



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Tartu kolledž

LOODUSLIKE NING SÜNTEETILISTE TEKSTIILMATERJALIDE KÜTTEVÄÄRTUS

CALORIFIC VALUE OF NATURAL AND SYNTHETIC TEXTILES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kärt Kolpakov

Üliõpilaskood: 192484NAEM

Juhendaja: Jane Raamets, vanemlektor

Kaasjuhendaja: Laura Lokko, projektijuht

Tartu 2023

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.

"24" mai 2023

Autor: Kärt Kolpakov

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"24" mai 2023

Juhendaja: Jane Raamets

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaasjuhendaja: Laura Lokko

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"24" mai 2023

Kaitsmiskomisjoni esimees: Jane Raamets

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kärt Kolpakov (sünnikuupäev: 15.09.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Looduslike ning sünteetiliste tekstiilmaterjalide kütteväärtus,

mille juhendaja on Jane Raamets, ning kaasjuhendaja on Laura Lokko.

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*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

Kärt Kolpakov / allkirjastatud digitaalselt /

24.05.2023

TalTech Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kärt Kolpakov, 192484NAEM

Õppekava, peeriala: NAEM06/18, Tööstusökoloogia

Juhendaja(d): Vanemlektor, Jane Raamets, tel 55 61 33 44

Projektijuht, Laura Lokko, tel nr 53 73 51 92

Lõputöö teema:

Looduslike ning sünteetiliste tekstiilmaterjalide kütteväärtus

Calorific value of natural and synthetic textiles

Lõputöö põhieesmärk:

1. Selgitada välja, millised tekstiilmaterjalid on kütteväärtuse poolest kõige suurema tootlusega sõltuvalt tekstiilmaterjali koostisest

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjalide läbitöötamine, kirjanduse ülevaate koostamine	10.03.22
2.	Katse läbiviimine	11.04.21
3.	Tulemuste kirjeldamine, arutelu koostamine	14.04.23
4.	Lõputöö esitamine	24.05.23

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "24" mai 2023

Üliõpilane: Kärt Kolpakov /allkirjastatud digitaalselt/ "24" mai 2023a

Juhendaja: Jane Raamets /allkirjastatud digitaalselt/ "24" mai 2023a

Kaasjuhendaja: Laura Lokko /allkirjastatud digitaalselt/ "24" mai 2023a

Programmijuht: Jane Raamets /allkirjastatud digitaalselt/ "24" mai 2023a

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1. KIRJANDUSLIK ÜLEVAADE	10
1.1 Tekstiilmaterjalid	10
1.1.1 Tootmine ja töötlemine	11
1.2 Loodusliku päritoluga	12
1.2.1 Taimsed kiud	14
1.2.2 Loomsed kiud	17
1.2.3 Mineraalsed kiud	21
1.3 Sünteetilise päritoluga	22
1.3.1 Looduslikud polümeerid	22
1.3.2 Sünteetilised polümeerid	23
1.3.3 Anorgaanilised polümeerid	27
1.4 Tekstiiljätmed	28
1.5 Kütteväärtus	33
1.6 Tuhasus	34
2. MATERJAL JA METOODIKA	35
2.1 Katse materjal	35
2.2 Katse meetodika	36
2.2.1 Kalorimeetrilised mõõtmised	36
2.2.2 Kuivaine määramine	38
2.2.3 Tuhasuse määramine	38
2.2.4 Kütteväärtuse määramine	39
3. TULEMUSED	40
3.1 Niiskusesisaldus uuritavas materjalis	40
3.2 Tuhasisaldus uuritavas materjalis	41

3.3 Kütteväärtused uuritavas materjalis	43
3.3.1 Looduslike tekstiilmaterjalide kütteväärtus	43
3.3.2 Sünteetiliste tekstiilmaterjalide kütteväärtused	44
3.3.3 Segakiuliste tekstiilmaterjalide kütteväärtused	46
3.3.4 Kütteväärtuste võrdlus	47
4. ARUTELU JA JÄRELDUSED	49
KOKKUVÕTE	52
SUMMARY	54
Kasutatud kirjandus	56
LISAD	63
Lisa 1 Katse tulemused	64
Lisa 2 AS Epler & Lorenz analüüsiprotokoll	65

EESSÕNA

Magistritöö temaatika pakuti autorile välja lõputöö juhendaja Jane Raametsa poolt ning lõputöö koostas üliõpilane Kärt Kolpakov ajendatud huvist tekstiiljäätmete käitlemise vastu. Lõputööd juhendasid vanemlektor Jane Raamets (PhD) ning projektijuht Laura Lokko (MSc). Töö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis, mille laboris teostati katsed.

Magistritöö autor soovib tänada juhendajat Jane Raametsa ning kaasjuhendajat Laura Lokkot, kelle abile autori huvi antud valdkonna vastu süvenes. Samuti soovib töö autor avaldada tänu Helen Sõmerikule asjakohaste soovitude eest ning Rein Pärismaale õigele teele suunamise eest.

Antud töös põletati erinevaid tekstiilmaterjale nende kütteväärtuse leidmiseks, leiti nende materjalide niiskusesisaldus ning tuhasus. Magistritöös kasutatud tekstiilmaterjalid valiti pisteliselt nende koostise ning tuntuse järgi. Saadud tulemuste põhjal tehti järeldused, kuidas kiuline koostis võib mõjutada põletatud materjali kütteväärtust. Kõige kõrgema kütteväärtusega tekstiilikis osutus lükra, mis on täissünteetiline kiud koosnedes kahest erinevast sünteetilisest kiust.

Märksõnad: tekstiiljäätmel, tekstiilmaterjalid, looduslikud tekstiilkiud, sünteetilised tekstiilkiud, magistritöö.

SISSEJUHATUS

Kaubandusstatistika andmetel on rõivaste tootmine ja tarbimine kujunenud lineaarseks mudeliks. Selle all peetakse silmas „tooda-kasuta-hülga“ majandusmudelit, millega toetatakse odavat ja kergesti kättesaadavat tooret, energiat ning odavat tööjõudu. Antud juhul on selline meetod tekitanud aga olukorra, kus toodetakse madala kvaliteediga, lühikese elueaga tooteid ning suuremahuliselt, millega kaasnevad suurem nõudlus odavale tööjõule, materjalile ning muude ressursside järele. Mis on omakorda tekitanud ületarbimise ning tekstiil- ja rõivajäätmete järsu kasvu. (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020) Nüüdseks on juba hakatud leidma viise ja välja töödeldud üleeuroopaline tekstiilstrateegia, kuidas edendada tekstiilmaterjali ringlussevõttu ning taaskasutamist (Keskkonnaministeerium, 2021).

Eestis tekkis 2021. aastal 19,36 miljonit tonni jäätmeid, mis sisaldavad kogutud jäätmeid ning millest ladestati 6,52 miljonit tonni prügilatesse. Antud jäätmetekke kogus on 16% suurem võrreldes sellele eelneva aasta andmetega ning samuti on suurenenud ka ladestamise osakaal (8,8%) eelneva aastaga. Taaskasutatud jäätmete osakaal (13,40 miljonit tonni) on tõusnud 27,3% võrreldes eelneva aastaga. (Statistikaamet, 2023) Eestis on mitmeid võimalusi tekstiilmaterjalide kogumiseks: kogumispunktid jäätmejaamades, viia kasutatud kuid korduskasutatavad rõivad uus- ja korduskasutuskeskustesse või poodidesse, kaubanduskeskused ja rõivakauplused ning kogumiskonteinerid suuremates linnades. (Keskkonnaministeerium, 2023)

Statistikaameti andmetel (2020 a) põhineb suurel osal energiatoodangust ikka veel põlevkivil (39,5%) võrreldes muude ressurssidega [puidujäätmed ja -hake (25,1%), tuuleenergia (15%), põlevkivigaas (13,3%), jäätmekütus (2,6%), päikeseenergia (2,1%) ning muud allikad (2,4%)] (Statistikaamet, 2021). Selle tõttu soovib autor uurida tekstiiljätmete taaskasutamise potentsiaali energia tootmiseks ning anda hinnangut sellele, kas tekstiiljätmete suunamine energiatoodanguks on kütteväärtuse poolest konkurentsivõimeline jäätmetel põhinevate ressurssidega.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on selgitada välja, millised tekstiilmaterjalid on kütteväärtuse poolest kõige suurema tootlusega sõltuvalt tekstiilmaterjali koostisest. Töö teema on aktuaalne, kuna viimaste aastate jooksul on teostatud mitmeid uuringuid tekstiiljätmetest ning selle potentsiaalset erinevate töötlemisviiside rakendamises.

Magistritöö uurimisülesanneteks on:

anda ülevaade tekstiiljätmetest Eestis, tekstiilmaterjalidest, nende koostisest ning omadustest;

selgitada välja, millised tekstiilmaterjalid on kütteväärtuse poolest kõige suurema tootlusega sõltuvalt nende koostisest;

Antud töös keskendutakse põhiliselt materjalide toormele ehk koostise klassifikaatorile, milleks autor valis looduslikud tekstiilmaterjalid ning sünteetilised tekstiilmaterjalid. Materjalid on valitud pisteliselt sõltuvalt *European Man-Made Fibres Association* andmetel enimtoodetavate tekstiilmaterjalide seast (European man-made fibres association, 2021).

Töö käigus uuritakse 13 erinevat tekstiilmaterjali:

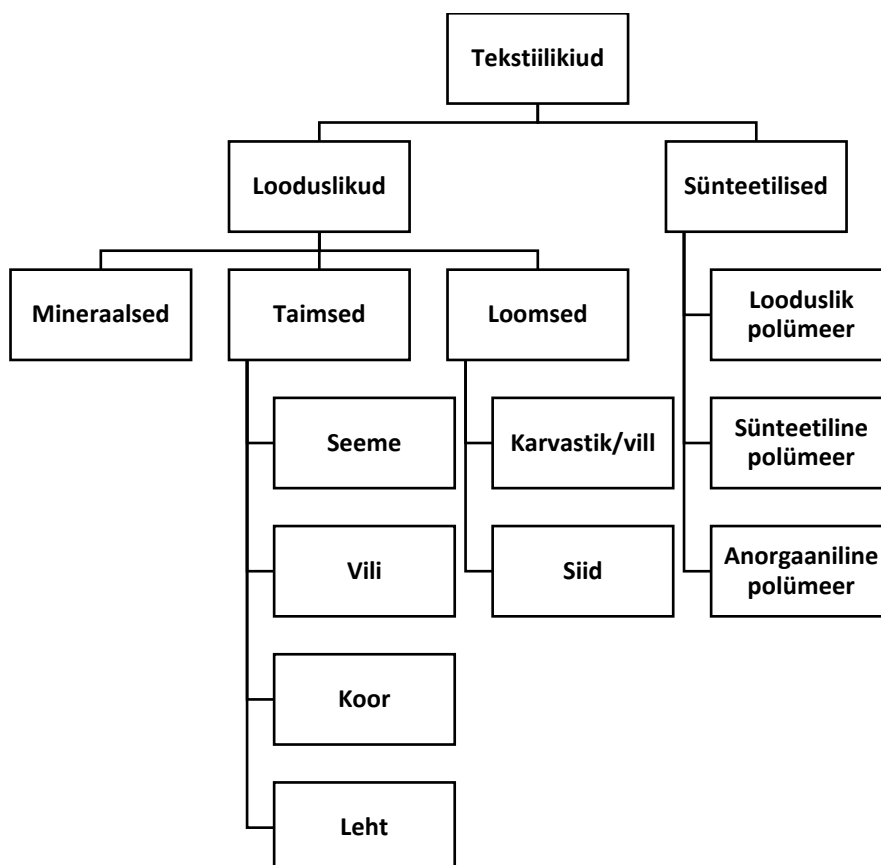
- Looduslikud materjalid: vill, puuvill, siid, lina, nahk;
- Sünteetilised materjalid: viskoos, fliis, lükra, samet, polüester, kunstnahk;
- Segakiulised materjalid: teksas (98% puuvill, 2% elastaan), teksas (70% puuvill, 26% polüester, 4% elastaan), lükra (20% elastaan, 80% nailon).

Antud magistritöö on eksperimentaalne, mille käigus viiakse läbi katse. Teoreetilises osas annab autor ülevaate erinevatest tuntud tekstiillikudest, mida võib kohata igapäevaelus kasutatavates tekstiilide koostises. Autor annab ka ülevaate tekstiiljätmetest ning nende taaskasutusvõimalustest. Lisaks antakse ülevaade kütteväärtusest ning tuhasusest, kuidas antud teemad omavahel seotud on. Peale kirjanduslikku käsitletakse töö meetodikat ning tuuakse välja uurimistöö tulemused. Arutletakse töö käigus saadud tulemusi kirjandusliku ülevaatega ning tuuakse välja järeldused, millele järgneb kokkuvõte.

