on teisel kohal. Tabelist näeb, et standardhälve on kohati keskmise pikkusega lähedase väärtusega. See näitab, et kiud on väga ebaühtlase pikkusega, leidub nii pikki kui ka väga lühikesi kiudusid.

Tabel 7.2. Erinevate purustatud kiudude keskmised pikkusete väärtused (mm)

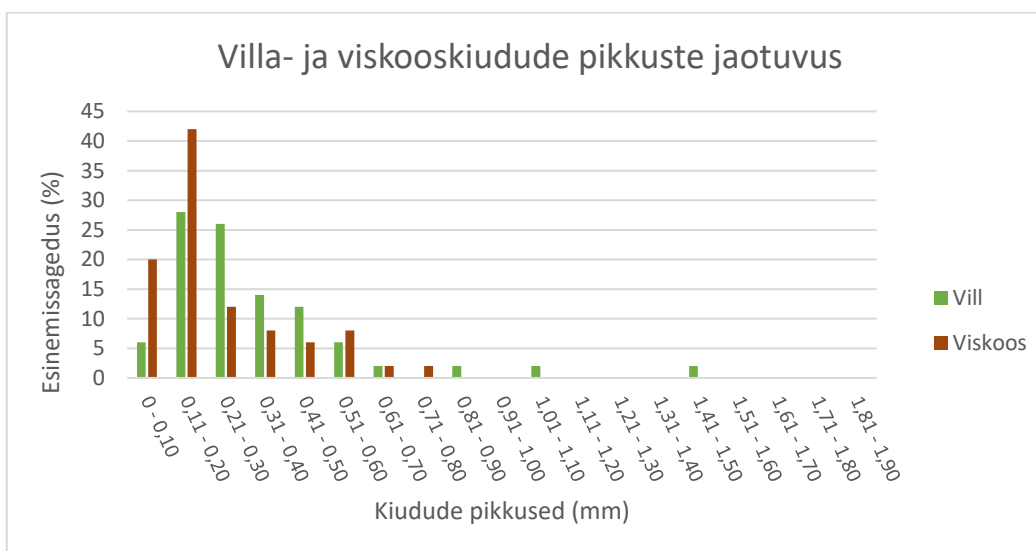
	Lina	Puuvill	Vill	Viskoos	Polüester	Akrüül
Keskmine	0,304	0,354	0,327	0,233	0,403	0,485
Standardhälve	0,223	0,198	0,252	0,177	0,259	0,318

Joonistel 7.20 – 7.22 on näha purustatud kiudude pikkuste jaotuvuse graafikuid. Selliste graafikute puhul saab hinnata väärtuste jaotuvust visuaalselt. Kõige parem on kitsal alal esinevad väärtused ehk vähem erinevaid pikkuseid. Lai jaotus näitab, et kiud on väga erinevate pikkustega. Komposiitmaterjalides kasutatavad kiud peaksid olema võimalikult suures osas samas pikkuse vahemikus. Komposiitmaterjali valmistamine on siis lihtsam ning omadused on ühtlasemate väärtustega. Kui materjalis kasutatavad kiud on väga erineva pikkusega, siis on ka komposiitmaterjal ebaühtlaste omadustega.

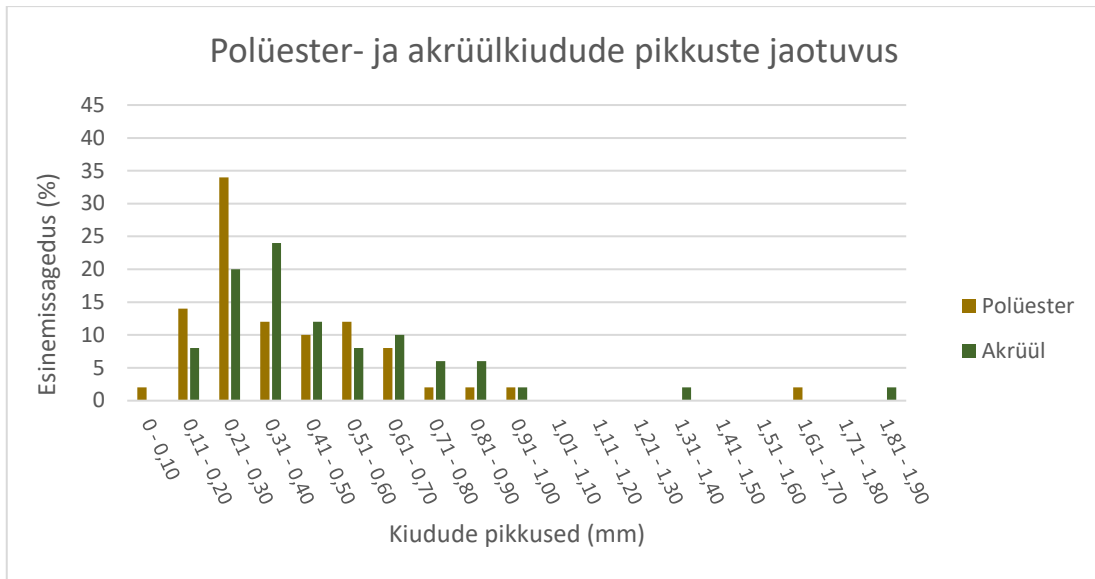
Lina ja puuvilla purustatud kiudude pikkuste jaotuvus (joonis 7.20) on üsna sarnane. Suurem osa kiududest asub samas pikkuse vahemikus. Linakiudude puhul saab täheldada, et umbes 40% kiududest on väga sarnase pikkusega. On näha, et väga väike osa kiududest on keskmisest pikkusest märgatavalt suuremad. Viskooskiud on samuti rohkem kui 40% ulatuses samas pikkuste vahemikus. Villakiudude pikkused asuvad valdavalt sarnases suurusjärgus (joonis 7.21). Polüester- ja akrüülkiudude puhul (joonis 7.22) on näha, et peale purustamist jäid segusse mõned kiud, mis on enamusest mitmekordselt pikemad.



Joonis 7.20. Lina- ja puuvillakiudude pikkuste jaotuvuse graafik



Joonis 7.21. Villa- ja viskooskiudude pikkuste jaotuvuse graafik



Joonis 7.22. Polüester- ja akrüülkiudude pikkuste jaotuvuse graafik

Komposiitmaterjalis peaksid kiud olema võimalikult ühesugused: pikkused ja diameetrid peaksid olema sarnaste väärtustega. See tagab materjali paremad omadused ning väldib anisotroopsust. Antud juhtudel on näha, et kõikidel kiuliikudel on väga erinevate mõõtmega kiudusid. Lisas 5 on näha kõik mõõdetud kiudude diameetrite ja pikkuste väärtused. Samuti on seal välja toodud suurimad ja väikseimad väärtused kiu liikide kaupa.

7.6 Komposiitmaterjalide absorptsioonikatse

Komposiitmaterjalide absorptsiooni hindamise katses kasutati eelnevalt valmistatud plaatidest välja lõigatud katsekehasid. Igast materjalist oli kolm katsekeha. Enne destilleeritud vette panemist pandi kirja iga katsekeha huvipakkuvad parameetrid (paksus, diameeter, mass). Kuna paksus oli osadel katsekehadel läbilõikes erinev, märgiti üles kõige suurem väärtus. Absorptsiooni hindamisel kasutatud katsekehad on näha joonisel 7.23 kuni 7.25.



Joonis 7.23. Komposiitmaterjalist katsekehad: vasakul akrüülkiududega plastkomposiitmaterjal, paremal linakiududega plastkomposiitmaterjal



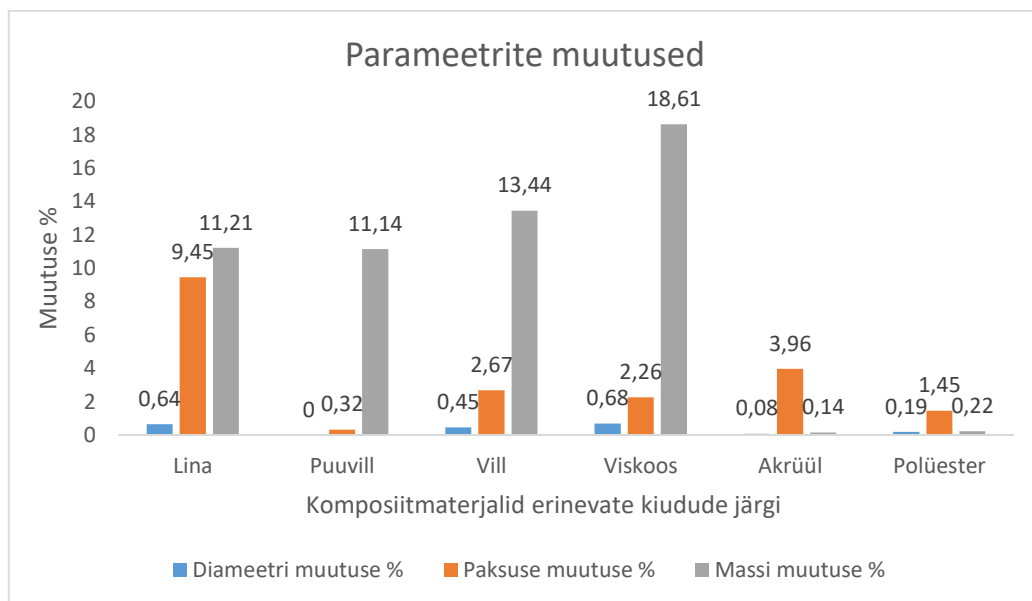
Joonis 7.24. Komposiitmaterjalist katsekehad: vasakul viskooskiududega plastkomposiitmaterjal, paremal polüesterkiududega plastkomposiitmaterjal



Joonis 7.25. Komposiitmaterjalist katsekehad: vasakul puuvillakiududega plastkomposiitmaterjal, paremal villakiududega plastkomposiitmaterjal

Nagu on joonistelt näha, siis tunduvalt paksemad on lina-, puuvilla-, villa- ja viskooskiuga katsekehad, mis olid probleemsed ka komposiitmaterjalist plaatide valmistamisel ning vormist eemaldamisel. Samuti on just nende katsekehade paksus läbilõikes erinev.

Joonisel 7.26 on näha absorptsioonikatse kokkuvõtavad tulemused. Diagrammil on välja toodud mõõdetud väärtuste muutused protsentides. Lisas 6 on näha absorptsioonikatse mõõtmistulemused. Esiteks pandi kirja katsekehade parameetrid enne vette panemist. Peal 24 tundi vees olemist mõõdeti uuesti samad väärtused ning arutati parameetrite muutused.



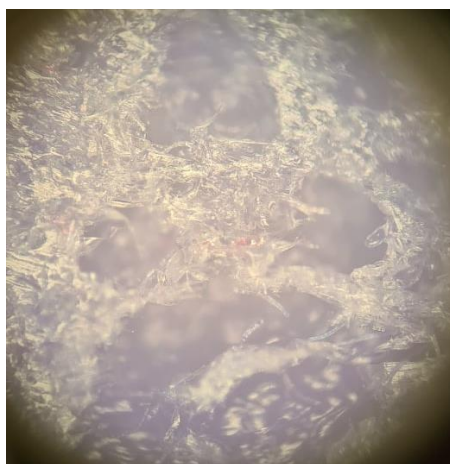
Joonis 7.26. Absorptsioonikatse kokkuvõtavad tulemused

Katsekehade diameetrite väärtused ei ole peale destilleeritud vees olemist väga palju muutunud. Diameetrite suurenemine on jäänud alla ühe protsendi. Kõige suurem katsekehade paksuse muutus toimus linakiuga komposiitmaterjali puhul. Siinkohal võib olla põhjuseks selle õhuline struktuur ning juba plaadi vormimisel tekkinud deformatsioonid. Linakiud ise on ka väga hügrokoopne. Üllataval kombel on puuvillaga katsekehade paksuse muutus nii väike ning akrüüluga katsekehade paksuse muutus suur. Paksuse muut võib olla seotud katsekehade tihedusega.

Diagrammilt on hästi näha, et vett on imanud endasse looduslike ja tehiskiududega valmistatud plastkomposiitmaterjalid ehk lina-, puuvilla-, villa- ja viskooskiududega katsekehad. Võrreldes sünteetiliste kiududega materjalidega on massi muutus tunduvalt suurem, keskmiselt 13% suurem. Kõige suurem massi muutus toimus viskoosiga katsekehadel: 18,61%. Samuti on märkimisväärse hulga vett endasse imanud lina (11,21%), puuvill (11,14%) ja vill (13,44%). Akrüül- ja polüesterkiududega materjalide massi muutus on üpris tühine, vastavalt 0,14% ja 0,22%.

7.7 Kiudude jaotumine komposiitmaterjalis

Kiudude jaotumist komposiitmaterjalides uuriti valgusmikroskoobi abil (vt joonis 7.27). Järgnev pilt on 230-kordse suurendusega ning antud juhul on näha viskooskiududega plastkomposiitmaterjali.

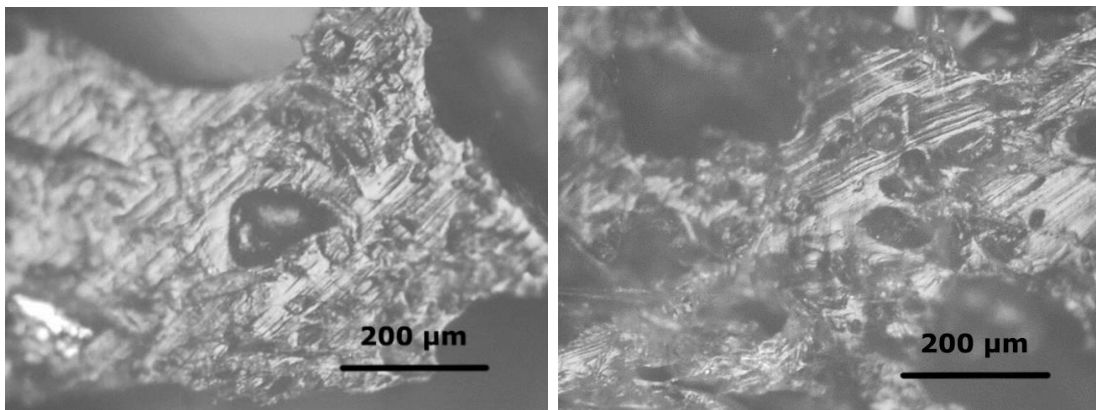


Joonis 7.27. Kiudude jaotumise uurimisel avanev mikroskoobipilt

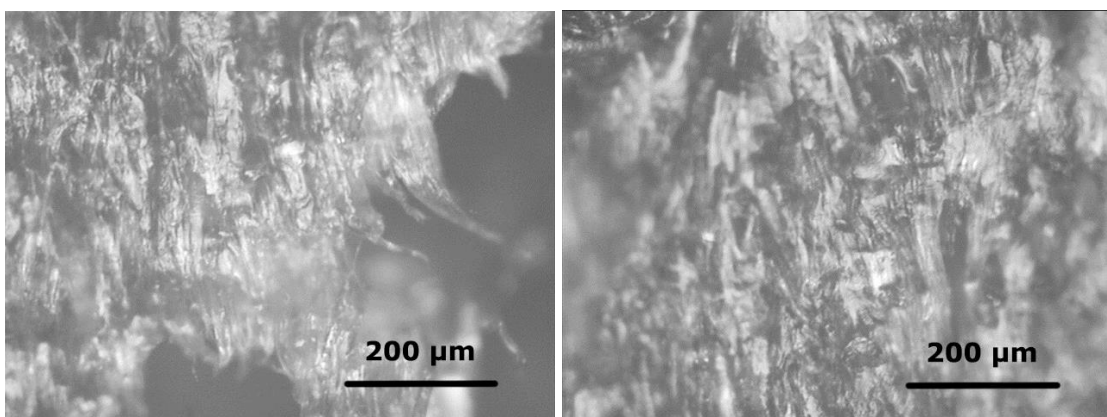
Valdavalt on iga plastkomposiitmaterjali mõlemas lõikes (valmistatud plaadi pealmise pinnaga võrreldes horisontaalses ja vertikaalses) võimalik eristada sarrust ja maatriksit. Osades komposiitmaterjalides on näha ka kiudude orientatsiooni. Ühesuunaline kiudude

orientatsioon annab materjalile suurema tugevuse, mistõttu on see eelistatud. Samuti on igas materjalis näha poore, mis võivad olla tekkinud algmaterjalide mõningasest niiskuse sisaldusest. Ehk enne kuuma pressi alla panemist sisaldas segu niiskust, soojuse mõjul vesi aurustus ning tekkisid poorid ja väiksed tühimikud. Suuremad tühimikud võivad olla defektid, mis on tekkinud materjali eemaldamisel vormist.

Joonistel 7.28 ja 7.29 on näha linakiuga komposiitmaterjali. Mikroskoobi abiga on hästi näha, et materjal on väga poorne ning sellel on palju suuri tühimikke. Materjalis olevad suured tühimikud ning õhuline struktuur olid juba silmaga vaadates hästi näha. Mõlemas lõikes on võimalik eristada kiude maatriksist. Horisontaalses lõikes on kiud näha väikeste ümarate kujunditena. Vertikaalses lõikes on näha, et linakiud on valdavalt ühes suunas orienteeritud. Paistab, et kiud on maatriksis jaotunud ühtlaselt, ei ole tekkinud kiudude kogumikke.

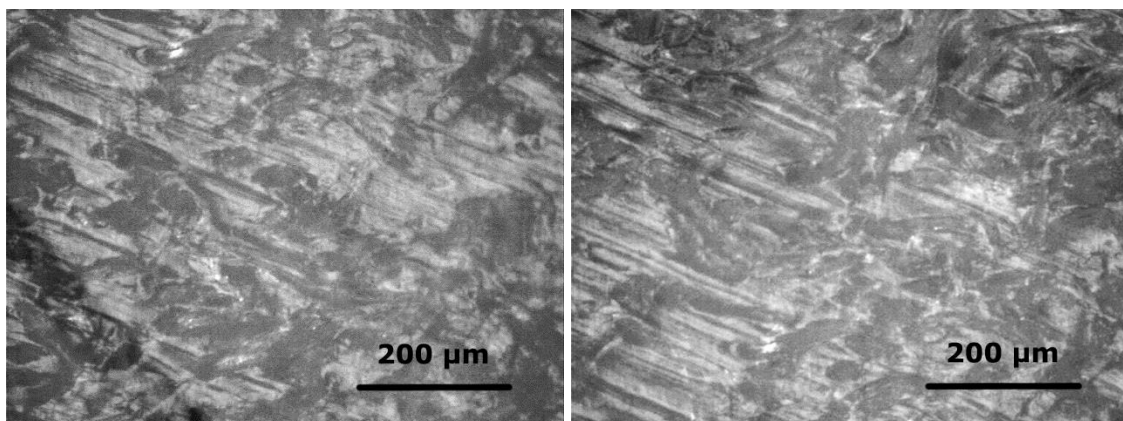


Joonis 7.28. Linakiuga komposiitmaterjalist katsekeha horisontaallõige

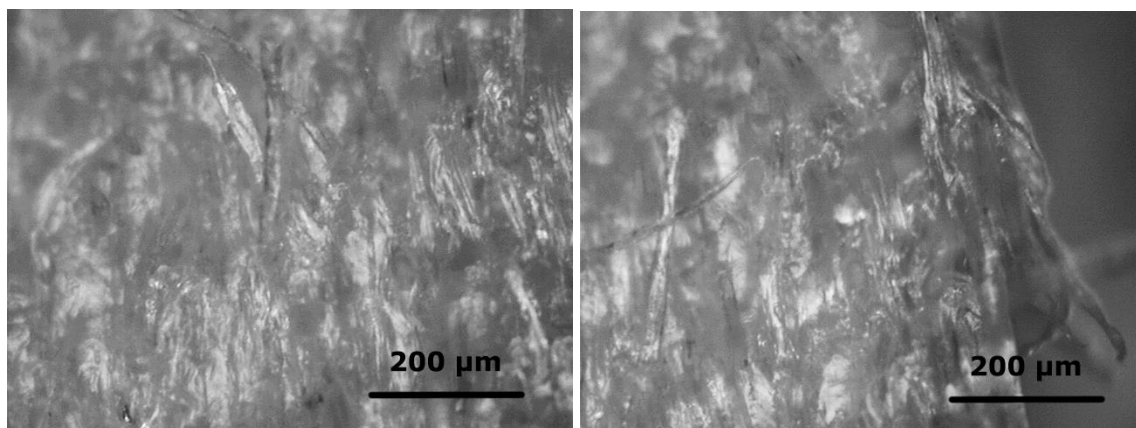


Joonis 7.29. Linakiuga komposiitmaterjalist katsekeha vertikaallõige

Puuvillakiududega valmistatud komposiitmaterjali lõikeid on näha joonistel 7.30 ja 7.31. Võrreldes linakiuga komposiitmaterjaliga pole see nii poorne ning ka tühimikke on vähem. Seega on puuvill endasse vähem niiskust imanud. Samas on silmaga vaadates suuremaid tühimikke vertikaalses lõikes hästi näha, struktuur on väga õhuline. Mikroskoobiga vaadeldes on võimalik eraldada kiude polümeerist mõlemas lõikes. Horisontaalses lõikes on kiud tumedamad kujundid. Vertikaalses lõikes on näha jällegi kiudude ühesuunalist orienteeritust, kuigi paistab, et mõned kiud on pressinud end maatriksist välja. Kiud on maatriksis ühtlaselt jaotunud.



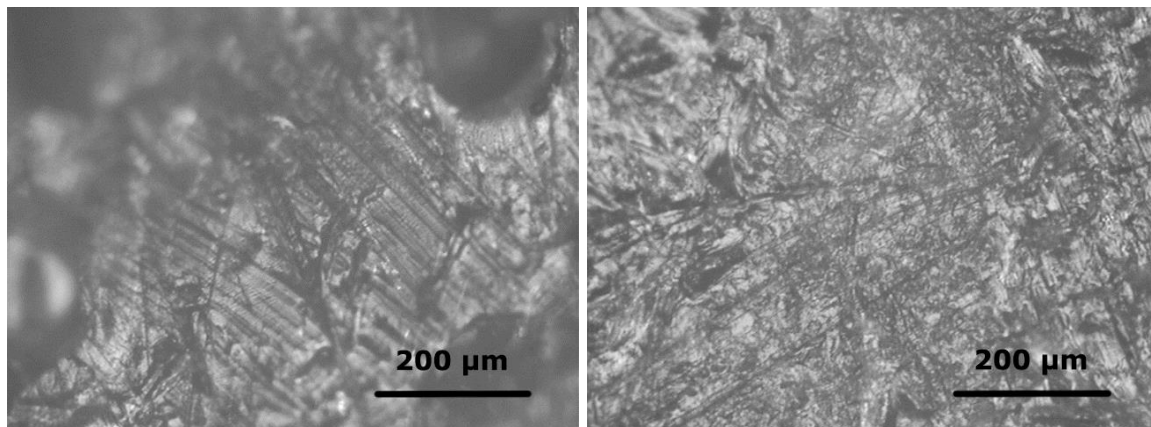
Joonis 7.30. Puuvillakiuga komposiitmaterjalist katsekeha horisontaallõige



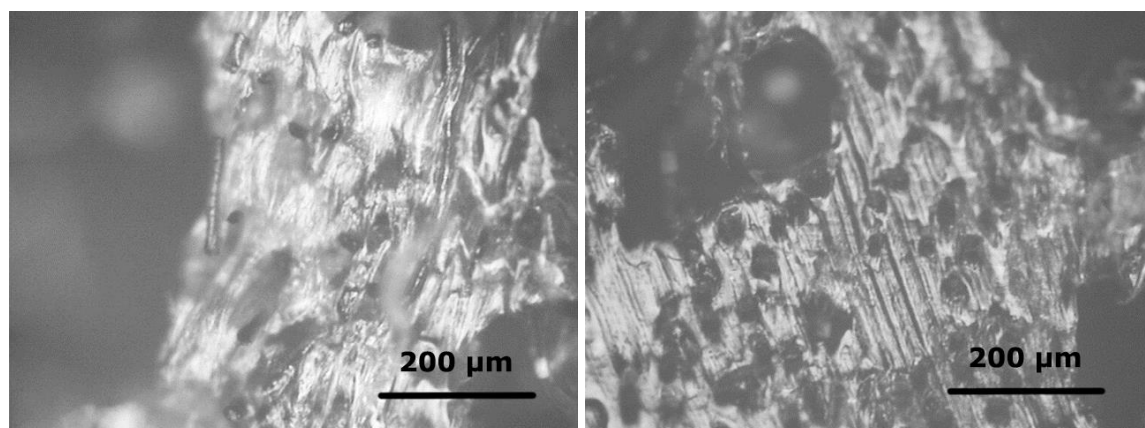
Joonis 7.31. Puuvillakiuga komposiitmaterjalist katsekeha vertikaallõige

Joonistel 7.32 ja 7.33 on näha villakiuga valmistatud komposiitmaterjalide lõikeid mikroskoobis. On näha, et materjal on üpris poorne ning esineb palju suuremaid tühimikke. Kuigi võrreldes lina- ning puuvillakiududega materjaliga on silmaga vaadates selle struktuur vähem õhulisem ning rohkem ühtlane. Horisontaalses lõikes on kiudude eraldamine maatriksist keeruline, samas vertikaalses lõikes on kiud hästi näha tumedate täpikestena. Selle materjali puhul ei saa hinnata kiudude orienteeritust maatriksis.

Samuti on raske hinnata adekvaatselt kiudude jaotuvust maatriksis, kuigi vertikaalses lõikes tundub olevat kiudude paiknemine ühtlasem.