1. KIRJANDUSLIK ÜLEVAADE

1.1 Tekstiilmaterjalid

Kõige vanemaks ja tähtsamaks tööstusharuks peetakse tekstiili tootmist. Tekstiile kasutatakse laialdaselt nii rõivaste kui ka mööblitoodete tootmises. Kuna tekstiil koosneb kiududest siis tekstiilide üheks tähtsaimaks osaks on teadus kiududest. (Cook, 1959) Tekstiilikiud on väikseim nähtav element tekstiili tootmises (Sulochani, Jayasinghe, Nilmini, & Priyadarshana, 2021). Kiudude füüsilised omadused säilivad ka selle töötlemisel kangaks, mille tulemusel toodetakse kindlate omadustega toode. (Cook, 1959). Tekstiilmaterjali nimetatakse materjaliks, millel on lisaks pikkusele ja laiuzele antud ka muud kasulikud omadused. Materjalis paiknevate kiudude kindel struktuur annab kangale omapära, näiteks elastsuse. Võrdluseks võib tuua välja näiteks lindi ja filmiriba, kus antud materjal ei veni. (Kiron, 2021)



Joonis 1.1 Tekstiilmaterjalide liigitus toorme järgi (Kiron, 2021)

Tekstiile võib eristada järgnevate klassifikaatorite järgi: toorme ehk koostise; polümeeri; praktilisuses; termoplastilisuse; niiskuse imendamise järgi kui ka materjalide botaanilise, zooloogilise või keemilise nimetuse järgi. (Kiron, 2021)

Tekstiilkiud jaotuvad rahvusvaheliste standardite alusel toorme järgi looduslikeks (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2014) ning sünteetilisteks (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2021a) Looduslike kiude hulka liigitatakse kiud, mis koostise poolest on muutmata ning pärinevad loodusest (siia alla kuuluvad nii taimsed kui ka loomsed kiud) (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2014). Sünteetilised kiude hulka kuuluvad keemilised ehk keemilisel teel saadud kiudained, on selleks siis sünteetilised kiud või keemiliselt töödeldud looduslikud kõrgmolekulaarsed ühendid (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2021a).

Loodusliku päritoluga materjalid jagunevad veel omakorda loomseteks (loomade karvahast või -kiududest koosnev materjal või loomadest eritunud materjal), taimseteks (seemned, koor, lehed, vili) ning mineraalseteks materjalideks. Sünteetilised materjalid jaotuvad omakorda naturaalsedeks polümeerideks, sünteetilisteks polümeerideks ning anorgaanilisteks polümeerideks, mis vajavad töötlemiseks kõrget temperatuuri (klaas, metall). (Kiron, 2021)

1.1.1 Tootmine ja töötlemine

Vanimaks kiude töötlemise viisiks peetakse ketramist. Algne käsiketramine sõltus suurel määral osavusest, milleks kasutati väga lihtsaid mehhaanilisi seadmeid. Alates 14. sajandist arendati antud protsess mehhaanilisemaks ning 16. sajandiks töödeldi see välja täismehhaaniliseks. Ketramisel saadud lõnga kasutati kangastelgedel käsitsi kudumiseks, mille tulemusel saadi tekstiil, kus lõngad ristusid ning põimusid. 18. saj. kestel tööstusrevolutsiooniga võtsid antud tööd üle aurumasinad ning 19. saj. oli juba kogu protsess mehhaaniline. Loodusest olid kõige kättesaadavamad puuvill, vill, lina ning siid. Millest arenes välja tekstiilitööstus, kus otsiti uusi võimalusi, kuidas välja töötada paremaid mehhanisme tekstiilide tootmiseks, kuid pöörati vähem tähelepanu uue toormaterjalide avastamisele. Alles 20. sajandil hakati pöörama tähelepanu uudsetele toormele, kui õpiti uurima tekstiile, selle keemilisi ja füüsilisi omadusi, mis aitasid kaasa uute tekstiilide välja töötamisele. Populaarseid looduslikke tekstiile

kasutatakse endiselt ja üsna mahukalt, kuid nendega on hakanud konkureerima viskoos ning sünteetilised tekstiilid. (Cook, 1959)

Looduslike materjale peetakse eelistatuimaks säästlikkuse poolest, kuid siiski leidub neil omi puudujääke ning negatiivseid aspekte. Tuues näitena puuvilla, mis oma omaduste poolest on biolagunev ning taastuv materjal (õigetel tingimustel) sõltub selle tootlikkus suurest veekogusest tootmises. Looduslikud loomsetest kiududest materjalid (sh nahk, vill, suled ning siid) pakuvad haruldasi omadusi, kuid tootmine võivad kaasa tuua loomade ületoitmise, sundtoitmise ning ebaeetilisi tegusid toorme tootmiseks. Loomakasvatusega kaasnevad ka suured mõjud keskkonnale, sh laialdane maakasutus ning mõju kliimale lisaks rohkete kemikaalide kasutus nahatööstuses. (Global Fashion Agenda, 2021)

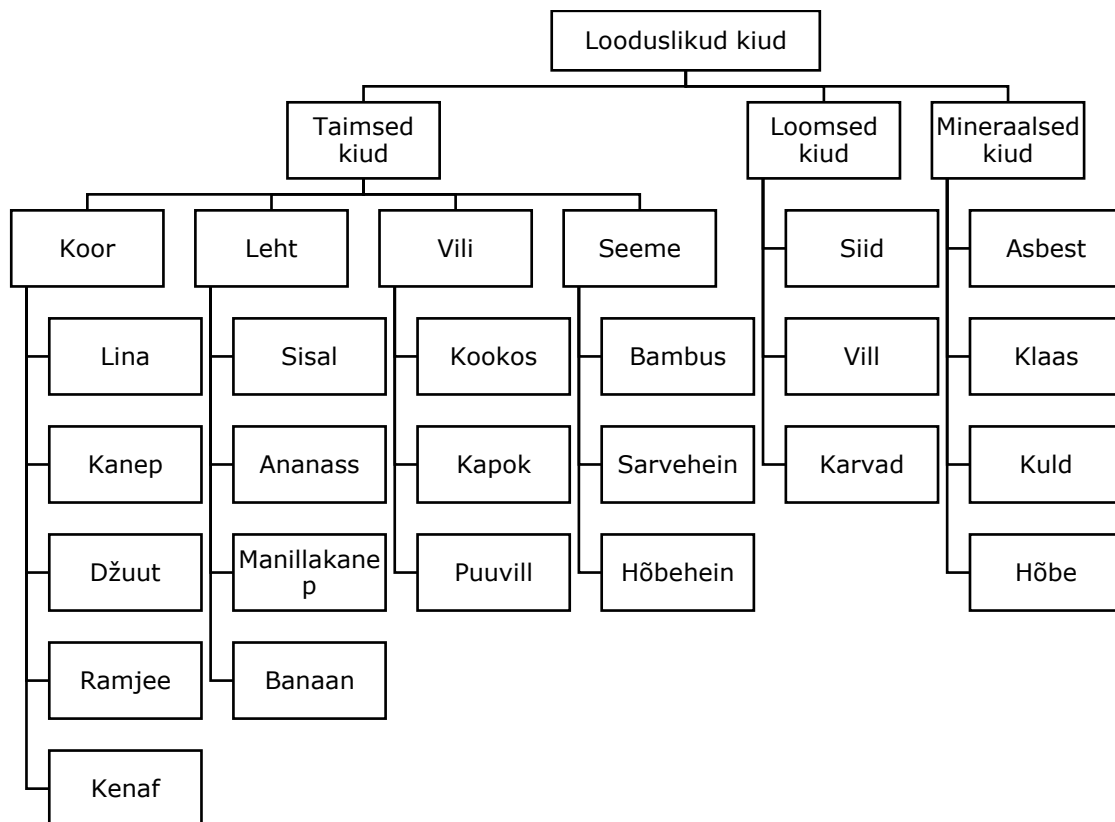
Paljud firmad püüdlevad taaskasutatud materjalide kasutamise poole tootmises, kelle hulka kuuluvad ka H&M ning Lindex, kes kasutavad taaskasutatud polüestrit, mida on toodetud PET pudelitest. Antud materjal on kergesti kättesaadav ning on usaldusväärne kvaliteedi poolest. Lisaks leidub firmasid, kes kasutavad ka taaskasutatud nailonit ja polüamiidi, mida toodetakse kasutatud kalavõrkudest. (Watson, Elander, Gylling, Andersson, & Heikkilä, 2017)

1.2 Loodusliku päritoluga

Hakati otsima alternatiivseid võimalusi nahale ning avastati, et taimede ning loomseid pikki kiude on võimalik väänata ning kokku punuda üheks niidiks. Need omakorda põimida kokku ning moodustada kanga, mis oleks veniv, soe ning mugav. (Cook, 1959) Vaatamata hilisemale tekstiilmaterjalide arengule peetakse loodusliku päritoluga materjale jätkusuutlikumaks selle taastuva ressursi tõttu. Loodusliku päritoluga tekstiilmaterjale eelistatakse epoksüvaikudel põhinevatele polümeeridele, süsinikkiududele kui ka nafta põhiste tekstiilmaterjalidele selle madalale hinnale kui ka selle võimele biolaguneda (nii osaliselt kui ka täielikult). (Kumar & Allamraju, 2019) Samuti kuluvad sinna alla ka faktorid: mõjud inimkehale, väiksemad kulud töötlemisel, jätkusuutlik tarne, madal omahind, paremad mehhaanilised ning füüsilised eripärad.

Veelgi peetakse tähtsaks ka asjaolud, et antud materjali tüüp ei ole kantserogeenne. (Konwar & Boruah, 2018)

„Loodusliku materjali kiudude tugevus sõltub selle keemilisest koostisest“ (Konwar & Boruah, 2018). Taimsete kiudude koostises on enamjaolt tselluloos, mille füüsiliste omaduste tõttu on sellel järgmised omadused: imendada niiskust (nii vedelas olekus kui ka auruna); kõrge kuumataluvuse ning -salvestamise võime, kompimisel jahutav tunne; aktiivne temperatuuri vähendamise võime; isolatsioonimaterjalina kuiv ning soe; võime vähendada staatilist elektrit; pidurdada bakterite kasvu nahal ning on õrn nahale. Riidekiu omadus niiskust siduda on oluline näitaja materjali kütteväärtuse hindamisel. (Kumar & Allamraju, 2019)



Joonis 1.2 Looduslike tekstiilkiudude klassifikatsioon (Benin, Kannan, Bright, & Moses, 2020)

Nahk

Tsivilisatsiooni tekkides oli kõige alupärasemaks tekstiilmaterjaliks loomanahk, kuna see oli kõige kättesaadavam materjal, millega keha katta ja füüsiliste tegurite eest

kaitsta (Kumar & Allamraju, 2019). Aja möödudes hakati enam tähelepanu pöörama mugavusele ning materjali jäikusele. Nahkmaterjalile on iseloomulik jäik ning paindumatu tekstuur, mida oli ebamugav kanda. (Cook, 1959) Tekstiilnahk koosneb enamasti valgu kiudest, millest on eemaldatud alusnahk ning marrasnahk ehk epidermis. Toornahk koosneb 65% veest, 33% valgust, 0,2-2% rasvast ning ligikaudu 0,3% mineraalsetest sooladest. (German Insurance Association, 2023) Nahk kui tekstiil, ei põle kergesti ning on kõrge vastupidavusega kuumale ning süttimisele. Samuti mõjutab tulekindlust ka naha parkimine, muutes nahkmaterjali veelgi vastupidavamaks tulele. Nahkmaterjal imab ja säilitab hästi niiskust, mille tulemusel nahkmaterjali süttimise tõenäosus on väiksem. Töötlemata nahk võib süttida 200 °C juures, taimsete vahenditega pargitud nahk põleb 288 °C juures ning kroomi sooladega pargitud nahk peab vastu kuni 450 kraadini enne kui põlema läheb. (Concord, n.d)

1.2.1 Taimsed kiud

Lina

Lina kiud on tugevaimad võrreldes neid teiste tekstiilikutega, puuvillaga võrreldes kaks korda tugevamad. Lina kiud on jäigad, kuid võivad väiksel määral venida, kui pinget vähendada. Linane materjal on 20% tugevam, kui see on niiske, mille tulemusel on nende eluiga on pikem, kui teistel tekstiilidel. Linane materjal võib taluda kuni 120 kraadist kuumust, enne kui see hakkab nähtavalt värvust muutma. Materjali värvusele annab tunda ka otsene päikesevalgus. Võrreldes puuvillaga, on linast materjali raskem valgendada, kuid tänapäevaste kemikaalidega on tarvis vaid minimaalseid koguseid, et saavutada soovitud tulemus. Lina peab vastu aluselistele lahustele, lahjendatud ning nõrkadele hapetele, kuid saab kahjustada kui tegemist on külmade kontsentreeritud ja kuumade lahjendatud hapetega. Kõrge temperatuuri ja valgendaja koosmõju tulemusena võib lina kiudu pidada puhtaks tselluloosiks, mis teeb selle materjali vastupidavaks mädanemisele. Tavalises olekus linase materjali biolagunemine on lina kuivuse tõttu aeglane, ka tugevalt hallitavas keskkonnas, mis peaks lagunemist soodustama ei kiirene lina lagunemine. Linane materjal on hea soojusjuht, mille tõttu materjal tundub kompimisel jahe. (Cook, 1959)

Materjali omaduste tõttu on see leidnud läbi ajaloo laialdast kasutust purjede ning telkide katematerjalides, kalavõrkudes ja raamatute köitmisel. Siiani kasutatakse linast materjali nahatöötlustes. Enamjaolt kasutatakse ka linast kiudu sünteetiliste või

teiste looduslike kiududega põimimisel, mille vastupidavad omadused annaksid lõpptootetele pikaajalisema eluea. Kiujäätmelid kasutatakse ära paberitootmises (materjal on kõrgema kvaliteediga) nagu sigaretipaber, rahapaber ning kirjababer. (Cook, 1959)

Puuvill

Looduslikest kiudest on puuvilla kiud üks laialdasemalt kasutatud kiudest tekstiilitööstuses (D. La Rosa & Grammatikos, 2019). Seda võidakse kasutada kõikides majapidamistekstiilides ning rõivatüüpides. Puuvillakiud on jäigemad kui villal, nailonil või viskoosil, kuid on venivam kui linal. Tekstiili venivuse suurendamiseks kedratakse puuvilla lõng võimalikult peeneks ja kootakse võimalikult tihedaks tekstiiliks. Kangad nagu voile, popliin ning flanelid on toodetud just sellisel meetmel, et riie oleks venivam/elastsem, kuigi peamiseks koostisosaks on puuvill. Tugevamad kangad nagu teksas ja drill on vähem venivad. (Cook, 1959) European Clothing Action Plan (ECAP) 2019. aasta uurimuse kohaselt moodustab puuvill rohkem kui 43% kõikidest toodetavatest kiududest Euroopa turul (Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor, 2023).