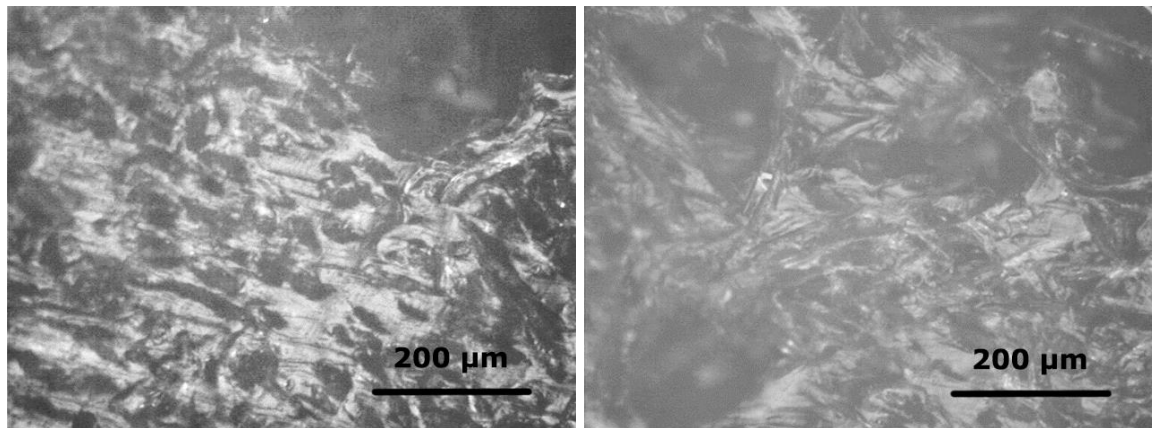


Joonis 7.32. Villakiuga komposiitmaterjalist katsekeha horisontaallõige

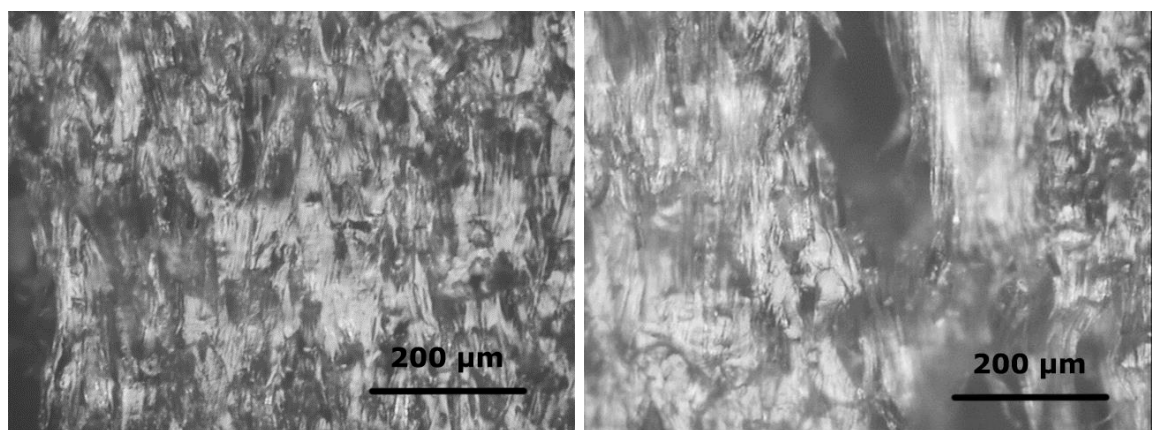


Joonis 7.33. Villakiuga komposiitmaterjalist katsekeha vertikaallõige

Viskooskiududega valmistatud komposiitmaterjali lõikeid on näha joonistel 7.34 ja 7.35. On näha, et materjal on palju poore ning ka suuremaid tühimikke, mis ei ole põhjustatud niiskuse poolt. Samuti paistab silmaga vaadates, et materjal on üpris õhuline ning kohev. Kiude on võimalik hästi eraldada polümeerist. Samuti paistab ka, et kiud on ühesuunaliselt orienteeritud. Kiudude jaotumine maatriksis on ühtlane, ei ole näha kiudude suuremaid kogumikke. Suurem tühimik, mis on näha joonisel 7.35 vasakpoolsel fotol, võib olla defekt, mille põhjustas materjali kleepumine vormi külge.

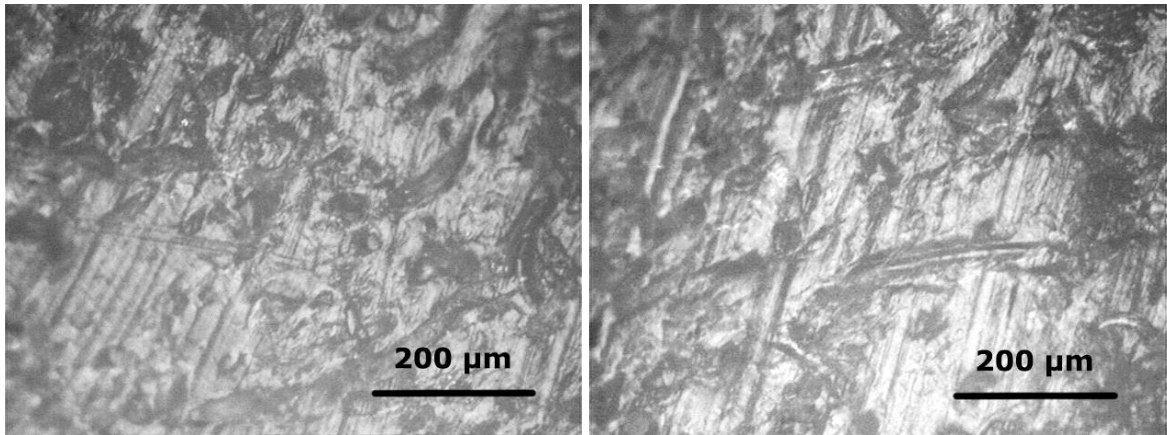


Joonis 7.34. Viskooskiuga komposiitmaterjalist katsekeha horisontaallõige

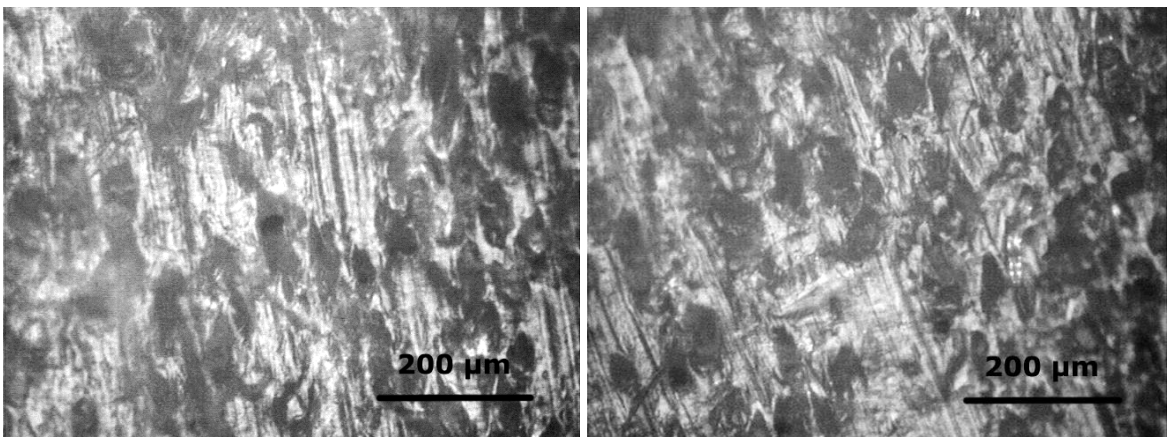


Joonis 7.35. Viskooskiuga komposiitmaterjalist katsekeha vertikaallõige

Joonistel 7.36 ja 7.37 on näha akrüülkiududega valmistatud komposiitmaterjale. On näha, et niiskuse tõttu tekkinud poore on vähem. Materjal ei ole õhuline ega kohev, vaid tihe ning ühtlane. Kiude on maatriksist näha nii palju et, saab öelda, et need on ühtlaselt jaotunud. Kuna kiude on näha vähem, sest need on kaetud maatriksiga, siis saab öelda, et akrüülkiud on väga hästi segunenud polümeeriga. Kiudude orientatsiooni hindamine siinkohal on raskendatud.

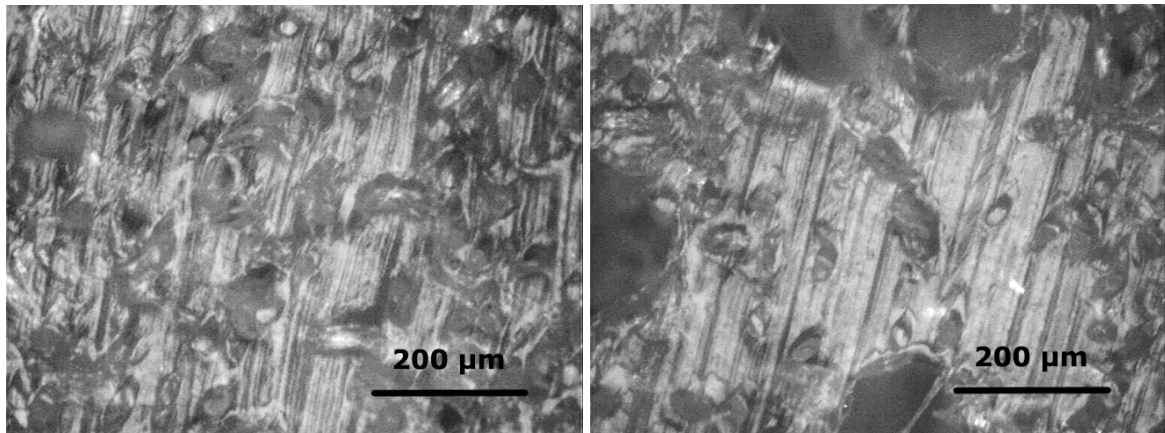


Joonis 7.36. Akrüülkiuga komposiitmaterjalist katsekeha horisontaallõige

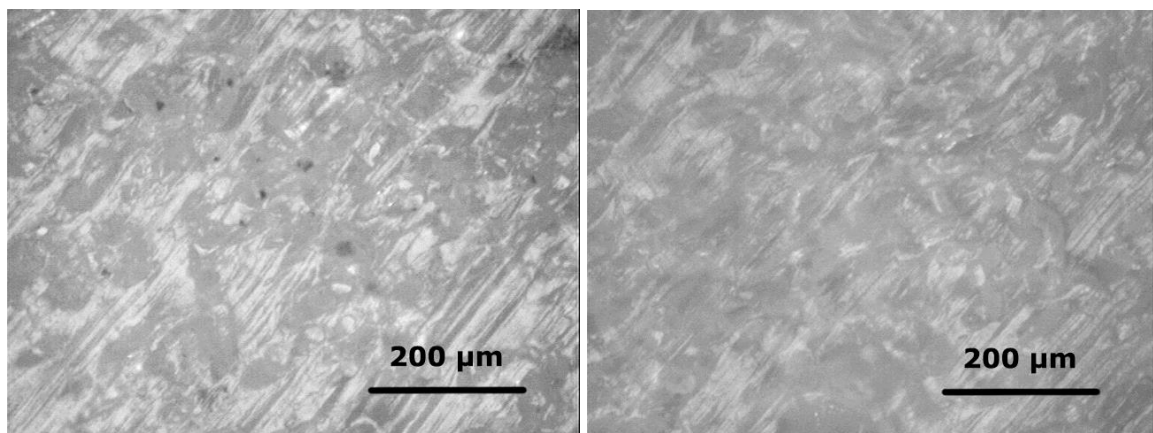


Joonis 7.37. Akrüülkiuga komposiitmaterjalist katsekeha vertikaallõige

Polüesterkiududega valmistatud komposiitmaterjali lõikeid on näha joonistel 7.38 ja 7.39. Lõikeid silmaga vaadeldes paistab, et materjal on tihe ning ühtlane, puudub õhulisus. Samas on mikroskoobipildis näha, et materjalis esineb siiski poore ning väiksemaid tühimikke. Kiude saab eraldada maatriksist piisavalt, et määrata nende jaotuvuse ühtlus. Samas pole võimalik hinnata kiudude orientatsiooni. Kuna kiud paistavad välja vähe, sest need on kaetud maatriksiga, siis saab öelda, et need on samuti väga hästi segunenud polümeeriga.