Puuvillakiude leidub valitud taimede seemnekaunades sh *Gossypium* perekond, mis tekivad peale õite närbumist. Kaunades asetsevad seemned on ühendatud kauna külge õrna niidiga, mida nimetatakse puuvilla kiuks. Kui seemnekaun on küps, kaun lõhkeb ning on moodustunud pehme vatt. Puuvilla kiud võib erineda struktuurilt vastavalt, millistes tingimustes taim kasvanud on. Puuvilla kiud koosnevad erinevatest tselluloosikihtidest – nooremad kihid kiu sisimas ning vanemad kiht asetsevad kiu välises ringis. Kui taimed kasvavad esimeses kasvufaasis ebasoodsates tingimustes on tulemuseks lühikesed puuvillakiud, kui teises faasis esineb tagasilööke ja kasv aeglustub on saadakse tulemusena õhukesed kiud. Kuna seemnekaunad küpsevad erineva kiirusega võib osa kiude jääda ebaküpseks, mille tulemusel kiud jäävad liiga õhukeseks. Kogutoodangust võib ebaküpseteks kiududeks osutada ligikaudu üks kolmandik toodangust. Mida ebaküpsemad on kiud, seda suurem on vaha, pektiini ning valgu osakaal ja väheneb tselluloosi osakaal kius. Puuvilla kiud on 94% puhas tselluloos ($(C_6H_{10}O_5)_n$) ning ülejäänud 6% moodustab valgust, pektiinest materjalist ning mineraalsetest ainetest ja vahast. Lisaks sisaldab väikesel määral orgaanilisi happeid, suhkruid ning pigmente. Töötlemisel eemaldatakse kiust enamus muu materjal ja kiu koostiseks jääb 99% tselluloosi. Puuvill on vastupidav tekstiilmaterjal selles sisalduva tselluloosi keemilise stabiilsuse ja suure osakaalu tõttu. (Cook, 1959)

Puuvillakiud töödeldakse mehaanilisel ketramisel lõngaks, milleks võidakse kasutada vähesel määral mineraalset õli, mis tähendab, et lõnga sisse jäävad lisaks tselluloosile ka muud materjalid ehk lisandid. Puhta lõnga jaoks materjal enne valgendamist töödeldakse vastavalt soovitud omaduste saavutamiseks. Töötlemiseks kasutatakse *Kier* keetmist rõhu all, kus materjal keedetakse 108 °C juures seebikivi lahuses. Antud meetodiga eemaldatakse osa vaha kiudude pinnalt, mis muudab puuvilla kiu vastuvõtlikumaks niiskusele. Puuvillast materjal on enamjaolt sile ning kiudude vahasisalduse tõttu annab see materjalile ka õrna läike. (Cook, 1959)

Keemiliselt töödeldud puuvilla on mitmeid tüüpe. Pool atsetüülitud (PA) puuvill erineb tavalisest puuvillast selle võimest olla vastupidavam kuumusele, valitud kemikaalidele ning mikroorganismide ja hallituse arengu vastu. Puuvilla, mida on töödeldud 2-aminoetüül väävelhappega naatriumhüdroksiidi sees, nimetatakse AM puuvillaks. AM puuvilla peetakse vastuvõtlikumaks osadele värvainetele, mis pärast värvimist muudab kiu vastupidavamaks valgusele ning korduvale pesemisele. AM puuvillas sisalduvate kemikaalide grupid reageerivad kergemini teiste kemikaalidega, mis aitavad järgneval töötlemisel lisada uusi omadusi tekstiilile, näiteks suurendada vastupanu mädanemisele. Puuvilla, mida on töödeldud monokloroäädikhappega naatriumhüdroksiidi sees nimetatakse CM puuvillaks. CM puuvilla on töödeldud akrüülnitriiliga, mis omakorda jaotavad CM puuvilla omaduste poolest kaheks: hästi vett imav materjal, mis peab kauem vastu töötlusviisile, kus soovitakse tulemusena eemaldada tekstiilist kergemalt kortsud ning materjal, mis laguneks kergelt vees. Viimast kasutatakse tihti abilõngadena, mida hiljem oleks tarvis tekstiilist eemaldada. Tsüanoetüülitud CN puuvill on puuvill, mida on töödeldud akrüülnitriiliga, mille tulemusel on puuvillal suurepärane vastupidavuse mädanemise vastu ning kõrge kuumataluvus niiskes keskkonnas. Samuti on seda kergem toonida, kuna on vastuvõtlikum erinevatele värvainetele. Lisaks eelnevatele tüüpidele on võimalik puuvilla töödeldes anda sellele tulekindlus, vett hülgav omadus või muuta tekstiili omadust, et vähendada kortsude teket sõltuvalt töötlusviisist. (Cook, 1959)

Puuvilla tugevus on seotud niiskusega. Mida niiskem on keskkond, seda rohkem imendab riie vett ning mille tulemusel suureneb ka tekstiilikiu tugevus. Mida kuivem kiud seda jäigem ja paindumatu on tekstiil (tekstiili venitades 5-10% võib rebeneda ja katkeda). Puuvill võib taluda paar tundi 120 °C kuumust enne kui see hakkab nähtavalt värvi muutma, 150 °C juures hakkab materjal lagunema ning 240 °C kraadi juures võib

paari minutiga materjal tõsiselt kannatada saada. Normaalingimustel seismisel kaotab materjal vaid vähesel määral oma tugevusest. Puuvilla tekstiil on tundlik päikesekiirgusele. Kõrge temperatuur ning niiskus soodustavad materjali lagunemist päikesevalguse käes. Puuvillakiude söövivad kuumad lahjendatud happed ning külmad kontsentreeritud happed. Leelised üldiselt puuvilla kiule kahjulikku mõju ei avalda, kuid leeliselises keskkonnas võivad kiud paisuda. Koid ja putukad puuvilla ei kahjusta kuid puuvilla tekstiil on soodne seente ja bakterite kasvukohaks. (Cook, 1959)

1.2.2 Loomsed kiud

Kui taimse päritoluga riidekiud koosnevad enamjaolt tselluloosist siis loomse päritoluga riidekiud koosnevad suuremal osal valgust, mille tõttu on taimse päritoluga riidekiud tugevamad ja jäigemad ning seega rohkem vastupidavad. Erandiks võib lugeda siidi, mille kiud on tugevad aga ei ole jäigad. Siidi materjal on raskesti kättesaadav ning hinnalisema väärtusega kui teised looduslikud materjalid. Sellegi poolest eelistatakse tugevamate komposiitmaterjalide loomiseks taimseid tekstiilmaterjale. Lisaks eelistatakse taimseid kiude, kuna toorainet on võimalik kasvatada ülemaailmselt ja saagi kasvatuse ja koristuse perioodid on lühemad ja tihedamad. (Kumar & Allamraju, 2019) **Loomsed** kiud moodustasid 50-ndatel ligikaudu 7% tekstiilikiududest tekstiilitööstuses. Vaatamata selle väiksele osakaalule on loomsetel kiududel tähtis roll tekstiilide tootmises, kuna kiudude omadused varieeruvad laialdaselt. (Cook, 1959)

Vill

Lambavill on üks laialdasemalt kasutatud loomseid tekstiilmaterjale, juba 50-ndatel moodustades ligikaudu 90% maailma loomsete kiudude tootmisest. Tekstiilitööstuses peetakse kõiki loomi katvaid kiude karvakiududeks. Keemilise koostise poolest koosnevad kõik karvakiud keratiinist, kuid erinevad füüsiliste omaduste ja struktuuri poolest. Enamus loomseid karvakiude kasutatakse tekstiilitööstuses, kuid mõned on kasutusel ka muul otstarbel. Lisaks villale ja karvakiule kuulub loomsete kiudude hulka ka siidikiud. (Cook, 1959)

Lambavilla tootmine tekstiilitööstuses sai alguse Suurbritanniast, kus toormeks oli metsikute lammaste vill. Keldide mõjul hakati harrastama kodustatud lammaste pidamist. Lambavilla tootmine, ketramine lõngaks ning rõivaste tootmine sai hoo sisse

tekstiilitööstuses. Nõudluse suurenemisega hakati villast toodetud riideid taaskasutama, mille tulemusel saadi väiksema kvaliteedi ja odavam villatoode. Tööstuse arenedes ja nõudluse kasvuga hakati toorainet laiemalt kokku ostma. Valdav osakaal lambavillast pärines Lõuna-Aafrikast, Uus-Meremaalt ning Austraaliast. Enamjaolt harrastati just Hispaaniast aretatud meriino lammaste kasvatamist selle kõrge kvaliteedi ning pehmuse tõttu. Karvkate erineb loomade kasvatamise eesmärgist, liigist, vanusest ning nende elukeskkonnast. Lamba kasukas koosneb villa kasutuse eesmärgil kahest astmest. Väline karvkate on pikemate ning jämedate karvadega ning sisemine ning nahalähedasem osa koosneb peenematest karvadest, mis on õrnemad ning pehmemad. Meriino lammastel koosneb kasukas enamjaolt vaid ühest kihist mida iseloomustavad peenemad ja õrnemad karvad. Kui loom on püगतud selle karvkattest toimub villa klassifitseerimine, puhastamine ning kammimine. Villa valgendamine toimub enamjaolt pärast lõngaks kudumist. (Cook, 1959)

Villa kiudu katab vett tõrjuv välinet ümbris, mis on ainuke valgust mitte koosnev osa kiust, mida on töötlemisel väga kerge kahjustada. Ümbris koos selle all asetseva soomuselise osaga moodustab kiu naha. Kiu siseosa moodustab üle 90% kogu kiust ning koosneb keratiinist. Villa kiud on tugevamad ja elastsemad kui taimsed kiud ning pärast venitamist taastavad oma algpärase kuju (venitades 25-35% võib katkeda, märjalt 25-50%). Villa kiud imavad vett teistest kiududest paremini vett. Selle võime imada niiskust mängib suurt rolli tekstiilis, kuna protsessi käigus toimub soojuse eraldumine. Villakiudude struktuur lõngas soodustab selle võimet tekstiilis salvestada sooja. Siiski aja jooksul kuuma vee ja auru mõjul hakkab kiud lagunema ning kaotab oma tugevuse. Kiud hävineb kui keev vesi saavutab 300 °C, samuti ka rõhu all kuumutades 120 °C juures. Villakiu kvaliteet väheneb väga väikesel määral, kui seda hoiustatakse sobivas keskkonnas. Keratiin hakkab lagunema päikesevalguse käes, mille tõttu kiud muudavad värvust ning tahkestub. Samuti on materjal tundlik leelistele, sealhulgas seebiveele ning hävineb kuumade tugevate väävelhappega kokkupuutel. Villa tekstiili hoiustamisel ebasoodsates tingimustes võib kaasa tuua hallituse leviku ning saada kahjustada insektide (nt koid) tegevuse käigus. (Cook, 1959)

Maailma nõudlus villale on võrdlemisi suurem kui toorme saagikus, mille tõttu taaskasutatakse villa materjali. Taaskasutamist pärsib villa kiu tundlikkus erinevatele kemikaalidele ning selle tundlikkus mehhaanilisele töötlemisele. Ühtlasi võib vill tavapärase kasutamiskiiside näiteks pideva või ettevaatamatu pesemise, kuivatamise, loputamise tõttu materjal viga saada. Tavapäraselt taaskasutatud vill on kootud kokku

madalama kvaliteediga villast või puuvillaga lõimega, mille tulemuseks on keskmise või madalama kvaliteediga tekstiil. Taaskasutatud vill jaguneb kolmeks liigiks:

- **Shoddy** ehk Madala kvaliteediga vill on pärit materjalidest, mida on jahvatatud palju juba algsel tootmisel. Näiteks tviid ning koetised, mis annavad tootele vildise moe ning mida on võimalik kergelt rebida (Cook, 1959).
- **Mungo** vill, mis on toodetud materjalidest nagu veluurid ning melton, mida on freesitud või vilditud juba tootmises. Nende toodete kiud on matisemad kui freesitud toodetes, mille taaskasutamise protsess on raskendatud ning kiud saavad rohkem viga (Cook, 1959).
- **Extract** vill, mis koosneb nii puuvilla ja villa tekstiilidest. Protsessi käigus eemaldatakse puuvill vesinikkloriidi või lahjendatud väävelhappe abil ning järele jäänud vill on lahti rebitud. (Cook, 1959)

Siid

Kui vill ja karvastik kuuluvad karvakiude hulka siis siid on sarnaselt neile loomne kiud, kuid tekkelt erinev. Siidi kiud on materjal, millega insektid ehitavad oma pesa ja kasutavad antud kiudu liikumiseks võrkmaterjalina. Enamus siidikiudest pärineb siidikedriku rööviku kookoni ehitusmaterjalist ning mille päritolu sai alguse Hiinast. Rööviku areng kookonist väljumiseni võib võtta aega ligikaudu kuus kuud, mille järgselt toimub saagi korjamine. Kuna siidikedrik toitub vaid mooruspuu lehtedest, muudab see tekstiili toorme tootmise raskendatuks juba kasvukeskkonna valiku poolest. Saagikus sõltub ümbritsevast temperatuurist ning toidu kvaliteedist, mida tarbitakse suurtes kogustes. Siidikedriku rööviku kookon võib koosneda kuni 1,6 km pikkusest katkematust niidist. (Cook, 1959)

Siiditööstuses rööviku areng pärast kookoni moodustamist peatatakse, et säilitada niidi kvaliteet. Vastasel juhul eritab liblikas kookonist välja pääsemiseks vedelikku, mis siidiniiti lahustab ning mille tagajärjel siidikiud katkeb väikesteks osadeks, mis muudab kiu ebasobivaks kerimiseks. Et toota 5,5 kg toorsiiidi (puhastamata) on tarvis, et 28 g siidikedriku munadest koorub ligikaudu 36 000 röövikut, mille tulemusel saadakse 63 kg kookoni moodustavat materjali. Siidikedriku kasvatajatel on keelatud samade insektide mune tootmiseks kasvatada, et vältida haiguste levikut. Mille tõttu on siidikedrikute aretamine eraldi seisev tootmisharu. Kui enamus siidikiudu siiditööstuses toodetakse kontrollitud keskkonnas siis leidub ka siidi (*Tussah*), mille toore pärineb loomulikes tingimustes kasvanud erinevat liiki siidiussidest, kes toituvad ainuüksi

Pöögiliste taimesugukonda kuuluvast *jolchami* tammest. Insektid nukkudes ei vigasta oma kookonit. (Cook, 1959)

Kui taimsed kiud ja karvakiude iseloomustavad lühikesed kiud, mida kedratatakse kokku üheks pikaks niidiks või lõngaks siis siidikiudu iseloomustab katkematu kiud. Siidikiust koosnev kookon leotatakse kuumas vees, mis aitab pehmeneda tsementeeritud kookonist selle katet, mis koosneb seritsiinist ning harutatakse lahti kiu katkenud otsast. Mitu erinevat kiud juhitakse läbi mitme kookoni avause samal ajal keerates kiude niidiks, et neid paremini koos hoida. *Tussah* siidikookonid on kaetud tugevama kattekihiga, mille leotamiseks kasutatakse naatriumkarbonaati. Niidid on kaetud seritsiiniga kuni siidikiud on kootud tekstiiliks, mis kaitseb kiudu töötlemisel. Seritsiini sisaldavat siidi nimetatakse tugevaks siidiks. *Foulard, georgette*, krepp ning šifoon on kootud tugevast siidist, millest hiljem eemaldatakse seritsiin. Seritsiin eemaldatakse tekstiilist kasutades keevat seebivett, mis annab tekstiilile läike ning mille tulemusel väheneb toote kaal 1/3 võrra. Seda tekstiili nimetatakse pehmeks siidiks. (Cook, 1959).

Siidikiud, mis on ebakõlblikud siidi tekstiili tootmiseks, kedratatakse lõngaks ning kasutatakse ära muude tekstiilide nagu velveti, silmus- või tupsulise pinnaga tekstiilide ning pitside tootmiseks või muul eesmärgil. Siidikiud on tugevam kui puuvill ning nõrgem kui linakiud, märjalt 15-25% nõrgem, kui kuivalt. Normaalses tingimustes venib siidikiud 20-25% enne katkemist ning märjalt 33%. Siid on elastsem kui puuvill või viskoos kuid jäigem kui vill. Venitades siidi üle 2%, materjal enam ei taasta oma algset seisundit. Samuti on siid sama vastuvõtlik niiskusele nagu vill. Kui vesi sisaldab sooli või muid aineid imab siid need kiusse, mille tõttu saab kiud rohkem kahjustada. (Cook, 1959)

Puhas siis võib koosneda ligikaudu 70% valgust (fibroiin, mis koosneb paljudest aminohapetest: glütsiin,alaniin, seriin, türatsiin ja muu), 20-30% seritsiinist (Peets, 2020). Siidi fibroiin erineb villa valgust väavli puudulikkuse tõttu. Siid ei lahustu vees, kuid oksüdeerivad ained, nagu valgendava toimega vesinikperoksiid, kahjustavad siidikiudu. Kasutades väikses koguses happeid tõmbuvad siidikiud kokku ning antud viisil annab see kangale krepitud efekti. Leelised kahjustavad siidi vähem kui villa, *tussah* siid osutab täielikult vastupanud leelistele. Nõrgad leelised võivad vähesel määral kahjustada siidi, rohkem kontsentreeritud söövitavad leelised tuhmistavad siidikiudu

ning tekstiil kaotab oma läike ja tugevuse. Siid on halb elektrijuht, mille tõttu võib tekstiili töötlemisel omandada staatilise laengu. (Cook, 1959)

Siidi peetakse tänase päevani kiudude kuningannaks, millel kiul on tugevus ning paindlikkus, imab hästi niiskust, on kompimisel pehme ning soe, suurepärase vastupidavusega kulumisele ning luksusliku välimusega. Kiu omaduste poolest on siid väga mitmekülgne, millest toodetakse erinevaid tekstiile õhulisest šifoonist tihedate velvetiteni. Vaatamata siidi vastupidavusele on tegemist õrna tekstiiliga, mis võib kahjustada saada erinevate kemikaalide tõtu, selle tiheda struktuuri tõttu võib kergelt rebeneda ning pesemisel ning kuumusega töödeldes olla hoolas. (Cook, 1959)

1.2.3 Mineraalsed kiud

Mineraalsed kiud on tekstiili tööstuses väiksema tähtsusega, kui seda on taimsed või loomsed kiud. Kõige tähtsamaks mineraalseks kiuks loetakse asbesti, mida kasutatakse tulekindlates ja tööstuslikes tekstiilides. (Cook, 1959) Mineraalsetest kiududest on lisaks tuntud klaaskiud – ehk puhutud klaasi kiud koosnevad peenikestest (5-24 μm) klaaskiududest (ränidioksiid – SiO_2), millest toodetakse erinevaid tooteid näiteks lõngad, kangad, isoleeraineid ja struktuuriobjekte või -osi. Antud materjal on suurepärase vastupidavusega kuumale ning materjal on odav. Lisaks valmistatakse klaaskiududest ka klaasfiiber materjali, mis sarnaneb süsinikkiududest kootud kangale, kuid on omaduste poolest erinevad. (Hossain P. S., 2021) Vollastoniit on materjal, mis koosneb (25-150 μm) peenikestest kaltsiumsilikaatkiust (CaSiO_3). Vollastoniidikiudu on lisatud keraamikatoodete tootmises kui ka paberitootmises toorainemassi (vähendab toorme koguseid ja kulusid), mille tulemusel mass peale kuivamist vähendab deformatsiooni. Vollastoniitkiusid kasutatakse enamjaolt ehitusmaterjalides nagu tsement ja kivi, mis muudab materjali tugevust vastupidavamaks (Kuldasheva, Saidmuratov, & Kuldashev, 2020).

1.3 Sünteetilise päritoluga

Sünteetilisi tekstiilmaterjale hakati välja töötama 19.saj (Konwar & Boruah, 2018). Antud tekstiilmaterjalid moodustavad üle 70% kõigist toodetavatest tekstiilmaterjalidest maailmas ning Euroopas on see ligikaudu 80% sh Türgi. Nende materjalide alla kuuluvad nii rõivaste, kodumajapidamis- kui ka tööstuslikud tekstiilmaterjalid nagu rehvid, tööstuslikud lintmaterjalid, täitematerjalid, filtrid ning tulekindlad materjalid. (European Association for Textile Polyolefins, 2021). Sünteetilised kiud ei ole loodud mitte ainult looduslike kiudele alternatiivid vaid esindavad uut liiki kiudud, millel on kõrgem kvaliteet ning leiab laialdasemat kasutust kui tekstiilides (Bagwala, 2021). Materjalid on spetsiaalselt disainitud, et anda neile kombinatsioon vajalikest omadustest lõppkasutuseks. Samuti seotakse sünteetilisi kiude looduslike kiududega nagu puuvill ja vill (European Association for Textile Polyolefins, 2021).

1.3.1 Looduslikud polümeerid

Populaarsemaks looduslikuks polümeerseks tekstiilmaterjaliks peetakse viskoosi, mis koosneb tselluloosi kiududest. Teisteks tselluloosi kiust koosnevate tekstiilmaterjalide hulka loetakse ka lüotsell, modaal, atsetaati ning triatsetaati. (European Association for Textile Polyolefins, 2021) Puuvilla tselluloos on aktiivne kemikaal, mille omadusi ja iseloomu saab muuta. Kui puuvillast pärit tselluloosi töödeldakse keemiliselt, ei nimetata seda enam tselluloosiks vaid selle keemiliseks tuletiseks, kuna omadused muutuvad. (Cook, 1959)

Viskoos

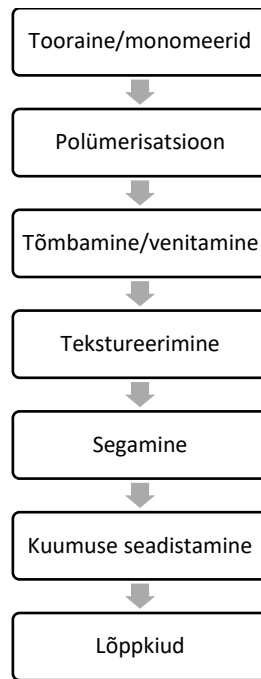
Viskoosi nimetatakse toodetud kiuks, mis koosneb regeneereeritud tselluloosist (Cook, 1959). Viskoos ei peeta looduslikuks kiuks ega ka täielikult sünteetiliseks kiuks, kuna seda toodetakse looduslikust polümeerist, vaid seda nimetatakse poolsünteetiliseks kiuks. Selle odava hinna ning siidiga sarnase läike tõttu on viskoosikiud ka laialdaselt ning mitmekülgsest kasutatav tekstiilkiud. Viskoosi peetakse kõige esimeseks toodetud kiuks. Kuna viskoosi polümeeriks on looduslik puitmaterjalist või puuvilla väikestest kiududest pärit tselluloos, siis sarnanevad selle omadused puuvilla ning lina kiududele, mitte sünteetilistele naftapõhistele kiududele nagu nailon või polüester. (Hossain N. , 2014) Viskoosi tootmiseks kasutatakse suurel määral vett ning kemikaale. Ühe

kilogrammi viskoosi tootmiseks kasutatakse ligikaudu 1,6 t vett, kaks kg väävelhapet, 1,25 kg naatriumhüdroksiid ehk seebikivi, 1,2 kg tselluloosi, ca 0,33 kg süsinikdisulfaadi ning väiksel määral muid kemikaale. Viskoosi tootmine on pika ahelaline protsess, kus vahelülisid mõjutades on võimalik määrata varieeruvate omadustega kiud. Viskoosikiud kuivalt on puuvilla kiududest nõrgemad ning rebenevad kiiremalt, kui kiud on niisked. (Cook, 1959)

Kiud venivad ligikaudu 17 – 25% enne katkemist, kuid märjalt venivad 23-32% enne katkemist. Pärast 2% venitamist, kiud taastab oma algupärase seisundi, kuid suurema venivuse korral kiud deformeerub permanentselt. Viskoosi kiud imendab vett õhust kaks korda rohkem kui puuvilla kiud. Kuna kiud on kaks korda rohkem vastuvõtlikumad veele siis need paisuvad kokkupuutes veega, mille tulemusel kaotab kiud oma tugevuse ja kergesti rebenev. Kiud ei ole termoplastiline, mis tähendab, et kuumusega kokkupuutel see ei sula ega muutu kleepuvaks, kuid 150 °C juures kaotab oma tugevuse, ning 185-205 °C juures laguneb täielikult. Viskoosikiud on kergesti põletatav, kuid päikesevalguse mõjul ei kahjustu (välja arvatud pidevale päikesevalgusele). Happed ja leelised mõjuvad sarnaselt puuvillale, kuid on õrnalt rohkem mõjutatud, samuti osutab tugevat vastupanu kuivpuhastusele ning lahustub vaid keerulisemates orgaanilistes lahustes. Samuti osutab viskoosikiud vastupanu hallitustele (värvus saab õrnalt kannatada, pikaajalises perspektiivis nõrgestab kiudu) ning insektidele, välja arvatud harilikule soomuklasele. (Cook, 1959)

1.3.2 Sünteetilised polümeerid

Enim tuntud sünteetilise polümeeriga tekstiilmaterjalideks loetakse polüestrit, nailon, akrüül, modakrüül, polüpropüleen, polüetüleen ning ka elastaan. (European Association for Textile Polyolefins, 2021) Sünteetiliste kiudude tootmise protsess erineb varieeruvalt kiude eesmärgist ja koostisest, kuid põhiprotsessilt võivad sarnaneda (Hossain S. , 2022).