Joonis 7.38. Polüesterkiuga komposiitmaterjalist katsekeha horisontaallõige



Joonis 7.39. Polüesterkiuga komposiitmaterjalist katsekeha vertikaallõige

8. JÄRELDUSED

8.1 Tekstiilmaterjalide uurimine

Tekstiilmaterjalide uurimisel selgus, et linane kangas oli riide struktuuriga ning pindtiheduseks oli $(182 \pm 1,27)$ g/m². Puuvillase trikotaažmaterjali pindtihedus oli $(135 \pm 0,73)$ g/m². Villa- ja viskooskiududega valmistatud kangad olid riide struktuuriga ning pindtihedused olid vastavalt $(145 \pm 0,45)$ g/m² ja $(126 \pm 0,36)$ g/m². Akrüül- ja polüesterkiududega tekstiilmaterjalid olid trikotaaži struktuuriga ning nende pindtihedused olid vastavalt $(163 \pm 12,14)$ g/m² ja $(141 \pm 1,21)$ g/m². Kõik tekstiilmaterjalid purustati sama seadmega, olenemata struktuurist ja pindtihedusest. Töö edasises arenduses oleks mõistlik uurida ka erinevaid purustustehnoloogiaid ja seadmeid ning analüüsida struktuuri ja pindtiheduse mõju purustustatud kiudude kvaliteedile.

Kiudude tuvastamisel selgus, et looduslike ja tehiskiudude määramisel on valgusmikroskoop sobiv vahend. Sünteetiliste kiudude määramisel ei olnud aga valgusmikroskoobist abi. FTIR-analüüsi puhul tuleks kasutada spetsiaalset tekstiilkiududele mõeldud andmebaasi, kuna ka selle meetodiga oli raskusi akrüülkiu tuvastamisel. Kui oleks olnud tegu täiesti tundmatu materjaliga, siis ei olekski saanud määrata kanga koostist. Tekstiiltoodetes pea alati mitmeid lisaaineid (nt pigmendid), mis mõjutavad analüüsitulemust. Antud töös kasutatud FTIR-tarkvara polümeermaterjalide andmebaasis võrreldakse uuritavat objekti puhaste polümeeridega. Sellepärast võisidki tulla tulemused ebatäpsed. Antud juhul oli kõikide tekstiiltoodete sees sildid, millel oli koostis peal kirjas. Kuigi need ei pruugi alati tõtt näidata, andsid need aimduse, millise materjaliga võib tegemist olla.

8.2 Komposiitmaterjalide valmistamine

Komposiitmaterjalide valmistamisel selgus, et kasutatavad vormid pole sobilikud taoliste materjalide valmistamiseks. Kuna materjal kleepus vormi külge, siis oleks mõistlik kasutada vähem nakkuva pinnaga vorme või kasutada komposiitmaterjalisegus erinevaid lisaaineid, mis vähendavad kleepumist. Eriti tugevalt jäid vormi külge loodusliku kiuga ja tehiskiuga materjalid, mistõttu oleks nende puhul eriti oluline uurida edasi võimalike lisaainete kasutamist, et vähendada komposiitmaterjali kleepumisest põhjustatud deformatsioone. Samuti oli näha, et sulanud komposiitmaterjali mass oli

pressinud vormist välja ning jätnud tühimikke valminud komposiitplaati. Siit võib järeldada, et ka kasutatud vormi ehitus ei olnud sobiv antud materjalide valmistamiseks. Mõju võis avaldada ka see, et vormi doseeritava materjali hulk ei olnud täpselt mõõdetud.

Samuti saab valmistamise protsessist järeldada, et sünteetiliste kiududega komposiitmaterjale on kergem valmistada kui looduslike või tehiskiududega materjale. Sünteetilised kiud alluvad paremini töötlemisega, segunevad paremini maatriksiga ning deformeeruvad vähem protsessi käigus.

Komposiitmaterjalide valmistamisel võib võtmesõnaks olla ka kasutatavate kiudude eeltöötlus. Kuna tarbijajärgsed tekstiiltooted võivad sisaldada palju pigmente, mustust ning muid lisaaineid, siis oleks mõistlik neid enne puhastada ning eeltöödelda, et hõlbustada komposiitmaterjalide valmistamist ning tagada paremad omadused lõpptootetele.

8.3 Komposiitmaterjalide uurimine

Purustatud kiudude uurimisel selgus, et kiudude diameetrid olid küllaltki erinevad. Siiski tuleb mainida, et tekstiilmaterjalide purustamine mõjutab kiudude pikkuseid mitte läbimõõtu. Läbimõõdu suuruse määravad looduslikel kiududel kasvatamise viis ning tehiskiudude ja sünteetiliste kiudude puhul valmistamise viis. Pikkuste määramisel selgus, et valdavalt olid kõikide tekstiilmaterjalide purustatud kiudude pikkused lähedaste väärtustega, vaid mõned üksikud kiud olid keskmisest märgatavalt pikemad või lühemad. Siit saab järeldada, et purustusseadme valik oli sobiv. Kiudude pikkuste ühtlus on väga oluline, et vältida komposiitmaterjali anisotroopsust. Kui materjalis kasutatavad kiud on väga erineva pikkusega, siis on ka komposiitmaterjal ebaühtlaste omadustega.

Komposiitmaterjalide absorptsioonikatsest selgus, et kõige rohkem imavad endasse vett looduslike ja tehiskiududega valmistatud materjalid. Selle tulemuse põhjal saab määrata erinevatele komposiitmaterjalidele sobivaid kasutusvaldkondasid. Näiteks ei saa absorbeerivaid komposiitmaterjale kasutada välistes tingimustes, kuna seal ei ole sageli kontrolli ümbritseva keskkonna üle, mis võib olla niiske või lausa märg. Samas on võimalus kasutada ka komposiitmaterjalidel erinevaid katteid ning pinnaviimistlusi, mis väldiksid niiskuse imendumist.

Komposiitmaterjalide lähemal uurimisel oli näha, et kõikides materjalides olid kiud ühtlaselt maatriksis jaotunud. Siit saab järeldada, et kiudude ja polümeeri segamise tehnoloogia oli sobilik. Kiudude orientatsiooni sai hinnata osadel materjalidel. Kuigi mitmel komposiitmaterjali proovil oli näha kiudude ühesuunalist orienteeritust, ei saa seda omistada tervele komposiitmaterjaliplaadile. Selleks tuleks uurida rohkem proove, mis on võetud erinevatest katsekeha kohtadest. Samuti võiks tulevikus lähemalt uurida, mis mõjutab tekstiilkiudude orientatsiooni polümeermaatriksis. Seda just seetõttu, et orienteeritus võib tagada paremad mehaanilised omadused tootele.

Komposiitmaterjalide vaatlemisel mikroskoobiga selgus ka, et kõik materjalid sisaldavad endas poore ja mullikesi. Need on tekkinud ilmselt lähtematerjalide niiskuse sisaldusest. Seetõttu on oluline, et lisaks kiudude eeltöötlemisele need ka kuivatatakse. Eriti oluline on, et heterogeenne segu, mis läheb pressi alla, oleks kuiv. Sellepärast, et mullikesed ja poorid tekivad just selles komposiitmaterjali valmistamise faasis. Vee eraldumine materjalist hakkab toimuma kuuma pressi all, mistõttu tekivad materjali tühimikud.

8.4 Ümbertöödeldud tekstiilkiududega komposiitmaterjalide kasutusvaldkonnad

Looduslike, sünteetiliste ja tehiskiududega valmistatud komposiitmaterjalidel on erinevad omadused. Selle pärast on sobivate rakenduste leidmisel oluline teada, milliseid kiudusid komposiitmaterjalis kasutatakse. Näiteks peaks looduslike ja tehiskiududega komposiitmaterjalide kasutamise välitingimustes välistama. Samas sünteetiliste kiududega komposiitmaterjalid võivad välitingimustes edukalt toimida.

Tekstiilkiududega komposiitmaterjalid võivad asendada mitmeid monomaterjale. Näiteks on võimalik neid kasutada puhta plasti ja puidu asendajana. Tekstiilkiud võivad olla põhimaterjali mahu vähendajad ning samas ka materjali omaduste parandajad. Selliseid materjale võib kasutada näiteks mööbli teatud osades, terrasilaudadena ja aialippidena. Samuti ka vooderdus- ja isolatsioonmaterjalidena. Antud töö edasiarendusena võiks uurida ka taaskasutatud tekstiilkiududega plastkomposiitmaterjalide mehaanilisi omadusi. See annaks võimaluse pakkuda sellistele materjalidele veelgi spetsiifilisemaid kasutusvaldkondi.

KOKKUVÕTE

Tekstiiljäätmete massiline teke ning sellest tingitud keskkonnamoormus on väga aktuaalne probleem. Eriti murelikuks teeb asjaolu, et nende sorteerimine ja ümbertöötlemine on üsna keerukas protsess. Tekstiilmaterjalid ja -tooted on sageli heterogeense koostisega ning paljud esemed, näiteks rõivad, sisaldavad ka mittetekstiilseid osi (lukud, nõöbid). Selline mitmekesisus raskendab sorteerimist ja ringlusesse suunamist. Suuremahulist ümbertöötlust võib takistada ka tekstiilmaterjalide puudulik kogumissüsteem: märkimisväärne osa tekstiiltoodetest jõuab koos segaolmejäätmatega põletusse või prügilasse.

Kuigi tekstiilmaterjalide ümbertöötlemine on kulukas ettevõtmine, on päris mitmeid lahendusi juba olemas. Taaskasutatud tekstiilkiududest saab valmistada uusi tekstiiltooteid. Tekstiilmaterjale kasutatakse ka komposiitmaterjalide valmistamiseks. Tekstiilkiud võivad parandada materjalide mehaanilisi omadusi või olla lihtsalt põhimaterjali mahu vähendajad. Ümbertöödeldud tekstiilkiudusid võib kasutada näiteks heli- ja soojusisolatsioonmaterjalides, samuti täite- ja polsterdusmaterjalidena.

Selleks, et uurida kuidas ümbertöödeldud tekstiilkiud mõjutavad plastkomposiitmaterjalide omadusi ning pakkuda taoliste materjalidele võimalikke kasutusvaldkondi, valmistati töö käigus ise kuus erinevat komposiitmaterjali. Valmistati lina-, puuvilla-, villa-, viskoos-, akrüül- ja polüesterkiududega komposiitmaterjalid, kus maatriksiks oli madaltihe polüetüleen (LDPE). Tekstiilmaterjalid, mida kasutati komposiitmaterjalide valmistamiseks, saadi Uuskasutuskeskusest. Enne komposiitmaterjalide valmistamist analüüsiti tekstiilmaterjale: määrati nende struktuur, kiuline koostis ning pindtihedus.

Komposiitmaterjalide valmistamiseks purustati kõigepealt tekstiilmaterjalid sobiva fraktsiooniga osakesteks. Seejärel segati kokku purustatud kiud ja LDPE ning pressiti segust komposiitmaterjaliplaadid. Valmistatud plaadid tulid vormist välja väga raskelt, samuti olid osad katsekehad defektsed. Eriti keeruline oli looduslike ja tehiskiududega komposiitmaterjalide valmistamine. Siit võib järeldada seda, et kasutatud vormid pole antud materjalide jaoks sobilikud. Erinevad lisaained komposiitmaterjalisegus võivad hõlbustada nende valmistamist. Kaaluma peaks ka kasutatavate kiudude eeltöötlust, eriti kui tegu on tarbijajärgsete tekstiiltoodetega.

Analüüsiti valmistatud komposiitmaterjalide omadusi. Komposiitmaterjalides kasutatud purustatud kiudude mõõtmete uurimisel selgus, et kiudude pikkused on suuremas osas

samas suurusjärgus, kuigi esines vähesel määral ka keskmisest oluliselt erinevaid pikkuste väärtuseid. Komposiitmaterjalis peaksid kiud olema võimalikult ühesugused: pikkused ja diameetrid peaksid olema sarnaste väärtustega. See tagab materjali paremad omadused ning väldib anisotroopsust. Absorptsioonikatse käigus selgus, et looduslike ja tehiskiududega komposiitmaterjalid imavad endasse üpris palju vedelikku, mistõttu sobiksid sellised materjalid paremini sisetingimustes kasutamiseks. Vaadeldi ka kiudude jaotumist komposiitmaterjalis. Oli näha, et kõikides materjalides olid kiud üpris ühtlaselt maatriksis jaotunud. Samuti märgati, et kõik proovid sisaldasid poore ja mullikesi, mis võivad olla tekkinud lähtematerjalide niiskuse sisaldusest. Siinkohal saab järeldada, et oluline on lähtematerjalide kuivatamine.

Lähtudes kirjanduse uuringust ning analüüside ja katsete tulemustest, saab pakkuda ümbertöödeldud tekstiilkiududega plastkomposiitidele erinevaid kasutusvaldkondasid. Näiteks sobivad sünteetiliste kiududega komposiitmaterjalid paremini välitingimustes kasutamiseks kui looduslike kiududega komposiitmaterjalid. Samas looduslike kiudude kasutamine isolatsioonmaterjalides võib anda jällegi häid tulemusi. Samuti võib tekstiilkiude kasutada põhimaterjali mahu vähendajana.

Algselt seatud bakalaureusetöö põhieesmärgid täideti. Katselise osa käigus tuli välja päris mitu probleemi, mille lahendamine ei mahtunud antud töö raamesse. Näiteks oli probleem sünteetiliste kiudude tuvastamisega. Samuti oleks hea olnud uurida lähemalt erinevaid lisaaineid ning eeltöötlusmeetodeid, mis võiksid lihtsustada ümbertöödeldud tekstiilkiududega plastkomposiitmaterjalide valmistamist.