Joonis 1.3 Sünteetiliste kiudude tootmise põhiprotsess (Hossain S. , 2022)

Elastaan

Elastaan ehk spandex (brändi nimega lükra) on sünteetiline kiud, mis koosneb ligikaudu 85% polüuretaanist. Polüuretaan on elastomeer, mida on võimalik venitada ning pärast venitamist taastab täielikult oma algupärase oleku. Elastaanikiusid peetakse kummikiudest kvaliteetsemateks, kuna elastaanikiud on tugevam, kergemad ja mitmekülgsemalt kasutatav. Kiu koosnevad mitmest polümeerkiududest, mida jaotatakse kaheks: pikad amorfsed ning lühikesed ja jäigad. Elastaanikiud võib olla kummikiust tugevam kuid võrreldes teiste sünteetiliste kiududega on ta võrdlemisi nõrgem. Väga elastsed, põleb aeglaselt ja on vaene elektrijuht. Hea vastupidavus hapetele, kui just ei ületa 24 h ajanormi. Enamus leelistele on vastupidav, kuid mõnede leeliste puhul võib kiud saada kannatada. (Islam, 2021) Enamjaolt on elastaan termoplastiline kiud, sulab 230-290 °C juures ning 150-280 °C juures võib tekstiil muutuda kleepuvaks. Pikaajalise päikesevalguse käes võib õrnalt värvi muuta. Vastupidavus kemikaalidele sõltub elastaan liigist, kuid enamjaolt vastupidav enamuse kemikaalidele. (Cook, 1959)

Nailon

Esimeseks täissünteetiliseks tekstiilikiuks loetakse nailoni. Mis koosneb polüamiidist ning iseloomult termoplastiliselt siidine. (Yusuf, 2014) Nailonit toodetakse erinevaid liike

sõltuvalt selle keemilisest koostisest, samuti toodetud kiud (tuntumad nailon 6 ning nailon 6.6) erinevad väiksel moel omaduste poolest: sulamistemperatuur, vastuvõtlikkus värvainetele ning päikesevalgusele, vastupidavus kuumusele, elastsus ning vastupidavus jne. Nailoni kiude tugevus varieerub, sõltuvalt lõpptootest ning niiskusest, kuid on märjalt nõrgemad kui kuival kujul. Nailoni kiud on venivamad märjalt, kui kuivad kiud ning kõrge tugevusega toote puhul kiud venivad 19-24% enne katkemist ning märjalt on see vahemik 21-28%. Nailoni kiud on väga elastne ning taastub täielikult. Mida tugevamaks on kiud toodetud, seda väiksem on kiu taastumise tõenäosus pärast venitamist. (Cook, 1959)

Antud kiud on sarnane kummikiuga, kuid nailoni taastu nii kiiresti oma algsesse olekusse kui kummikiud. Kui kiudu hoida venitatud asendis mitu päeva võtab selle taastumine aega, ligikaudu 50% taastub kohesel, kuid järgnev võtab kauem aega, et taastuda täielikult. Nailoni kiud võtab vastu vaid vähesel määral niiskust, mille tulemusel niit ei paisu, kuid niidi diameeter võib 0,02 korra laieneda. Nailoni kiu omadused säilivad täielikult, kui neid on hoitud külmas temperatuuris ca -40 °C juures, kuid kõrgema vastupidavusega toodetud kiud võivad -80 °C juures säilides nõrgemaks muutuda, kui need on algupärasesse keskkonda tagasi toodud. Nailoni kiu omadused ei muutu 150 °C juures, kuid kui säilitada antud temperatuur kuueks tunniks siis võib kiud värvust muuta. Nailoni omadused muutuvad kehvemaks kui seda hoiustada pikalt kõrge temperatuuri ja õhuga varustatud keskkonnas. Nailoni kiud hakkab sulama alates 250 °C. (Cook, 1959)

Nailon on tulekindlam kui viskoos, puuvill, vill või siid ning tulega kokkupuutel see sulab, ega ei teki leeki, kui temperatuur ei ole ulatunud 532 kraadini. Erinevate värvainete ning tekstiili toonitud kemikaalide abil võib tekstiil muutuda kergemini põlevaks. Ajaline faktor hoiustamisel ei avalda mõju nailoni omadustele ega kvaliteedile. Nagu ka teised kiud mõjub pikaajaline päikesepaiste kiule kahjustavalt. Nailoni kiud saavad vähesel määral kahjustada lahjendatud hapetega ning tugevate leeliseliste ainete sees keetes ei avalda nailonile üldse mingit mõju. Samuti ei mõjuta kuivpuhastuseks mõeldud lahustid nailonile mingit mõju. Insektid, bakterid ega hallitused ei ohusta nailoni kiudu. Kuna nailon imab väga väiksel määral vett on see hea elektrijuht, kuid kiudu on võimalik töödelda, et sellist omadust vältida. (Cook, 1959)

Kunstnahk (PVC)

PVC ehk polüvinüülkloriid on üks populaarseimatest materjalidest, mida kasutatakse sünteetilise ehk võltsnaha tootmiseks selle odava hinna, paindlikkuse ning vastupidavuse tõttu. PVC on kasutuses kottide, jalanõude, autotööstuses, meditsiini- ning ka merevarustustes. Kuna puhas PVC on omaduste poolest jäik ja rabe, lisatakse tootmisprotsessi plastifikaatoreid, mis muudavad tekstiili painduvaks ja vastupidavamaks. Samuti on PVC nahka kergem puhastada, värvida. Plastifikaatoriteks on enamjaolt kõrge keemistemperatuuriga orgaanilised vedelikud, madala molekulmassiga, monomeersed, tuletatud ftalaathapetest või on selleks fosfaadid, trimelliaadid, adipaadid, tsitraadid jne. (Altindag & Akdogan, 2021)

Kui algselt oli PVC oma omaduste poolest jäik ning rabe, termiliselt ebastabiilne, mis oli vajalik selle töötlemiseks siis aja möödudes lisati PVC töötlusesse plastifikaatoreid, mis muutsid materjali painduvaks ning vastupidavaks. PVC põhikoostises olev vinüülkloriidi (VC) oli algselt potentsiaalne ohuallikas tervisele ning hilisemate uuringute tulemustega, tervisriikete ning vähijuhtumite esinemisega seoti VC toksilisuse ja kantserogeensusega. (Mulder & Knot, 2001)

Plastifikaatorid ei imendu keemiliselt polüvinüülkloriidi, mille tõttu need ebastabiilselt seotud tekstiilis ning kipuvad teiste materjalide külge migreeruda. Selle tõttu võib aja möödudes tekstiil deformeeruda ning oma elastsuse kaotada. Toksilisuse ja kantserogeensuse tõttu on PVC tootmisprotsessi üritatud leida erinevaid plastifikaatoreid, mis ei sisaldaks ftalaate, oleksid vähem toksilised, oleksid stabiilsemad plastide, vaikude, kummi ning elastomeeridega. (Altindag & Akdogan, 2021).

PVC laguneb 200 °C juures, venib 12-20% sõltumata niiskusest ning niiskus ei mõjuta kiudu. Küll aga mõjutab PVC kuumus, 70 °C juures tõmbub kokku ja kahaneb, temperatuuri tõusul jätkab kiud kahanemist ja 180 °C juures hakkab lagunema. Oma olemuselt kiud on mittesüttiv, ei põle, ei eraldu leeki, ei vabasta sulanud hõõguvaid tilke, ei levita leeki süttivatele materjalidele. Kõrgel temperatuuril põletades materjal laguneb ning pärast põletust ei ole järele jäänud materjal kuum. PVC säilitab oma elastsuse ja tugevuse kuni -80 kraadi juures. Kiud on vastupidavad päikesepaistele, kaotades vaid 10% oma tugevusest 5 kuu jooksul pideva päikesevalguse käes. Kemikaalidele vastupidav kuid mõningate orgaaniliste lahustitega kokkupuutel kiud

paisub ja venib. PVC kiud on tulekindlad ning nende kiudude sidumine teiste kiududega aitab tõsta tekstiili tulekindust. (Cook, 1959)

Polüester

Polüestrerkiudu peetakse pika ahelalist sünteetilise polümeeriga kiuks, mille kiuline koostis koosneb 85% kahehüdroksüülse alkoholi (HOROH) ja tereftaathappe (p-HOOC-C₆H₄COOH) estrist. „Kõige laialdasemalt kasutatav polüesterkiud on valmistatud lineaarsest etüleentereftalaadist polümeerist/.../.” Antud kiul on mitmekülgsed omadused: tule- ja kuumakindlus, kõrge kiutugevus, vähese kokkutõmbuvusega, valgusallika mõjul ei tuhmune ning kemikaalidele vastupidav. Kiu tootmise põhikoostises on etüleen, mida toodetakse naftast. Polüestrit toodetakse mitmete erinevate meetoditega kasutades, sõltuvalt, millist lõpptoodet soovitakse: pikkade kiudena, lühikeste kiudena või takulised kiudena, või kiutäidisena toodetud kohevat massi. Kõige enam harrastatakse pikakiulist ning kiutäidisena toodetavat polüestri vorme. (Hossain S. , 2022)

Polüesterkiudele on iseloomulik selle tugevus, jäikus, kiud on kemikaalidele vastupidav, karge ning vastupidav kandmisel, kergesti pestav, raskelt kortsuv, kuid säilitab voldid ja kortsud kui on töödeldud kõrge temperatuuril. Tulega kokkupuutel kiud sulab, tõmbub kokku ning eritab musta suitsu. Toodetud polüestri kiud ning nende tihe struktuur varieeruvad lähtuvalt töötusprotsessist. Mõjutatavad kohad on kiu keerutamise protsessi kiirus, venitamise protsess, kiu stressist vabastamine peale stressorit. (Hossain S. , 2022)

1.3.3 Anorgaanilised polümeerid

Anorgaanilistest polümeeridest koosnevad sünteetilised tekstiilmaterjalideks loetakse klaasi, metalli, süsinikkiud ning ka keraamika. Antud kiude harrastatakse siduda plastidega komposiitmaterjalide moodustamiseks. (European Association for Textile Polyolefins, 2021)

1.4 Tekstiiljätmed

Antud töös käsitletakse tekstiiljätmeid kui kodumajapidamises tekkinud jäätmegrupp koodiga 20 kui ka jäätmegrupp koodiga 04 leiduvaid tekstiiljätmeid, mis hõlmavad nii naha-, karusnaha- ja tekstiilitööstuse jätmeid. Samuti kuuluvad statistiliste andmete hulka ka 15 grupp koodiga tekstiilpakendid kui ka 19 grupp koodiga tekstiilid, mis kuuluvad mehaanilise töötlemise jääkide hulka. (Riigi Teataja, 2021)

Tekstiiljätmete taaskasutamise ja ringlussevõtu kohta on teostatud mitmeid uuringuid, mis on muutnud antud teema üheks populaarseimaks. Ligikaudu 57% uuringutest keskenduvad kiudude ringlussevõtule, 37% keskenduvad polümeeride ringlussevõtule, 29% monomeeride ringlussevõtule ning 14% tekstiilide ringlussevõtule. Kõige populaarsemalt on uuritud puuvilla ning polüestrit. Uuringud toetavad rohkem tekstiilide taaskasutust kui ringlussevõttu. Siiski võivad antud viisid keskkonnale kurnavaks muutuda, kuna materjali ringlemiseks rakendatakse transporti ja juba kord kasutatud materjal võib olla madalama kvaliteediga. (Sandin & Peters, 2018)

Eestis toimub liigiti kogutud tekstiilude ja rõivaste sorteerimine kvaliteedi järgi, millest kõrgema kvaliteediga osa müüakse korduskasutusettevõtetele (584 tonni aastas) ning madalama kvaliteediga, kuid korduskasutatavad (97 tonni aastas) tekstiilid ja rõivad annetatakse abi vajavatele asutustele või mittetulundusühingutele. (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020) Korralike ja tervete tekstiiljätmete kogumiseks välja töödeldud kogumissüsteem on Eestis vaid suuremates linnades (Kivisoo, 2020).

Uuringud on näidanud, et jäätmete suunamine ringlussevõtuks on eelistatud just selle mõjule kliimale. Jäätmete suunamist taaskasutuse eesmärgil peetakse otstarbekaks suunata jätmeid energia tootmiseks, et vähendada prügilasse ladestamist. (Keskkonnaamet, 2022). Jäätmehierarhia üheks eesmärgiks on eelkõige edendada jäätmetekke vältimist või vähendamist kui ka jäätmete taaskasutamist ning kasutamist energiaallikana. (Euroopa Liidu Teataja, 2018)

Jäätmeseaduses on jäätmed jäätmenimistu alusel liigitatud jäätmekoodideks, mille tulemusel saab määrata tekstiiljätmeid selle päritolu järgi. Eristada on võimalik kogumajapidamises (s.h. samalaadsed kaubandus-, tööstus- ja ametiasutusjäätmed k.a. liigiti kogutud jäätmed) tekkinud jäätmed või tekstiilitööstusjäätmed. (Riigi Teataja, 2019) Tekstiiljätmed on üks jäätmeliikidest, mida tuleb sorteerida eraldi selle tekkekohas (Riigi Teataja, 2023). Vastavalt „Olmejäätmete liigiti kogumise ja sortimise nõuded ja kord sorditud jäätmete liigitamise alused“ määrusele on jäätmejaamad kohustatud tekstiiljätmeid koguma eraldi, kuid ei ole kohustatud koguma rõivaid jäätmekoodiga 20 01 10 ning tekstiile jäätmekoodiga 20 01 11 eraldi koguma (Riigi Teataja, 2022). Vastavalt kehtivale jäätmeseadusele peab jäätmevaldaja andma tema valduses olevad jäätmed üle selleks õigust omavale isikule (Riigi Teataja, 2023).

Tänapäevane riiete tarbimine on kujunenud kulutavaks ja saastavaks süsteemiks, kus tooted läbivad lühikese eluea, kuini selle tarbimisest loobutakse. Hinnanguliselt üle poolte kiirmoe toodetust tarbitakse vähem kui aasta ning kõrvaldatakse. (Ellen MacArthur Foundation, 2017) Eestis tekkis 2021 aastal ligikaudu 2265 t liigiti kogutud rõiva- ja tekstiiljätmeid (Keskkonnaagentuur, 2022). Balti riikide kohta teostatud uuringus tuuakse välja, et eraldi kogutud tekstiilid ei taga tekstiilide taasringluse, sest ligikaudu 42% eraldi kogutud tekstiilid võivad lõppeda kas ladustatuna prügimäel või põletusse suunatuna (Nordic Council of Ministers, 2020).

Stockholmi keskkonnainstituudi poolt teostatud uuringu analüüsi tulemuste kohaselt koguti 2018. a. Eestis rõiva- ja tekstiiljätmeid liigiti 25 jäätmejaamas. Lisaks on võimalik jäätmejaama pinnal võimalik koguda korduskasutatavaid tekstiiljätmeid, mille konteinereid opereerivad korduskasutusorganisatsioonid ning mille tulemusi jäätmejaamade aruandluses ei kajastu. (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020)

Stockholmi keskkonnainstituudi poolt teostatud uuringus kogutud andmete põhjal võib märkida, et kokku tarbiti Eestis 2018. aastal ligikaudu 19 530 t tekstiilmaterjale (rõivaste kujul kui ka tekstiilina, sh 16% kasutatud). Korduskasutusorganisatsioonid kogusid 2018. aastal kasutatud rõivastest ja tekstiilidest 61% kogu liigiti kogutud tekstiiljätmetest, jäätmejaamad 37% ning hinnanguliselt 2% kasutatud tekstiilidest

koguvad brändid valitud kogumissüsteemi kaudu. (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020)

Rõiva- ja tekstiilivoode uuringus on toodud välja, et 2018. aastal koguti korduskasutussektori poolt hinnanguliselt 3065 t tekstiiljätmeid, millest 58% eksporditi, vaid 22% korduskasutati riigisiselt ning 20% kas ladustati või põletati. Antud juhul 20% hulka kuuluvad korduskasutuseks kõlbmatu materjal ning muut materjalid, mis on kogumiskonteineritesse sattunud. (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020)

Alates 2020. aastast suureneb iga 5 aasta järel taaskasutatavate kodumajapidamisest pärinevate paberi-, metalli-, plasti- ja klaasijätmete ja võimaluse korral muudest allikatest pärinevate samalaadsete jätmete korduskasutuse osakaalu eesmärk kogumassist 5%, kuhu kuuluvad ka tekstiiljätmed. See tähendab, et 2025. a eesmärgiks on korduskasutuse osakaal 55%, 2030. a on see 60% ja 2035. a on see 65%. (Keskkonnaministeerium, 2023) Selle saavutamiseks on võtnud EL jätmedirektiiv (Waste Directive, lühidalt WFD9) eesmärgiks rakendada liikmesriikidele kohustuseks rõivaste ja tekstiilide (sh tekstiiljätmete) liigiti kogumise 01.01.2025 (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020).

Kuna jätmejaamadesse toodav tekstiiljääde ei pruugi olla kvaliteedi poolt korduvkasutatav, need on määratud ning riknenud siis käideldakse neid vastavalt segaolmejäätmetena (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020). Ehk need liigitatakse jätmete alla, mida ei ole liigiti kogutud või mis ei sobi liigiti kogumiseks (Keskkonnaministeerium, 2021). Jätmejaamas kogutud tekstiiljätmeid ei sorteerita isegi kui materjali hulgast võib leida ka korduskasutatavat materjali, kuna Eesti puuduvad võimalused neid ringlussevõtuks üle anda. Kohalikud omavalitsused täidavad neile määratud kohustusi tagada rõivaste ning tekstiilide eraldi kogumise nõuet, kuid nende käitlus sõltub jätmejaama haldajast. (Martin, Moora, Hvass, & Watson, 2020)

Tänapäeval on tuntuimaks ringlussevõtu tehnoloogiaks keemiline ja mehhaaniline ringlussevõtt. Sobivaim tehnoloogia valitakse välja sõltuvalt tekstiilide kiulisest koostisest. Keemilist ringlussevõttu rakendatakse enamjaolt sünteetiliste kiudude puhul või segakiuliste tekstiilide puhul, mis sisaldab sünteetilist ja looduslikku kiudu, kuna

protsess toimub molekulaarsel tasemel ning toimub lähteaine polümeriseerimine. (Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor, 2023)

Lihtsamaiks tekstiilide ümbertöötlemise viisiks peetakse mehhaanilist töötlemist, mille puhul tekstiil viiakse tagasi kiulisele vormile, millest on võimalik toota uus lõng või muu materjal. Antud protsessi käigus võib kiud saada tugevalt viga, mille tuttu kiu kvaliteet langeb. „Kiu kvaliteet langeb purustamise käigus enam just segakiulistel materjalidel, sest erineva koostisega rõivaste kiustamine purustusliinil ei toimu ühtlaselt. Iga tsükliga saadakse purustamisel lühemad ja hapramad kiud, mis piirab nende edasisi kasutusvõimalusi.“ (Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor, 2023)



Joonis 1.4 Tekstiiljätmete käitlusetapid enne purustamist ja kiustamist (Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor, 2023)

Joonisel (vt. Joonis 1.4) on välja toodud vajalikud etapid, enne, kui kiustmaterjali saab taaskasutama hakata. Enne eemaldatakse kõik taaskasutamist raskendavad detailid või elemendid, samuti sorteeritakse materjalide hulgast ebasobilik, milleks võivad olla metallist või muust materjalist objektid, trükised või värvainega koos olevad tekstiiliosad. (Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor, 2023)

Tekstiiljätmeid võidakse kasutada ka jäätmekütusena (*RDF-Refuse Derived Fuel*). Erinevaid tööstuslikke jäätmeid kasutatakse kui sekundaarsete kütustena, mida lisatakse primaarsele kütusele ning suunatakse põletusprotsessi. Nende hulka kuuluvad ka tekstiilijätmed. (Keskkonnaamet, 2022). Tekstiiljätmed, kui ka teisi sekundaarse (alternatiivse) kütusena kasutatavaid jäätmeid segatakse tihtipeale kokku kõrge kütteväärtusega jäätmetega (Wasilewski, 2013).

Keskkonnaagentuuri poolt koostatud jäätmete ringlussevõtu võimekuse analüüsis toodi välja, et 2021. aastal sorteeriti Eestis segaolmejäätmetest välja ca 18 390 tonni tekstiilijätmeid ning liigiti kogutud tekstiilijätmeid tekkis ca 4 190 tonni. Eestis tekkis

kokku 22 580 t tekstiilijäätmeid ning imporditi välismaalt 131 t tekstiiljäätmeid, millest käideldi ligikaudu 20%. Käideldud tekstiiljäätmetest 3% vaheladustati, ca 22% eksporditi, 42% ladestati liigi, alla 1% tekkinud tekstiiljäätmetest on määratlemata käitlusega ning taaskasutati 30,2%. Keskkonnaagentuuri kokku võetud 2016-2021 aruannetest põletati antud perioodil vaid 65 t, 1222 t tekstiiljäätmetest sorteeriti ja jäätmesegude valmistamiseks suunati 1546 t tekstiiljäätmeid. Jäätmelubade järgi oleks Eestis olnud sellel perioodil võimalik põletada 2000 t tekstiiljäätmeid, millest kasutati ära ligikaudu 3,25% kogu võimekusest. Tekstiiljäätmeid suunati jäätmesegu valmistamiseks vaid 0,5% (ligikaudu 160 t) kogu võimekusest (319 590 t). (Raudik, Rohtmets, & Taraskin, 2023)

Statistikaameti andmetel on jäätmekütusest saadava energia tarbimine kõikunud tegevusala järgi (vt Tabel 1.1). Jäätmekütusena tarvitusele võetud kogused on olnud tõusude ja mõõnadega. Kuid sellegi poolest on tegemist suuremal osal kütusega, mida on kasutatud enamjaolt elektrienergia-, auru- ja kuumaveevarustuse tootmiseks. Aastatel 2015-2016 kasutati ligikaudu 84-88% jäätmekütust antud eesmärgil. Vahemikus 2017-2018. langes antud osakaal alla 80% ning alates 2019 on see jällegi tõusuteel. Nimelt 2021. aastal tõusis jäätmekütuse elektrienergia-, auru- ja kuumaveevarustuseks tarvitatav osakaal 99 protsendini. Ülejäänud osa jäätmekütusest saadud energia rakendatakse jäätmetöötluses ning muude mittemetallsetest mineraalidest toodete tootmises. (Statistikaamet, 2021)

Tabel 1.1 Jäätmekütus tarbimise osakaal elektrienergia-, auru- ja kuumaveevarustuse ning jäätmetöötluse eesmärgil aastatel 2015-2020 (Statistikaamet, 2021)

Jäätmekütuse tarbimine (tuhat t)/a	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Kokku (tuhat t)	292,7	490,7	312,6	297,7	292	252,3	242,1
Elektrienergia-, auru- ja kuumaveevarustus	244,6	432,0	236,0	232,9	237,0	243,3	240,0
Jäätmetöötlus	2,0	1,9	2,0	2,2	2,4	2,2	2,1
Elektrienergia-, auru- ja kuumaveevarustuse osakaal	84%	88%	75%	78%	81%	96%	99%

Eestis tegeleb jäätmete põletamisega kaks ettevõtet, kus põletavate jäätmete hulka kuuluvad ka tekstiilijäätmed: aktsiaselts Epler ja Lorenz Lõuna-Eesti ohtlike jäätmete

käitluskeskus (Keskkonnaamet, 2022) ning Enefit Green AS Iru elektrijaam (Keskkonnaamet, 2022).

Aastal 2021 on segaolmejäätmete osakaal jäätmete põletuses langenud 237,490 t aastas. Jäätmepõletusbloki aastane koguvõimsus põletamiseks on 260 000 t jäätmeid. (Enefit Green AS, 2022) Erinevad jäätmeliigid võidakse kokku segada või purustada enne põletust, mille kaudu kontrollitakse jäätmete etteandekiirust, koostist ning temperatuuri põlemisprotsessis, et tagada optimeeritud põletusprotsess (Keskkonnaamet, 2023).

Tekstiilide põletamisega väheneb prügilasse ladestamise koormus, mille puhul jäetakse kasutamata tekstiiljäätmetest toodetav energia. Samuti kaasnevad ladestamisega kulud, mis sisaldavad ka transporti. Veelgi aitab see vähendada fossiilkütuste kasutamist energiaallikana. Samuti on see üheks tõhusaks viisiks kasutada ära tekstiilmaterjale, mida ei ole võimalik enam taaskasutada ega ringlusse võtta. (Nunes, Godina, Matias, & Catalão, 2018) Tekstiiljäätmetest välja sorteeritud materjali, mis on saastunud ning mida ei ole võimalik enam ringlusse võtta tuleks kasutuselt kõrvaldada suunates põletusse energiatootmise eesmärgil (Weber, Weber, Habib, & Dias, 2022).

1.5 Kütteväärtus

Kütteväärtus ehk kütuse eripõlemissoojus on soojushulk, mis eraldub ühe massi või mahuühiku tahke-, vedel- või gaaskütuse täielikul põlemisel. Kütteväärtust iseloomustavad neto ja bruto kütteväärtus. Bruto kütteväärtuse puhul arvestatakse, et põlemisprotsessi käigus eralduv vesi muutub veeauruks ning millest eraldub energia, mis kandub edasi soojuskandjale. Neto kütteväärtuse puhul arvestatakse, et kondenseerunud vesi ei kandu edasi soojuskandjale vaid jääb veeauruks. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2020)

Enefit Green AS 2020. aasta Keskkonnaaruande andmetel varieerub Iru elektrijaama olmejäätmete kütteväärtus vahemikus 9,3 – 10,5 MJ/kg. (Enefit Green AS, 2021) AS Epler ja Lorenz analüüsiprotokolli järgi on RDF ehk jäätmekütuse proovi kütteväärtuseks 20,68 MJ/kg (vt Lisa 2) (AS Epler & Lorenz, 2021).

Tabel 1.2 Põlevate materjalide ligikaudsed kütteväärtused (Igniss energy, 2023) (Serviceprojekt, 2021)

Materjali tüüp	Kütteväärtus (MJ/kg)
Linoleum, polüvinüülkloriid (PVC)	14,3
Vildi baasil PVC linoleum	16,6
Polüuretaanvaht	24,3
Olmejäätmed	7-16
Kunstnahk	21,5
Plastik (PVC)	41
Kuiv puit	14,4
Papp ja paber	16,5-17,6
Bensiin ja diiseli	45-47
Nailon	31,1
Puuvill	17,5
Vill ja villakiud	23,1

1.6 Tuhasus

Kuna kütus koosneb niiskusest ning põlev- ja mineraalsest mitte põlevast osast siis tahkekütuse kütteväärtus on mõjutatud tuhasisaldusest. Tegemist on anorgaanilise jäätmega, mis jääb pärast põletusprotsessi alles. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2020). Kõrge tuhasisaldus võib põhjustada koldes selle šlakistumist ja pindadel sadestiste tekkimist (Vares, Kask, Muiste, Pihu, & Soosaar, 2005).

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1 Katse materjal

Antud magistritöö eesmärgiks oli uurida, millised tekstiilmaterjalid on energiatoodangu poolest kõige suurema kütteväärtusega ning kuidas tekstiilmaterjalide eraldamine jäätmetest tõhustaks energiatoodangut jäätmete põletamisel. Nende eesmärkide täitmiseks viidi läbi järgmised laboratoorsed katsed: kalorimeetriselised mõõtmised, tuhasuse määramine ning niiskusesisalduse määramine proovidest.

Autor on võtnud vaatluse alla 13 erinevat tekstiilmaterjali. Materjalid on jaotatud vastavalt materjali koostisele: loodusliku kiukoostisega, sünteetilise kiukoostisega ning ka segakiulised materjalid (vt Tabel 2.1). Materjalid hangiti *Abakhan Fabrics* kangakauplusest, kus oli iga kanga kohta välja toodud ka tootja poolt kinnitatud informatsioon koostisest või autori isiklikust kogust, mille koostise informatsioon oli tootjal välja toodud.