Tekstiilijäätmetega seotud probleemid on hetkel väga aktuaalsed, kahjuks lahendused on veel väga algelised või pole neid võimalik suures mahus rakendada. Seetõttu on oluline lisaks jäätmetekke vähendamise ja korduskasutuse propageerimisele tegeleda edasi tekstiilmaterjalide ümbertöötamise ja taaskasutuse lahenduste arendamisega. Käesolev bakalaureusetöö pakub välja võimaluse tekstiilkiudude taaskasutamiseks ning annab ülevaate looduslike, sünteetiliste ja tehiskiududega plastkomposiitmaterjalide erinevustest ning pakub taoliste materjalidele sobivaid kasutusvaldkondi.

SUMMARY

The large amount of textile waste and the resulting environmental burden is a very topical issue. What is worrying is the fact that sorting and recycling is a rather complex process. Textile materials and products often have a heterogeneous composition and many items, such as clothing, contain also non-textile parts (for example zippers and buttons). This diversity makes textile waste difficult to sort and recycle. Large-scale recycling can also be hampered by an inadequate textile collecting system: a significant amount of textiles end up in incineration or landfill with mixed municipal waste.

Although the recycling of textiles is a costly undertaking, many solutions already exist. Recycled textile fibres can be used to make new textile products. Textiles are also used to make composite materials. Textile fibres can improve the mechanical properties of materials or simply reduce the volume of the virgin material. Recycled textile fibres could be used, for example, in sound and heat insulation materials and also as a filling and padding materials.

In order to study how recycled textile fibres affect the properties of plastic composite materials and to offer possible applications for such materials, six different composite materials were made during the work. Linen, cotton, wool, viscose, acrylic and polyester fibres were used as reinforcement of the composite material, the matrix was low density polyethylene (LDPE). The textile materials that were used to make the composites were obtained from Uuskasutuskeskus. Before composite materials were made, the textile materials were analysed: their structure, fibre composition and surface density were determined.

To make composite materials, textile materials were first milled into suitable fibre length. Then milled fibres and LDPE were compounded and pressed into composite material plate. The plates came out of the molds very hard and some test specimens were defective. The production of composite materials with natural and man-made fibres was particularly difficult. In conclusion it can be said that used molds are not suitable for making these materials. Also, various additives in the composite material mixture may facilitate their preparation. Pre-treatment of the fibres should also be considered, especially when using post-consumer textile waste.

The properties of the prepared composite materials were analysed. Analysis of the milled fibres dimensions revealed that the lengths of the fibres are largely of the same order of magnitude. Although there were some values of the lengths that were significantly

different from the average. Fibres of the same dimensions ensure more uniform material properties. During the absorption test, it was found that composite materials with natural and man-made fibres absorb quite a lot of liquid, which makes such materials more suitable for indoor use. The distribution of fibres in the composite material was also observed. In all materials the fibres were evenly distributed in the matrix. It was also noted that all samples contained pores and bubbles that may have formed because primary goods contained moisture. Conclusion is that drying the materials is important.

Based on the literature review and the results of analyses and tests, various applications can be offered for plastic composites with recycled textile fibres. For example, composite materials with synthetic fibres are better suited for outdoor use than composite materials with natural fibres. However, the use of natural fibres in insulation materials can give good results. Textile fibres can also be used as volume reducers for the virgin material.

The main goals of the initially set bachelor's thesis were fulfilled. During the experimental part, quite a number of problems emerged. The solution of these did not fit into this work. For example, there were problems in identifying synthetic fibres. It would also have been useful to study various additives and pre-treatment methods that could facilitate the production of composites with recycled textile fibres.

The problems related to textile waste are very topical at the moment, unfortunately the solutions are still very rudimentary or cannot be implemented in a large scale. It is important not only promote waste reduction and re-use, but also develop more textile recycling and recovery solutions. This work offers an opportunity for the recovery of textile fibres and provides an overview of the differences between plastic composite materials with natural, man-made and synthetic fibres. This work also offers suitable applications for such materials.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Jäätmeseadus – *Riigi Teataja* I, § 14¹, 2021
2. Eesti Keele Instituudi Sõnaveeb. [WWW]
<https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/taaskasutus/1> (15.05.2021)
3. Eesti Keele Instituudi Sõnaveeb. [WWW]
<https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/ringlussev%C3%B5tt/1> (15.05.2021)
4. Eesti Keele Instituudi Sõnaveeb. [WWW]
<https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/tekstiilmaterjal/1> (15.05.2021)
5. EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU MÄÄRUS (EL) nr 1007/2011 – Euroopa Liidu Teataja, 2011
6. Eesti Keele Instituudi Sõnaveeb. [WWW]
<https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/j%C3%A4%C3%A4tmed/1> (15.05.2021)
7. Eesti Keele Instituudi Sõnaveeb. [WWW]
<https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/komposiitmaterjal/1> (18.05.2021)
8. Eesti Keele Instituudi Sõnaveeb. [WWW]
<https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/maatriks/1> (18.05.2021)
9. Eesti Keele Instituudi Sõnaveeb. [WWW]
<https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/armatuur/1> (18.05.2021)
10. Patti, A., Cicala, G., Acierno, D. Eco-Sustainability of the Textile Production: Waste Recovery and Current Recycling in the Composites World. – *MDPI Open Access Journals*. 2020. [Online] <https://doi.org/10.3390/polym13010134> (15.03.2021)
11. Stone, C., Windsor, F.M., Munday, M., Durance, I. Natural or synthetic—How global trends in textile usage threaten freshwater environments. – *Science of The Total Environment*. 2020, 718. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134689> (15.03.2021)
12. Tiia Plamus, Tallinna Tehnikaülikooli vanemlektori konspekt kursusel Tekstiili- ja rõivamaterjalid.
13. Hawley, J. M. Handbook of Recycling : State-Of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists. Chapter 15: Textile Recycling. 2014
14. Ellen MacArthur Foundation report (2017). A new textiles economy: Redesigning fashion's future, Ellen MacArthur Foundation. [WWW]
https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/A-New-Textiles-Economy_Full-Report.pdf (20.03.2021)
15. Keskkonnaministeeriumi veebilehekülg. [WWW]
<https://www.envir.ee/et/tekstiilringlusse> (10.03.2021)
16. EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV (EL) 2018/851, millega muudetakse direktiivi 2008/98/EÜ, mis käsitleb jäätmeid – Euroopa Liidu Teataja, 2018

17. Keskkonnaministeeriumi veebilehekülg. [WWW] <https://www.envir.ee/et/mida-teha-tekstiilijaatmetega-tana> (20.04.2021)
18. Martin, K., Moora, H., Hvass, K.K., Watson, D. (2020). Eesti tarbimisjärgsed rõiva- ja tekstiilivood. Projekti "Põhjamaade-Baltikumi ringse tekstiilisüsteemi suunas" Eesti analüüsi kokkuvõte. [Online] (10.03.2020)
19. Houck, M. M. Identification of textile fibres. Woodhead publishing: Cambridge, 2009.
20. Skaneeriv elektronmikroskoop. [WWW] https://et.wikipedia.org/wiki/Skaneeriv_elektronmikroskoop (04.04.2021)
21. Griffiths, P. R., de Haseth, J. A. Fourier Transform Infrared Spectrometry. Second edition. Kanada: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
22. Peets, P. Tekstiilikiudude analüüs ja klassifitseerimine ATR-FT-IR spektroskoopia meetodil: bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Tartu, 2014.
23. Fourier-transform infrared spectroscopy. [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier-transform_infrared_spectroscopy (04.04.2021)
24. Palm, D., Elander, M., Watson, D., Kiørboe, N., Salmenperä, H., Dahlbo, H., Moliis, K., Lyng, K., Valente, C., Gíslason, S., Tekie, H., Rydberg, T. Towards a Nordic textile strategy: Collection, sorting, reuse and recycling of textiles. [Online] (15.03.2020)
25. SIPTex. [WWW] <https://boergroup-recyclingsolutions.com/projects/siptex-swedish-innovation-platform-for-textile-sorting/> (14.04.2021)
26. Near-infrared spectroscopy. [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Near-infrared_spectroscopy (20.03.2021)
27. Efficient textile recycling with NIR Spectroscopy. [WWW] <https://www.spectralengines.com/blog/efficient-textile-recycling-with-nir-spectroscopy> (20.03.2021)
28. Denuwara, N., Maijala, J., Hakovirta, M. Sustainability Benefits of RFID Technology in the Apparel Industry. – *Sustainability*. 2019, 11(22), 6477, [Online] <https://doi.org/10.3390/su11226477> (25.03.2021)
29. Raadiosagedustuvastus. [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/Raadiosagedustuvastus> (25.03.2021)
30. Muthu, S. S. Textiles and Clothing Sustainability : Recycled and Upcycled Textiles and Fashion. Springer Singapore Pte. Limited, 2016.
31. Rester. [WWW] <https://www.impactreport.app/rester/index.html?view=Ourprocess> (05.05.2021)
32. Letcher T. M., Vallero D. A. Waste: A Handbook for Management. Chapter 12: Textile waste. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2011.
33. Dresses made to last. [WWW] <https://www.hm.com/by/1042a-dresses-made-to-last/> (05.05.2021)


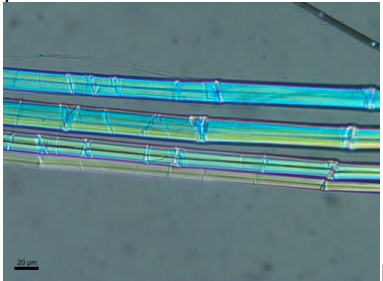
34. Umar, M., Shaker, K., Ahmad, S., Nawab, Y., Umair, M., Maqsood, M. Investigating the mechanical behavior of composites made from textile industry waste. 2016. [Online] <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1193982> (05.04.2021)
35. Mohammadhosseini, H., Tahir, M. M., Sam, A. R. M., Lim, N. H. A. S., Samadi, M. Enhanced performance for aggressive environments of green concrete composites reinforced with waste carpet fibers and palm oil fuel ash. – *Journal of Cleaner Production*. 2018, 185, 252-265. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.051> (05.04.2021)
36. De Macedo, J. R. N., dos Santos, D. J., dos Santos Rosa, D. Poly(lactic acid)–thermoplastic starch–cotton composites: Starch-compatibilizing effects and composite biodegradability. – *Journal of Applied Polymer Science*. 2019, 136. [Online] <https://doi.org/10.1002/app.47490> (27.04.2021)
37. Kumar, N., Avinash, P., Singh, A., Debnath, K. Effect of Fiber Orientation on the Tensile and Wear Properties of Flax Fiber-Reinforced Composites. 2020. *Advances in Mechanical Engineering*, 505-513. [Online] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0124-1_46 (27.04.2021)
38. Tiuca A.-E., Vermeşana H., Gabora T., Vasileb O. Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste - *Energy Procedia*. 2015, 85(1) 559-565. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.245> (25.04.2021)
39. Echeverria, C. A., Pahlevani, F., Handoko, W., Jiang, C., Doolan, C., Sahajwalla, V. Engineered hybrid fibre reinforced composites for sound absorption building applications. – *Resources, Conservation and Recycling*. 2019, 143, 1-14. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.014> (25.04.2021)
40. Islam S., Bhat G. Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles - *Journal of Environmental Management*. 2019, 251(12). [Online] <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109536> (25.04.2021)
41. UltraTouch™ Denim Insulation. [WWW] <https://www.bondedlogic.com/ultratouch-denim-insulation/> (05.05.2021)
42. Blue Jeans Go Green™. [WWW] <https://www.cottonworks.com/topics/sustainability/cotton-sustainability/blue-jeans-go-green/> (05.05.2021)
43. Dissanayake, D.G.K., Weerasinghe, D.U., Thebuwanage, L.M., Bandara, U.A.A.N. An environmentally friendly sound insulation material from post-industrial textile waste and natural rubber. – *Journal of Building Engineering*. 2021, 33. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101606> (29.04.2021)
44. Bakkal, M., Bodur, M. S., Sonmez, H. E., Ekim, B. C. The effect of chemical treatment methods on the outdoor performance of waste textile fiber-reinforced polymer composites. – *Journal of Composite Materials*. 2016, 51, 2009-2021. [Online] <https://doi.org/10.1177/0021998316666335> (29.04.2021)
45. Markova, I. *Textile Fiber Microscopy*. Wiley 2019.
46. Sinclair, R. *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*. Cambridge: Elsevier Science & Technology 2014.

47. Kadolph, S. J., Marcketti, S. B. Textiles, 12th Edition. 2017.
48. Kulu, P., Kübarsepp, J., Laansoo, A., Veinthal, R. Materjalitehnika I: Tehnomaterjalid. Õpik kõrgkoolidele. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2015.
49. Arensburger, D. Komposiitmaterjalid. TTÜ kirjastus, 2005.
50. Alomayri, T., Assaedi, H., Shaikh F.U.A., Low, I.M. Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites. – *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2014, 2, 223-230. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.05.005> (02.05.2021)
51. Tekstiil. Kangasmaterjalid. Pindtiheduse määramine väikeproovidest. Eesti standard EVS-EN 12127:2000. Eesti standardikeskus, 2000.
52. Plamus, T. Lõuendimaterjalide valideerimine: magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, 2010.
53. Kozlowski, R. M. Handbook of natural fibres. Volume 1: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation. Woodhead Publishing 2012.
54. Ipernity fotoklubi. [WWW] <http://www.ipernity.com/doc/294377/album/550005> (29.05.2021)
55. Boncamper, I. Tekstiilkiud. Tallinn: Eesti Rõiva- ja Tekstiililiit, 2000.

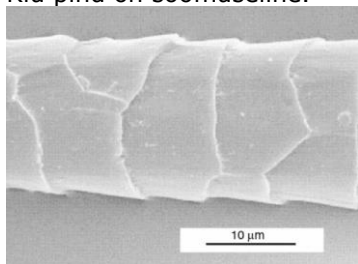
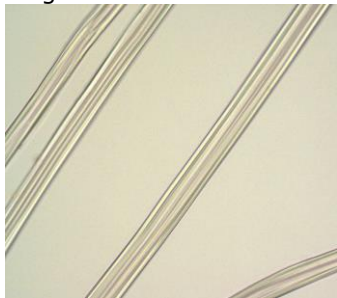
LISAD

LISA 1 Tekstiilkiudude omadused

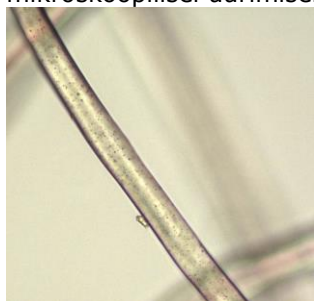
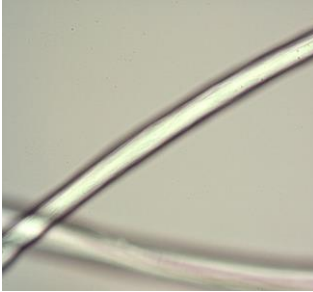
Tabel 1.1. Puuvilla- ja linakiudude omadused [52, 53]

Omadus	Puuvill	Lina
Kiu pikkus	12-64 mm	9-70 mm
Kiu jämedus	12-22 μm	5-38 μm
Tihedus	1,55 g/cm ³	1,43-1,52 g/cm ³
Kiu ristlõige	Neerukujuline (oakujuline)	Hulknurkne
Koostis	Puuvill sisaldab 86-96% tselluloosi. Lisaks sisaldab puuvill veel pektiine (0,7-1,2%), proteiine (1,1-1,9%), vahasid (0,4-1,0%) ning mineraale (0,7-1,6%).	Lina sisaldab umbes 75% tselluloosi, 15% hemitselluloosi, 2,5% pektiine ning 2% ligniine.
Veeimavus	Imab hästi niiskust.	Lina on puuvillast poorsem, seetõttu imab niiskust paremini kui puuvill.
Eristamine	Puuvillakiu saab muudest looduslikest tsellulooskiududest eristada selle keerumuse tõttu.  [52]	Kiududel on sile pealispind, teatud vahemaade tagant asetsevad kiu pinnal ristisuunalised sõlmekesed.  [52]
Muu	Katkevenivus on 3-7% ehk tegu on jäiga kiuga. Puuvill kuumusele küllaltki vastupidav kiud. Puuvill kuivab aeglaselt.	Lina on eriti tugev kiud ja nagu muude tsellulooskiududegi puhul suureneb selle tugevus märjalt. Kiu katkevenivus on väike, 0,5-4,0%. Lina on mitteelastne ja väga jäik kiud.

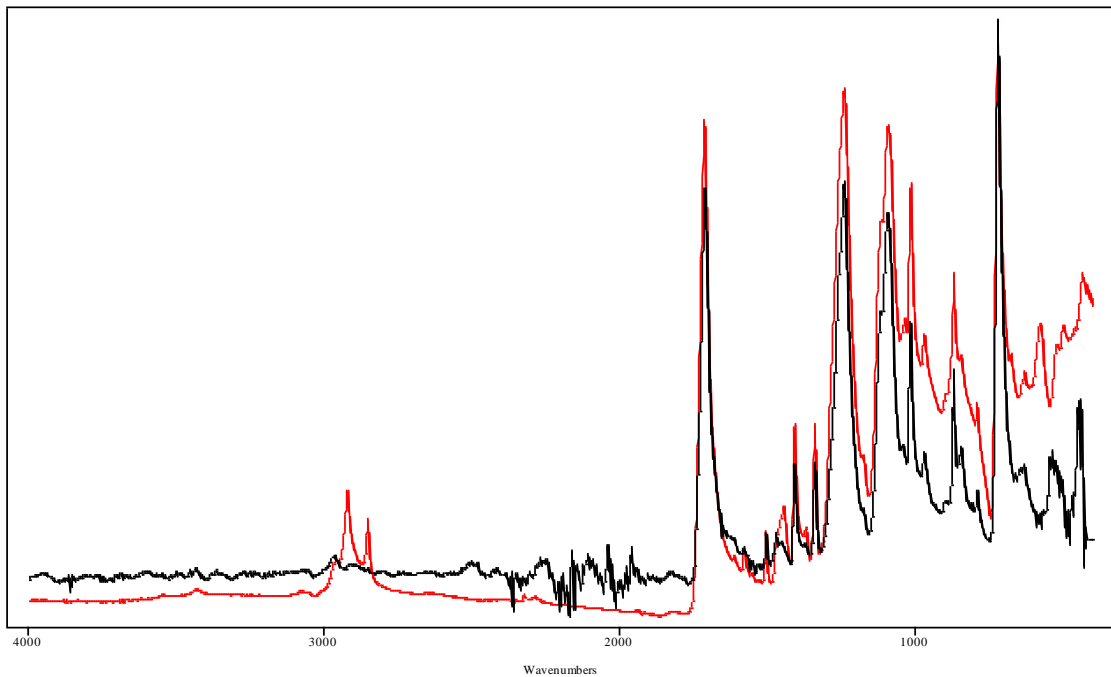
Tabel 1.2. Villa- ja viskooskiudude omadused [12, 53]

Omadus	Vill	Viskoos
Kiu pikkus	25-400 mm, peenemad villakiud on lühemad	Sõltub tootmisest
Kiu jämedus	10-70 μm	Sõltub tootmisest
Tihedus	1,3 g/cm ³	1,52 g/cm ³
Kiu ristlõige	Peaaegu ümmargune	Ebakorrapäraselt sakiline, näha on õhuke koorikkiht. Ristlõikepinna kuju varieerub olenevalt tootjast ja tootmismenetlusest. Toodetakse ka õõnsat viskooskiudu.
Koostis	Villakiud koosneb peamiselt keratiinist. Villakiud on keskmiselt 50% süsinikku, 20- 25% hapnikku, 16-17% lämmastikku, 7% vesinikku ja 3-4% väävlit.	Tooraineks on puidu tselluloos.
Veeimavus	Väga hügrokoopne.	Väga hügrokoopne, suure niiskusimavusega.
Eristamine	Kiu pind on soomuseline.  [53]	Pind sarnaneb viskooskiul mitmetele tehiskiududele. Tavaviskoosi pind on sile, võib esineda täppe või piki kiu pinda kulgevat viirutust.  [54]
Muu	Lambavill on väga elastne kiud. Lambavilla katkevenivus on suur, 30-45%. Märjalt lambavilla tugevus väheneb ja venivus suureneb.	Saab toota soovitud ehitusega. Märgtugevus on väiksem kui kuivtugevus. Kiud on keskmise venivusega, kuid väheelastne ja vetruv.

Tabel 1.3. Polüester- ja akrüülkiudude omadused [55]

Omadus	Polüester	Akrüül
Tihedus	1,38 g/cm ³	1,12- 1,18 g/cm ³
Koostis	Moodustub polüetüleentereftalaadist	Akrüülkiud sisaldavad vähemalt 85 massiprotsenti akrüülnitriilpolümeere.
Kiu pikkus ja jämedus	Saab reguleerida tootmisprotsessis vastavalt kasutusotstarbele. Saab mõjutada ka polüestri molekuli suurust, mis omakorda mõjutab otseselt kiutugevust.	Saab valmistada sobiva pikkuse ja jämedusega, samuti saab ristlõikepinna kuju varieerida.
Niiskuse mõju	Niiskus polüestri tugevusomadusi ei mõjuta.	Niiskus mõjutab mõnevõrra kiu tugevust: märgtugevus on 5-25% väiksem kuivtugevusest.
Eristamine	Visuaalsel vaatlusel meenutab polüester muid sünteeskiude. Looduslikest kiududest saab seda eristada põletusproovi abil või mikroskoopilisel uurimisel.  [54]	Akrüülkiudu saab looduslikest kiududest eristada samuti põletusproovi abil või mikroskoopilisel uurimisel.  [54]
Muu	Tugev, keskmise raskusega, keemiliselt püsiv kiud. Polüesterkiu tootmisel kasutatakse mitmeid lisaaineid, need võivad olla näiteks: matistavad ained, värvipigmentid, optilised pleegitid, antistaatikud, tulekindlad ained, niiskusimavusvõime parandajad.	Kuulub kergete kiudude hulka. See on samuti keemiliselt püsiv kiud. Lisaks võidakse kasutada erinevaid lisaaineid: matistavaid, antistaatilisi ja antimikroobseid aineid ning värvipigmente. Kiudude katkevenivus on 20-50%.

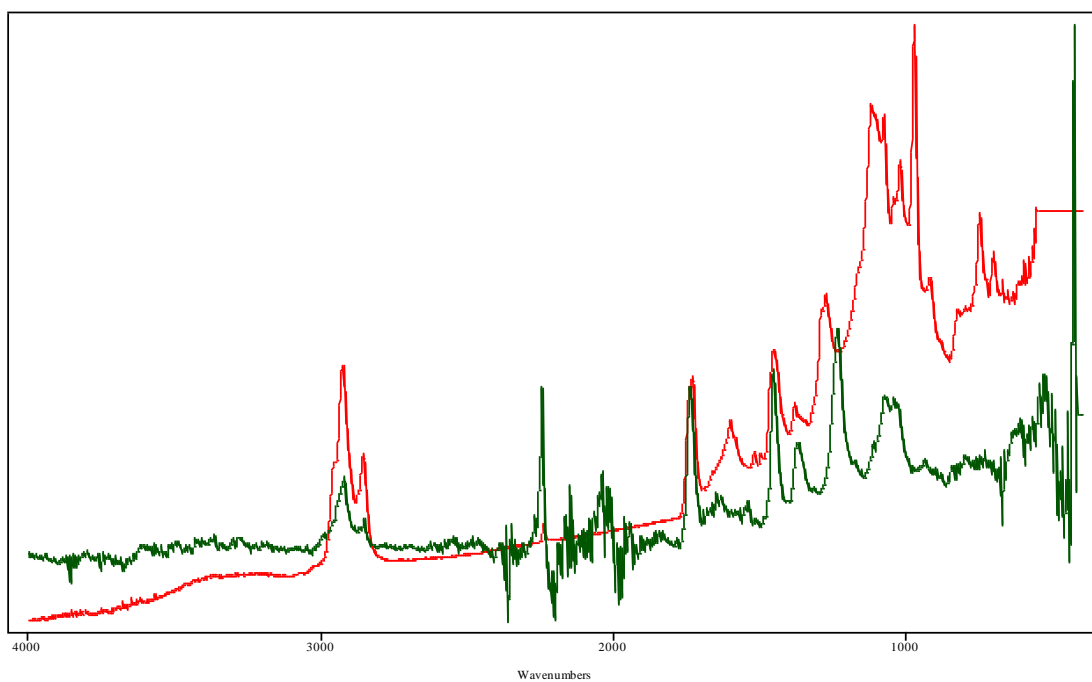
LISA 2 FTIR-analüüsi tulemused



Joonis 2.1. Polüesterkiududest tekstiilmaterjali FTIR-analüüs

Tabel 2.1. Polüesterkiududest tekstiilmaterjalile pakutud vasted

Score	Name	Entry	Library
0.9615	Machinable and Bendable Clear PETG Rod; Polyethylene terephthalate glycol modified	1035	FDM ATR Polymers
0.9559	Poly(butylene terephthalate), melt viscosity 8500p, 30965-26-5	0268	FDM ATR Polymers
0.9434	Poly(ethylene terephthalate), inherent viscosity 0.7, T _g =81, 29154-49-2	0316	FDM ATR Polymers
0.9358	Self-Lubricating Hydex Polyester Rod	1048	FDM ATR Polymers
0.9150	Rynite PET Natural Pellets	0997	FDM ATR Polymers
0.9060	Dupont Hytrel TPE Thermoplastic Elastomer, beige, pellets G5544	0950	FDM ATR Polymers
0.8322	Dimethyl isophthalate, 1459-93-4	0042	FDM ATR Polymers
0.8268	Polyethylene glycol 200 dibenzoate, 9004-86-8	0076	FDM ATR Polymers
0.8242	Poly(diallyl isophthalate), 25035-78-3	0280	FDM ATR Polymers
0.8193	Diethylene glycol dibenzoate, 120-55-8	0029	FDM ATR Polymers
0.8129	Dipropylene glycol dibenzoate, 27138-31-4	0049	FDM ATR Polymers
0.7698	Methyl vinyl ether/maleic acid copolymer, monoisopropyl ester, 50/50 copolymer (molar), 31307-95-6	0173	FDM ATR Polymers
0.7693	Cellulose acetate hydrogen phthalate, 9004-38-0	0112	FDM ATR Polymers