Tabel 2.1 Vaatluse alla võetud tekstiilmaterjalid koos koostisega

Looduslikud tekstiilmaterjalid	Sünteetilised tekstiilmaterjalid	Segakiulised tekstiilmaterjalid
vill (100%)	viskoos (100%)	teksas (98% puuvill, 2% elastaan)
puuvill (100%)	kunstnahk (100% PVC ehk polüvinüülkloriid)	teksas (70% puuvill, 26% polüester, 4% elastaan)
siid (100%)	fliis (100% polüester)	lükra (20% elastaan, 80% nailon)
lina (100%)	polüester (100%)	
nahk (100%)	samet (100% polüester)	

2.2 Katse metoodika

Töö käigus viis autor läbi laboratoorse katsed Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis asuvas laboris. Iga materjaliproov läbis katsetes tuhasuse ja kuivaine sisalduse määramise ning kalorimeetrilised mõõtmised. Materjali on võimalik põletada masinas kas tükina või tabletikokku surutuna, sõltuvalt proovi füüsilisest omadusest. Katses kasutatavad materjalid hoiustati toatemperatuuril ning suletud anumades enne katse teostamist. Tableti kujul kokku pressitud materjal aitab vältida põlemata materjali väljumist põlemiskolvist, mis omakorda võib mõjutada katse tulemust (DDS Calorimeters, 2022). Katsete jaoks valmistab autor ette proovitükid materjalidest, kus tekstiilmaterjal tükeldati ligikaudu 5-10 mm² tükikesteks. Kuna tegemist on tekstiilmaterjaliga, mida on raske tableti kujul kokku pressida ning materjalide vahel esines suuri kaaluvahesid, siis pidas autor õigeks kasutada proovideks lõigatud kujul materjali.

Selgitamaks hetkel Eestis tekkivate tekstiiljäätmete kasutust/taaskasutust, kasutati selles töös nii infot Jäätmearuandluse Infosüsteemi (JATS) kui ka keskkonnaotsuste infosüsteemi (KOTKAS). KOTKAS keskkonnaotsuste infosüsteemist leiab informatsiooni ettevõtete kohta, kellel on keskkonnakaitselubades välja toodud käideldavad jäätmed ning nende taaskasutuskoodid.

Antud töös tekstiiljäätmete taaskasutuse ülevaateks keskendutakse taaskasutuskoodidele, mille alla kuuluvad koodid R1 (Riigi Teataja, 2021) - jäätmete kasutamine peamiselt kütusena või energiaallikana muul viisil, millele autor keskendub, et tuua välja jäätmekäitlejad, kelle keskkonnakaitselubades on välja toodud tekstiiljäätmete põletamine. Taaskasutuskoodiga R12x (Riigi Teataja, 2021) - taaskasutamisele eelnev jäätmesegude koostamine või jäätmete segamine, et tuua välja jäätmekäitlejad, kelle keskkonnaloas on välja toodud jäätmekütuse valmistamine.

2.2.1 Kalorimeetrilised mõõtmised

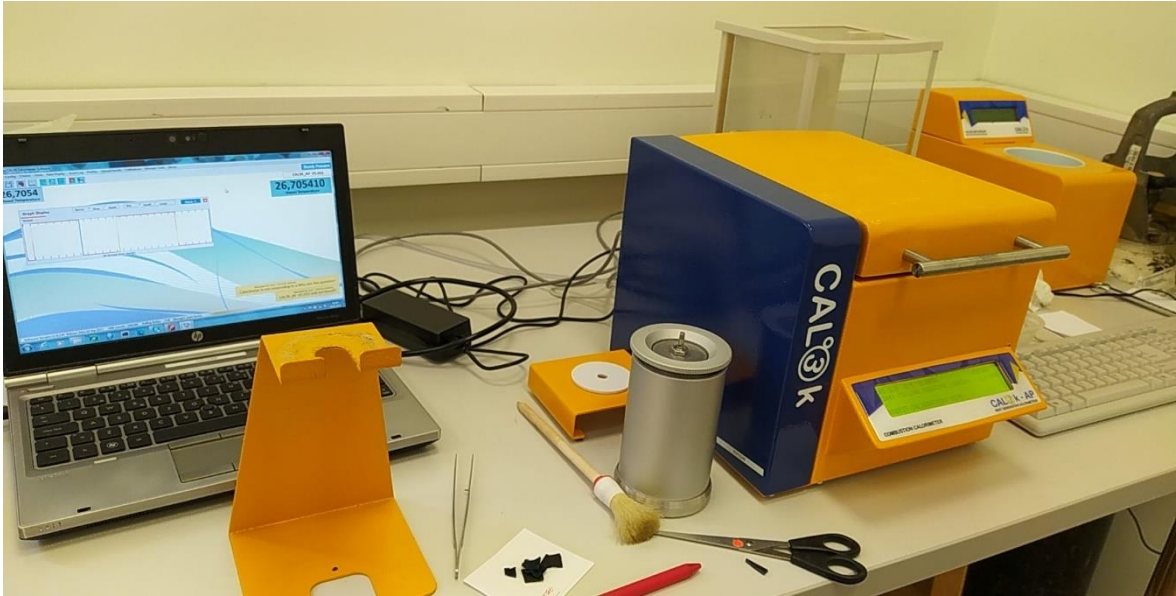
Katse käigus mõõdeti CAL3K-AP *Oxygen Bomb* kalorimeetri abil erinevate tekstiilmaterjalide põletamisel eralduvat energiahulka ehk kütteväärtust (MJ/kg). (DDS Calorimeters, 2022). Katse jaoks läks tarvis igast materjali vähemalt 0,2g proovi ühe

mõõtmise kohta. Antud katsematerjalide kaal on valitud materjali omaduste, Euroopa tahkekütuste standardist (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2021d) ning tootjapoolsest juhendmaterjalist (DDS Calorimeters, 2022) lähtudes, et katsematerjal ei väljuks tiiglist. Enne katsematerjali esimest mõõtmist ja peale masina esmakordset käivitamist teostati kalibratsioon bensoehappega (C_6H_5COOH) 0,5g. Iga katsega tehti vähemalt kaks korduskatset. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2021d)

Enne materjali asetust tiiglisse toimus puuvillase niidi paigutamine ümber süüetraadi, et niidi otsad jääksid tiigli põhja ja materjali paigutamine tiiglisse tagaks niidi ja materjali kontakti. Iga materjal kaaluti enne, kui see asetati pintsettidega kalorimeetrilise pommi tiiglisse. Seejärel suleti pomm ning asetati õhkjahutisse, kus pomm jahutati vajaliku temperatuurini 8 °C (Digital Data Systems (Pty) Ltd., 2016). Sellele järgnes kalorimeetrilise pommi asetamine kalorimeetrisse ning kaane sulgemine. Klaviatuuriga sisestati katsematerjali kaal ning käivitati põletusprotsess. Automaatselt toimub ka hapniku rõhu jälgimine, et see ei ületaks juhendmaterjalis välja toodud maksimaalset piiri. Kui põlemisprotsess toimus, toodi ekraanile välja saadud tulemused. Seejärel eemaldati pomm kalorimeetrist ning asetati õhkjahutisse, kus toimus pommi jahutamine vajaliku temperatuurini.

Kui põlemisprotsessi ei toimunud, tekkis ekraanile ebaõnnestumise põhjus ning kalorimeeter avas kaane. Põlemisprotsessi ebaõnnestumise põhjuseks oli kas niidi kontakti katkemine katsematerjaliga või ei olnud kalorimeetriline pomm täielikult suletud asendis, mille tõttu ekraanil oli näha, et hapniku rõhk ei tõusnud. Mõlemal juhul oli võimalik teha korduskatse, kus katsematerjal jäi samaks, kas kohendati materjali asetust tiiglis või kombiti kalorimeetrilist pommi, mille tulemusel toimus pommi täielik sulgemine.

Saadud tulemused tuuakse välja brutokütteväärtusena ehk pommkütteväärtusena (qV, gr, m) (vt Lisa 1 Tabel 0.1), mis sisaldavad nii niiskust kui ka tuhka.



Joonis 2.1 Katse läbiviimine

2.2.2 Kuivaine määramine

Kuivaine sisalduse määramiseks määrati proovi algkaal, kasutades kaalu *Mettler* PC 440. Igat materjali kaaluti ligikaudu 1,0 g (täpsusega 0,1 mg) sõltuvalt materjali omadusest. Peale kaalumist tõsteti proovid kuivatuskappi 24 tunniks 105 °C juures. Peale antud protsessi materjal jahutati eksikaatoris ning toimus materjali järjekordne kaalumine. Kuivaine sisalduse arvutamiseks jagati materjali mass pärast kuivamist materjali massiga enne kuivamist ning protsendilise väärtuse saamiseks korrutati sajaga. $\left(\frac{\text{materjal peale kuivamist (g)}}{\text{materjal enne kuivamist (g)}} * 100 \right)$ (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2021c)

2.2.3 Tuhasuse määramine

Tuhasuse määramiseks kasutati muhvelahju *Linn High Therm* mudel LM-112, mille tulemusel saadi teada katse läbinud materjali tuhasus ehk tuha sisaldus põlenud materjalist. Enne materjali asetust portselanist tiiglitesse teostati tiiglite algkaalumine. Alusele lisati kaalutud materjal, ligikaudu 0,5 g (täpsusega 0,001 g). Tuhasuse mõõtmisel põletati proovid muhvelahjus neli tundi 525 °C juures. Igale katsele tehti korduskatse. Peale proovide eemaldamist ahjust teostati selle järjekordne kaalumine,

mille tulemusest arvutati maha tiiglite kaal ning saadi tulemuseks tuha kaal. Tuha kaalu andmete põhjal arvutati tuha protsent valemiga $\left(\frac{\text{tuha kaal (g)}}{\text{materjali algkaal (g)}} * 100\%\right)$ (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2021b).

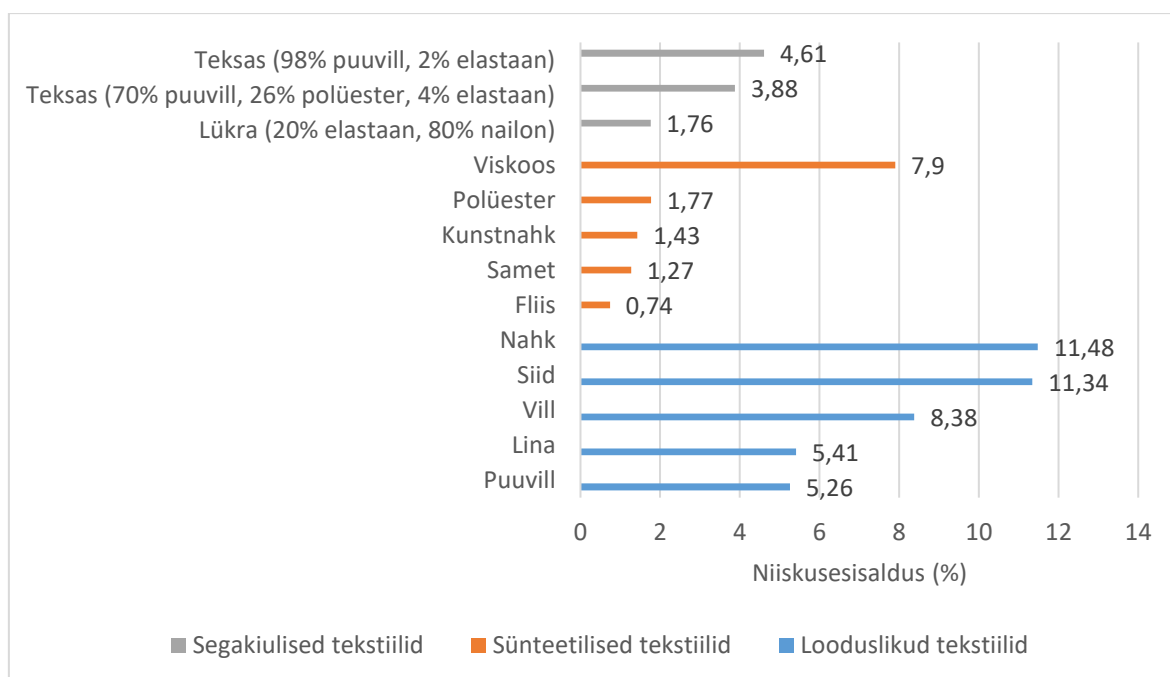
2.2.4 Kütteväärtuse määramine

Antud töös on kalorsuse määramise katse tulemusena välja toodud tekstiilmaterjalide brutokütteväärtused (MJ/kg), mis sisaldavad nii tuhka kui ka niiskust. Tekstiilmaterjalide neto kütteväärtuse arvutamiseks kasutatakse kehtivat standardit võttes arvesse tuha ja niiskusesisalduse (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, 2021d).