Joonis 2.2. Akrüülkiududest tekstiilmaterjali FTIR-analüüs

Tabel 2.2. Akrüülkiududest tekstiilmaterjalile pakutud vasted

Score	Name	Entry	Library
0.8245	Medium Strength Neoprene Rubber, 30A Durometer, Ge xtal	1094	FDM ATR Polymers
0.8198	High Strength Multipurpose Neoprene Rubber, 40A Durometer, Ge xtal	1079	FDM ATR Polymers
0.8190	GE Ultem, natural, pellets, Polyetherimide; PEI	0955	FDM ATR Polymers
0.8108	High Strength Multipurpose Neoprene Rubber, 30A Durometer, Ge xtal	1077	FDM ATR Polymers
0.8090	Hypalon Rubber, 65 Durometer, contains talc, Ge xtal	1090	FDM ATR Polymers
0.8034	Medium Strength Neoprene Rubber, 40A Durometer, Ge xtal	1096	FDM ATR Polymers
0.8033	GE Ultem Rod; PEI; Polyetherimide	1029	FDM ATR Polymers
0.7994	Cellulose acetate hydrogen phthalate, 9004-38-0	0112	FDM ATR Polymers
0.7976	Butyl Rubber, 60 Durometer, contains talc, Ge xtal	1064	FDM ATR Polymers
0.7973	Butyl Rubber, 60 Durometer, Ge xtal	1065	FDM ATR Polymers
0.7956	Poly(vinyl alcohol), 78% hydrolyzed, Mw=2000, 9002-89-5	0401	FDM ATR Polymers
0.7920	Medium Strength Neoprene Rubber, 50A Durometer, Ge xtal	1098	FDM ATR Polymers
0.7919	Static Control Neoprene Rubber, 50A Durometer, Ge xtal	1124	FDM ATR Polymers

LISA 3 Pindtiheduse arvutamise lähteandmed

Tabel 3.1. Linakiust valmistatud tekstiilmaterjali pindtiheduse arvutamise lähteandmed

	Katsekeha 1	Katsekeha 2	Katsekeha 3
mass (g)	1,8344	1,8420	1,8033
pikkus (cm)	10 10,1 10	10,2 10,2 10,1	10 9,9 10
keskmise pikkus (cm)	10,0	10,2	10,0
laius (cm)	10 10 9,9	10 10 10,1	10 10 10
keskmise laius (cm)	10,0	10,0	10,0
pindtihedus (g/m²)	183,44	180,58	180,93
Keskmise pindtihedus (g/m²)	181,65		
Standardhälve (g/m²)	1,27		

Tabel 3.2. Puuvillakiust valmistatud tekstiilmaterjali pindtiheduse arvutamise lähteandmed

	Katsekeha 1	Katsekeha 2	Katsekeha 3
mass (g)	1,3491	1,3445	1,3742
pikkus (cm)	10 9,9 10	9,9 9,9 10	10,3 10,3 10,1
keskmise pikkus(cm)	10,0	9,9	10,2
laius (cm)	10 10 10,3	10,1 9,8 10	9,8 10 10,1
keskmise laius (cm)	10,1	10,0	10,0
pindtihedus (g/m²)	134,02	135,81	134,74
Keskmise pindtihedus (g/m²)	134,85		
Standardhälve (g/m²)	0,73		

Tabel 3.3. Villakiust valmistatud tekstiilmaterjali pindtiheduse arvutamise lähteandmed

	Katsekeha 1	Katsekeha 2	Katsekeha 3
mass (g)	1,4889	1,4633	1,4546
pikkus (cm)	10	10,1	10
	10,1	10,1	10
	10	10,1	10
keskmise pikkus (cm)	10,0	10,1	10,0
laius (cm)	10,1	10,1	10
	10,4	10,1	10,1
	10,2	10	10,1
keskmise laius (cm)	10,2	10,1	10,1
pindtihedus (g/m²)	145,01	143,92	144,50
Keskmise pindtihedus (g/m²)	144,48		
Standardhälve (g/m²)	0,45		

Tabel 3.4. Viskooskiust valmistatud tekstiilmaterjali pindtiheduse arvutamise lähteandmed

	Katsekeha 1	Katsekeha 2	Katsekeha 3
mass (g)	1,2232	1,2368	1,2545
pikkus (cm)	10,1	9,8	9,8
	10,2	9,9	10
	10,2	9,6	10
keskmise pikkus (cm)	10,2	9,8	9,9
laius (cm)	9,7	9,9	9,7
	9,2	10	10,2
	9,6	10,1	10,2
keskmise laius (cm)	9,5	10,0	10,0
Pindtihedus (g/m²)	126,65	126,63	125,87
Keskmise pindtihedus (g/m²)	126,38		
Standardhälve (g/m²)	0,36		

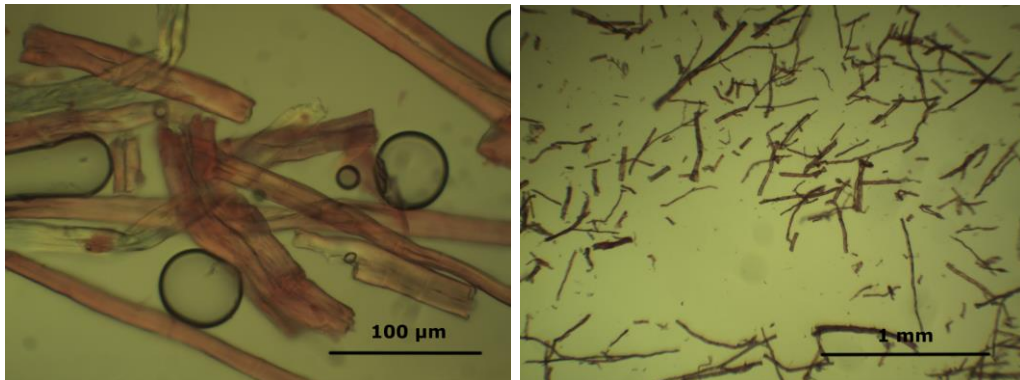
Tabel 3.5. Akrüülkiust valmistatud tekstiilmaterjali pindtiheduse arvutamise lähteandmed

	Katsekeha 1	Katsekeha 2	Katsekeha 3
mass (g)	1,8352	1,4905	1,5753
pikkus (cm)	10	9,9	10
	10	9,8	10,1
	9,8	10	10,2
keskmise pikkus (cm)	9,9	9,9	10,1
laius (cm)	10,3	10	9,7
	10,3	10	9,8
	10,3	10	10
keskmise laius (cm)	10,3	10,0	9,8
pindtihedus (g/m²)	179,37	150,56	158,61
Keskmise pindtihedus (g/m²)	162,85		
Standardhälve (g/m²)	12,14		

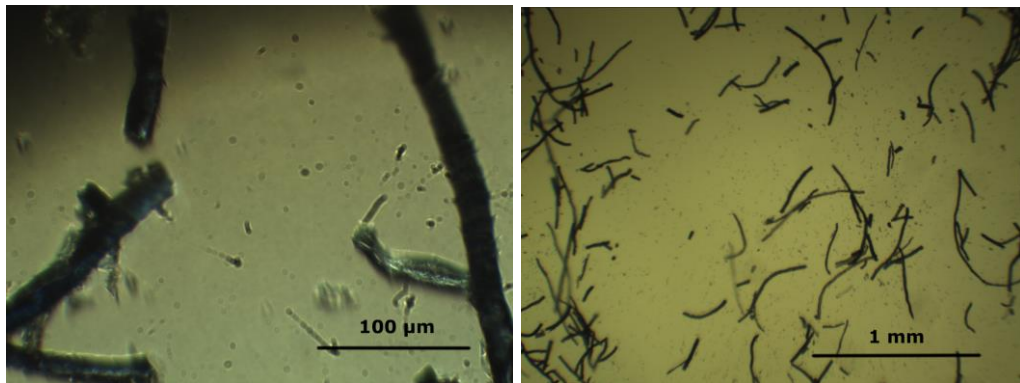
Tabel 3.6. Polüesterkiust valmistatud tekstiilmaterjali pindtiheduse arvutamise lähteandmed

	Katsekeha 1	Katsekeha 2	Katsekeha 3
mass (g)	1,4414	1,4166	1,4306
pikkus (cm)	10,3	9,8	10
	10,1	9,9	10,1
	10,1	9,9	10
keskmise pikkus (cm)	10,2	9,9	10,0
laius (cm)	10,2	10,1	10,3
	10,2	10,1	10,1
	10	10	10,1
keskmise laius (cm)	10,1	10,1	10,2
pindtihedus (g/m²)	139,91	142,62	140,25
Keskmise pindtihedus (g/m²)	140,93		
Standardhälve (g/m²)	1,21		

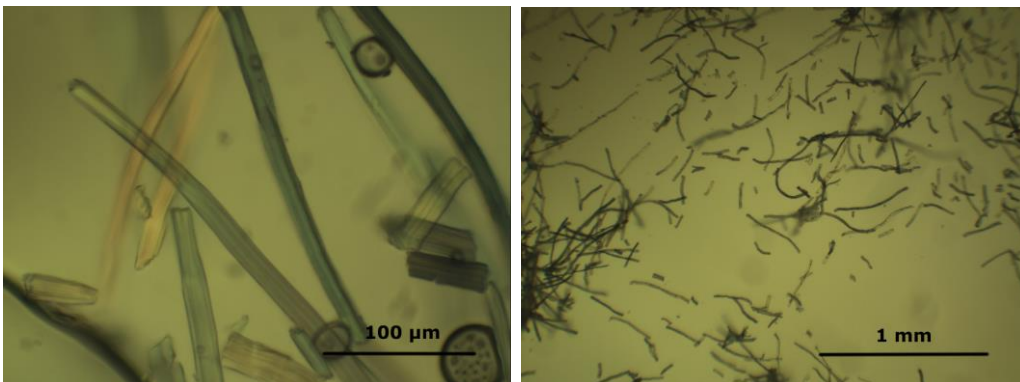
LISA 4 Purustatud tekstiilkiudude fotod



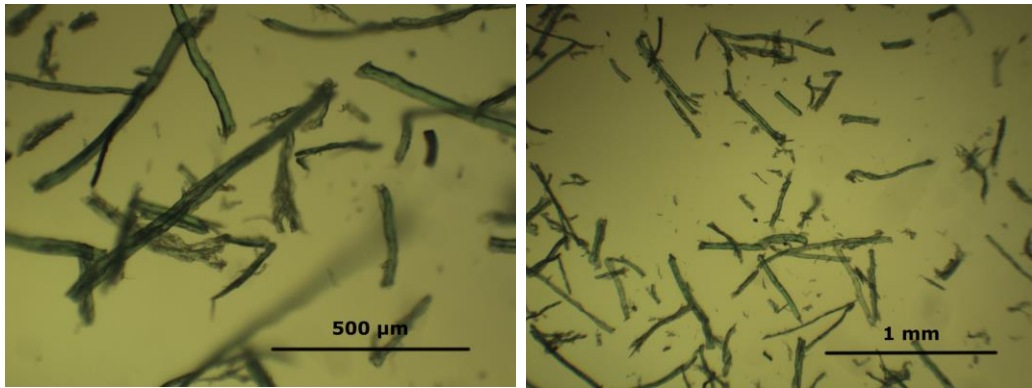
Joonis 4.1. Purustatud linakiud: vasakpoolne pilt on suurendusega 400x ja parempoolne 40x



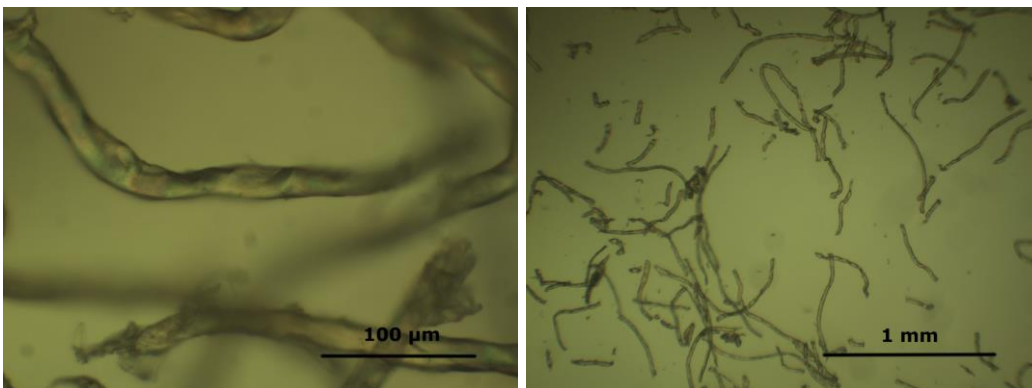
Joonis 4.2. Purustatud villakiud: vasakpoolne pilt on suurendusega 400x ja parempoolne 40x



Joonis 4.3. Purustatud viskooskiud: vasakpoolne pilt on suurendusega 400x ja parempoolne 40x



Joonis 4.4. Purustatud akrüülkiud: vasakpoolne pilt on suurendusega 100x ja parempoolne 40x



Joonis 4.5. Purustatud polüesterkiud: vasakpoolne pilt on suurendusega 400x ja parempoolne 40x

LISA 5 Purustatud tekstiilkiudude mõõtmed

Tabel 5.1. Purustatud tekstiilkiudude mõõdetud diameetrite väärtused (μm)

Nr	Diameeter, μm					
	Lina	Puuvill	Vill	Viskoos	Polüester	Akrüül
1	25	23	14	14	19	31
2	28	18	18	18	24	32
3	24	18	18	15	28	39
4	17	15	20	16	22	21
5	25	19	16	13	22	33
6	18	15	16	13	23	36
7	28	23	16	15	19	30
8	36	12	15	17	24	26
9	28	13	22	16	18	35
10	19	20	16	17	20	23
11	19	29	23	13	22	32
12	10	28	21	14	23	24
13	13	25	19	13	17	24
14	16	27	23	15	23	10
15	22	30	25	15	19	40
16	18	22	19	14	21	27
17	17	27	19	22	20	31
18	14	17	14	14	22	26
19	17	22	20	14	18	32
20	19	18	19	17	22	31
21	19	16	22	13	23	27
22	27	28	19	15	16	29
23	28	15	16	19	27	37
24	17	16	17	13	22	26
25	15	25	12	17	26	24
26	30	16	19	15	24	34
27	19	19	22	17	19	31
28	21	15	19	11	17	25
29	11	19	20	18	16	38
30	17	18	15	16	16	41
31	12	22	16	14	22	20
32	27	18	15	17	19	26
33	12	25	23	11	20	38
34	20	22	22	17	22	27
35	11	21	15	14	25	30
36	9	27	14	12	21	39
37	6	20	15	14	25	30
38	30	20	23	15	24	25
39	20	22	16	15	24	24

Nr	Lina	Puuvill	Vill	Viskoos	Polüester	Akrüül
40	21	16	27	15	21	33
41	15	28	15	13	19	23
42	13	33	27	17	24	24
43	18	13	22	22	26	25
44	13	18	20	13	26	19
45	38	15	18	12	19	25
46	14	20	17	15	18	34
47	23	22	9	16	20	23
48	27	17	25	18	21	26
49	21	10	14	17	21	32
50	21	18	12	10	19	37
Keskmine	20	20	18	15	21	29
Standardhälve	7	5	4	2	3	6
Vähim väärtus	6	10	9	10	16	10
Suurim väärtus	38	33	27	22	28	41

Tabel 5.2. Purustatud tekstiilkiudude mõõdetud pikkuste väärtused (mm)

Nr	Pikkus, mm					
	Lina	Puuvill	Vill	Viskoos	Polüester	Akrüül
1	0,263	0,133	0,307	0,196	0,453	0,355
2	0,471	0,418	0,199	0,46	0,192	0,452
3	0,169	0,166	0,528	0,197	0,823	1,878
4	0,249	0,45	0,478	0,192	0,37	0,546
5	0,122	0,297	0,161	0,085	0,54	0,137
6	0,461	0,374	0,526	0,094	0,277	0,335
7	0,236	0,575	0,075	0,086	0,203	0,694
8	0,643	0,251	0,179	0,183	0,321	0,745
9	0,316	0,377	0,191	0,534	0,2	0,449
10	0,285	0,481	0,195	0,31	0,719	0,214
11	0,236	0,189	0,884	0,136	1,618	0,335
12	0,105	0,707	0,119	0,267	0,276	0,307
13	0,133	0,575	0,477	0,132	0,123	0,841
14	0,125	0,187	0,257	0,404	0,263	0,734
15	1,103	0,458	0,42	0,083	0,28	0,265
16	0,222	0,35	0,427	0,347	0,689	0,541
17	0,406	0,246	0,14	0,188	0,552	0,334
18	0,116	0,189	0,129	0,085	0,136	1,365
19	0,158	0,711	0,224	0,147	0,24	0,548
20	0,21	0,915	0,153	0,567	0,355	0,232
21	0,132	0,38	0,234	0,169	0,531	0,741
22	0,195	0,269	0,211	0,429	0,402	0,261

Nr	Lina	Puuvill	Vill	Viskoos	Polüester	Akrüül
23	0,457	0,431	0,697	0,212	0,445	0,314
24	0,116	0,18	0,273	0,216	0,219	0,409
25	0,104	0,382	0,343	0,111	0,29	0,234
26	0,169	0,454	0,312	0,169	0,566	0,249
27	0,315	0,345	0,129	0,115	0,288	0,291
28	0,136	0,668	0,23	0,134	0,458	0,483
29	0,523	0,117	0,33	0,076	0,656	0,824
30	0,424	0,12	0,237	0,141	0,676	0,285
31	0,337	0,155	0,181	0,499	0,228	0,642
32	0,239	0,198	1,046	0,153	0,277	0,336
33	0,66	0,261	0,295	0,695	0,53	0,627
34	0,574	0,504	0,222	0,573	0,462	0,624
35	0,157	0,333	0,094	0,116	0,189	0,496
36	0,105	0,253	0,301	0,545	0,284	0,891
37	0,197	0,313	0,185	0,211	0,103	0,32
38	0,107	0,625	0,31	0,122	0,232	0,336
39	0,306	0,216	0,453	0,765	0,223	0,161
40	0,94	0,147	0,207	0,141	0,669	0,338
41	0,154	0,398	0,235	0,208	0,248	0,612
42	0,115	0,459	0,235	0,111	0,32	0,214
43	0,375	0,116	0,416	0,117	0,424	0,354
44	0,175	0,189	0,327	0,205	0,254	0,494
45	0,069	0,212	1,453	0,074	0,189	0,334
46	0,207	0,359	0,348	0,123	0,331	0,153
47	0,414	0,247	0,176	0,078	0,294	0,585
48	0,629	0,221	0,08	0,317	0,91	0,254
49	0,671	0,929	0,162	0,072	0,586	0,931
50	0,153	0,173	0,544	0,085	0,218	0,165
Keskmine	0,304	0,354	0,327	0,233	0,403	0,485
Standardhälve	0,223	0,198	0,252	0,177	0,259	0,318
Vähim väärtus	0,069	0,116	0,075	0,072	0,103	0,137
Suurim väärtus	1,103	0,929	1,453	0,765	1,618	1,878

LISA 6 Absorptsioonikatse algandmed ja vahetulemused

Tabel 6.1. Linakiuga valmistatud komposiitmaterjali absorptsioonikatse algandmed ja vahetulemused

Parameetrid enne katse algust	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,5	17,6	17,7	17,60
diameeter 2 (mm)	17,5	17,7	17,6	
paksus (mm)	4,1	4,3	3,7	4,02
mass (g)	0,45	0,42	0,44	0,438

Parameetrid pärast katset	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,5	17,5	17,9	17,72
diameeter 2 (mm)	17,8	17,8	17,8	
paksus (mm)	4,0	4,3	4,9	4,40
mass (g)	0,50	0,49	0,48	0,488

Parameetrite muutus	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	-0,01	-0,08	0,20	0,113
diameeter 2 (mm)	0,28	0,10	0,19	
paksus (mm)	-0,06	-0,02	1,22	0,380
mass (g)	0,04	0,07	0,03	0,049

Diameetri muutuse %	0,64
Paksuse muutuse %	9,45
Massi muutuse %	11,21

Tabel 6.2. Puuvillakiuga valmistatud komposiitmaterjali absorptsioonikatse algandmed ja vahetulemused

Parameetrid enne katse algust	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,5	17,4	17,4	17,33
diameeter 2 (mm)	17,3	17,3	17,3	
paksus (mm)	3,1	2,5	3,7	3,12
mass (g)	0,43	0,42	0,43	0,430

Parameetrid pärast katset	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,6	17,3	17,5	17,33
diameeter 2 (mm)	17,2	17,2	17,2	
paksus (mm)	3,1	2,5	3,8	3,13
mass (g)	0,47	0,45	0,51	0,478

Parameetrite muutus	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	0,11	-0,05	0,12	0,000
diameeter 2 (mm)	-0,07	-0,06	-0,05	
paksus (mm)	-0,03	-0,02	0,08	0,010
mass (g)	0,04	0,02	0,08	0,048

Diameetri muutuse %	0,00
Paksuse muutuse %	0,32
Massi muutuse %	11,14

Tabel 6.3. Villakiuga valmistatud komposiitmaterjali absorptsioonikatse algandmed ja vahetulemused

Parameetrid enne katse algust	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,4	17,3	17,4	17,34
diameeter 2 (mm)	17,5	17,3	17,1	
paksus (mm)	3,0	3,3	3,8	3,38
mass (g)	0,43	0,46	0,42	0,437

Parameetrid pärast katset	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,6	17,3	17,5	17,42
diameeter 2 (mm)	17,7	17,2	17,2	
paksus (mm)	3,1	3,4	3,9	3,47
mass (g)	0,47	0,51	0,51	0,496

Parameetrite muutus	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	0,18	-0,04	0,10	0,078
diameeter 2 (mm)	0,20	-0,08	0,11	
paksus (mm)	0,08	0,06	0,13	0,090
mass (g)	0,05	0,05	0,08	0,059

Diameetri muutuse %	0,45
Paksuse muutuse %	2,67
Massi muutuse %	13,44

Tabel 6.4. Viskooskiuga valmistatud komposiitmaterjali absorptsioonikatse algandmed ja vahetulemused

Parameetrid enne katse algust	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,4	17,4	17,4	17,40
diameeter 2 (mm)	17,4	17,4	17,3	
paksus (mm)	3,3	3,6	4,2	3,68
mass (g)	0,47	0,42	0,41	0,436

Parameetrid pärast katset	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,4	17,9	17,4	17,52
diameeter 2 (mm)	17,4	17,7	17,3	
paksus (mm)	3,4	3,7	4,2	3,77
mass (g)	0,51	0,50	0,54	0,517

Parameetrite muutus	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	0,04	0,46	-0,03	0,118
diameeter 2 (mm)	-0,02	0,27	-0,01	
paksus (mm)	0,11	0,13	0,01	0,083
mass (g)	0,04	0,08	0,13	0,081

Diameetri muutuse %	0,68
Paksuse muutuse %	2,26
Massi muutuse %	18,61

Tabel 6.5. Akrüülkiuga valmistatud komposiitmaterjali absorptsioonikitse algandmed ja vahetulemused

Parameetrid enne katse algust	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,3	17,3	17,4	17,32
diameeter 2 (mm)	17,4	17,3	17,2	
paksus (mm)	2,3	1,9	2,0	2,02
mass (g)	0,49	0,40	0,41	0,433

Parameetrid pärast katset	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,3	17,2	17,3	17,33
diameeter 2 (mm)	17,3	17,5	17,4	
paksus (mm)	2,3	1,9	2,1	2,10
mass (g)	0,49	0,40	0,41	0,434

Parameetrite muutus	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	0,00	-0,06	-0,08	0,013
diameeter 2 (mm)	-0,14	0,20	0,16	
paksus (mm)	0,05	0,04	0,15	0,080
mass (g)	0,00	0,00	0,00	0,001

Diameetri muutuse %	0,08
Paksuse muutuse %	3,96
Massi muutuse %	0,14

Tabel 6.6. Polüesterkiuga valmistatud komposiitmaterjali absorptsioonikatse algandmed ja vahetulemused

Parameetrid enne katse algust	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,2	17,1	17,4	17,27
diameeter 2 (mm)	17,2	17,3	17,4	
paksus (mm)	2,0	2,1	2,1	2,07
mass (g)	0,42	0,44	0,42	0,423

Parameetrid pärast katset	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	17,2	17,2	17,5	17,30
diameeter 2 (mm)	17,2	17,3	17,4	
paksus (mm)	2,1	2,1	2,1	2,10
mass (g)	0,42	0,44	0,42	0,424

Parameetrite muutus	I	II	III	Keskmine
diameeter 1 (mm)	0,01	0,06	0,06	0,033
diameeter 2 (mm)	0,04	0,04	-0,01	
paksus (mm)	0,08	0,01	0,00	0,030
mass (g)	0,00	0,00	0,00	0,001

Diameetri muutuse %	0,19
Paksuse muutuse %	1,45
Massi muutuse %	0,22