3. TULEMUSED

3.1 Niiskusesisaldus uuritavas materjalis

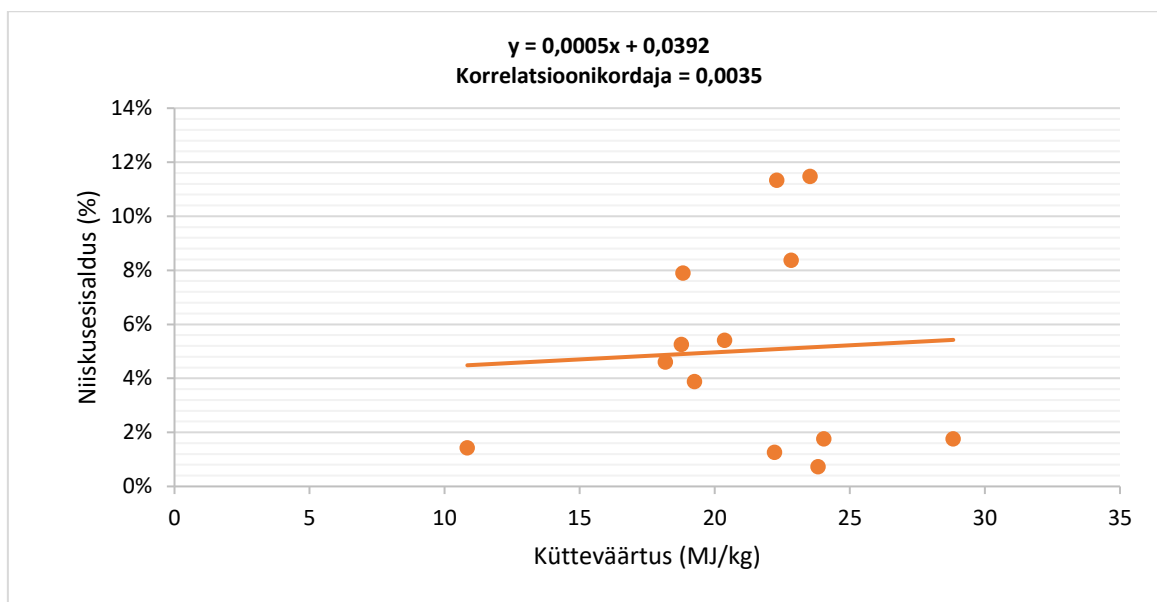
Antud katses on märgatav vahe looduslike materjalide ning sünteetiliste materjalide niiskusesisalduse vahel. Looduslike materjalide niiskusesisaldused jäävad vahemikku 5,26%-11,48%. Sünteetiliste materjalide niiskusesisaldused jäävad vahemikku 0,74%-7,9% ning segakiuliste materjalide niiskusesisaldused jäävad vahemikku 1,76%-4,61%. (vt Joonis 3.1)



Joonis 3.1 Niiskusesisaldus (%) uuritavas materjalis

Looduslikest tekstiilmaterjalides oli kõige madalama niiskusesisaldusega materjal puuvill väärtusega 5,26% ning kõige kõrgema niiskusesisaldusega tekstiilmaterjal oli nahk, mille väärtus osutus 11,48%. Antud vahemikku jäid järgmised tekstiilmaterjalid niiskusesisaldusega kasvavalt: (lina 5,41%; vill 8,38%; siid 11,34%). Sünteetilistest tekstiilmaterjalidest oli kõige madalama niiskusesisaldusega materjal fliis väärtusega 0,74% ning kõige kõrgema niiskusesisaldusega tekstiilmaterjal oli viskoos, mille väärtus osutus 7,9%. Antud vahemikku jäid järgmised tekstiilmaterjalid niiskusesisaldusega kasvavalt: (samet 1,27%; kunstnahk 1,43% ning polüester 1,77%). Segakiuliste tekstiilmaterjalidest kõige madalama niiskusesisaldusega materjal oli lükra, väärtusega

1,76% ning kõige kõrgema niiskusesisaldusega materjal oli suurema loodusliku kiu koostisega teksas, mille väärtuseks oli 4,61%. Ligilähedase niiskusesisaldusega (3,88%) oli ka teine teksamaterjal, mille loodusliku kiu koostis oli protsentuaalselt väiksem. Välja toodud andmed on esitatud Lisas 1 (vt Tabel 0.1)



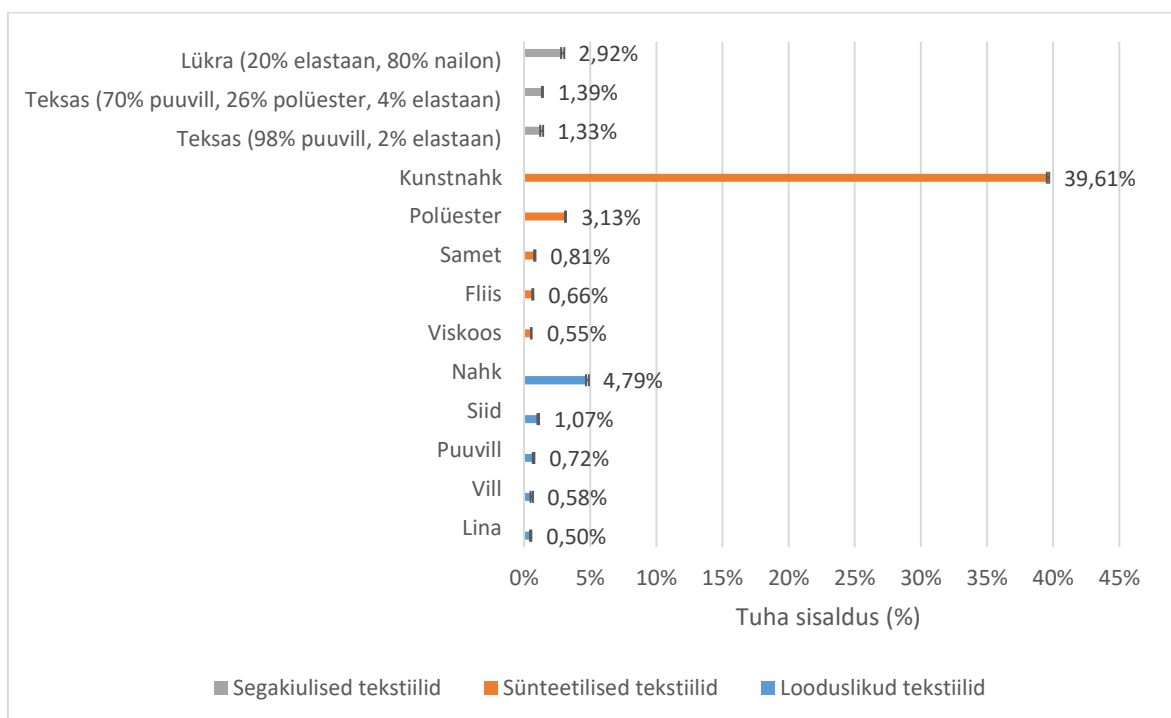
Joonis 3.2 Kütteväärtuse ja niiskuse korrelatsioon

Antud joonis (vt Joonis 3.2) näitab seost niiskusesisalduse tekstiilmaterjalide kütteväärtusega, milleks saadi korrelatsioonikordaja 0,0051 ning see tähendab, et niiskuse ning kütteväärtuse vahel puudub seos. Väga nõrga seose jaoks peaks korrelatsioonikordaja jääma vahemikku 0,1 ja 0,2 vahele, millest saab järeldada, et niiskusesisaldus ja kütteväärtus ei mõjuta üksteist. Jooniselt on näha, et kütteväärtuseid esineb sarnaselt niiskuse kasvades. Antud joonise põhjal võib väita, et niiskuse sisaldused tekstiilmaterjalis on võrdlemisi väikesed, et avaldada mõju kütteväärtusele.

3.2 Tuhasisaldus uuritavas materjalis

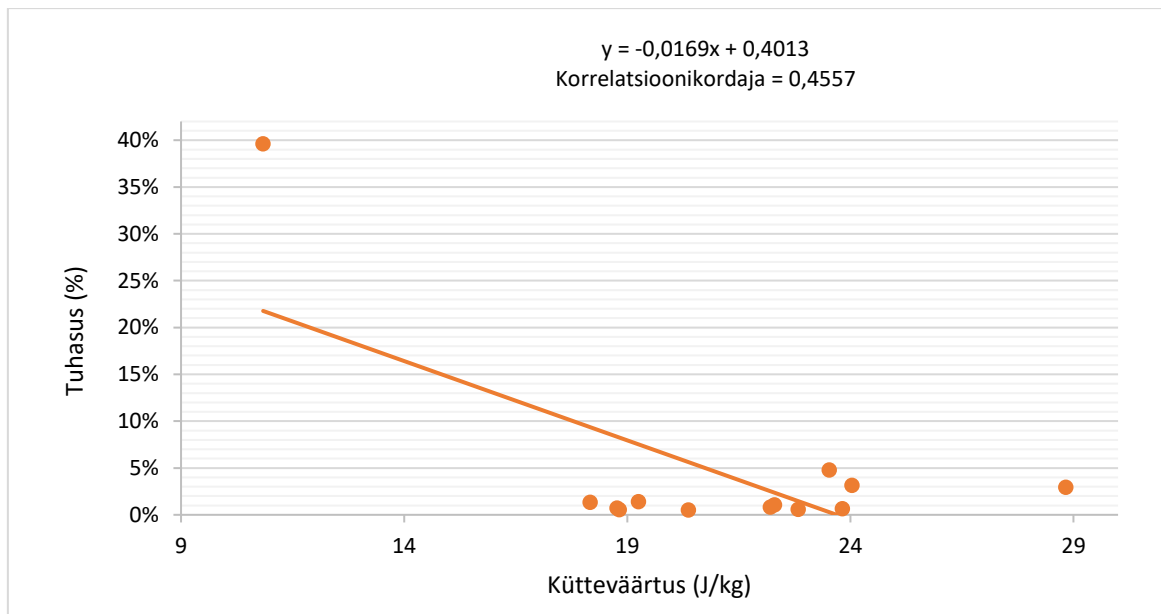
Looduslike tekstiilide tuhasisaldused jäävad vahemikku 0,5-4,79%. Võrreldes neid andmeid sünteetiliste materjalide niiskusesisaldustega, mis jäävad vahemikku 0,55-

39,61% ning segakiuliste materjalidega, mille tuhasisaldused jäävad vahemikku 1,33-2,92% (vt Joonis 3.3).



Joonis 3.3 Tuha sisaldus (%) uuritavas materjalis

Looduslikest tekstiilmaterjalides oli kõige madalama tuhasisaldusega materjal lina väärtusega $0,5 \pm 0,1\%$ ning kõige kõrgema tuhasisaldusega tekstiilmaterjal oli nahk, mille väärtus osutus $4,79 \pm 0,21\%$. Antud vahemikku jäid järgmised tekstiilmaterjalid tuhasisaldusega kasvavalt: (vill $0,58 \pm 0,19\%$; puuvill $0,72 \pm 0,12\%$; siid $1,07 \pm 0,12\%$). Sünteetilistest tekstiilmaterjalidest oli kõige madalama tuhasisaldusega materjal viskoos väärtusega $0,55 \pm 0,02\%$ ning kõige kõrgema tuhasisaldusega tekstiilmaterjal oli kunstnahk, mille väärtus osutus $39,61 \pm 0,18\%$. Antud vahemikku jäid järgmised tekstiilmaterjalid tuhasisaldusega kasvavalt: (fliis $0,66 \pm 0,08\%$; samet $0,88 \pm 0,09\%$ ning polüester $3,13 \pm 0,03\%$). Segakiulistest materjalidest oli kõige kõrgema tuhasisaldusega lükra, väärtusega $2,92 \pm 0,12\%$ ning madalama tuhasisaldusega väärtusega oli teksamaterjal ($1,33 \pm 0,11\%$), mille loodusliku kiu koostis tekstiilis oli protsentuaalselt suurem. Ligilähedase tuhasisaldusega ($1,39 \pm 0,02\%$) oli ka teine teksamaterjal, mille sünteetilise kiu koostis oli protsentuaalselt suurem tekstiilis. Uuritavatest materjalidest olid kõrge tuhasisaldusega materjalid nahk ja kunstnahk. Antud tekstiile iseloomustab tootmisel neile tagatud tule ja kuumakindlus, mille tõttu võivad olla materjalid raskesti põletatavad. Välja toodud andmed on esitatud Lisas 1 (vt Tabel 0.1)



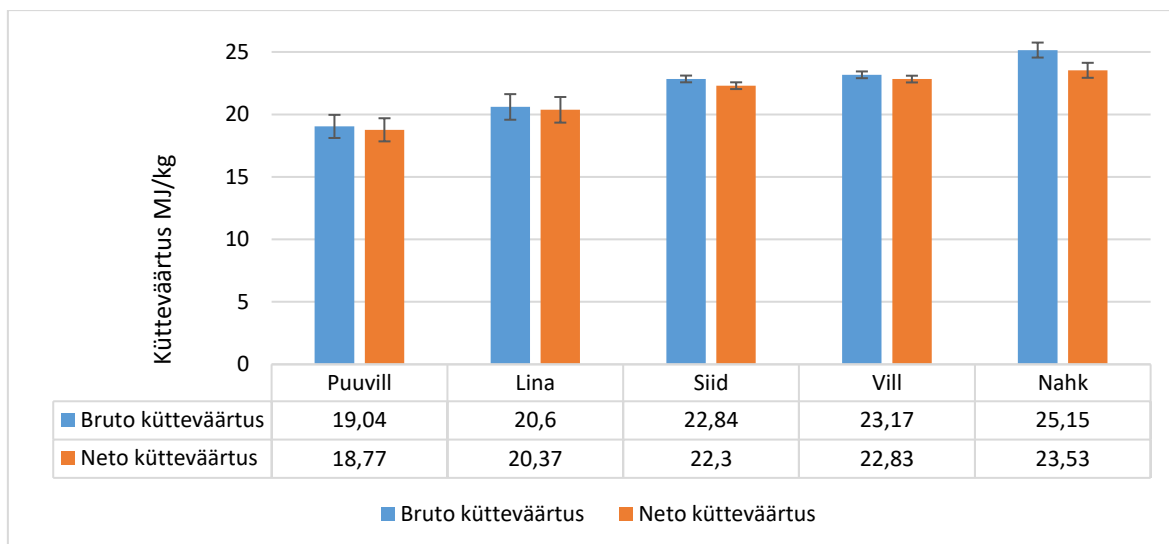
Joonis 3.4 Kütteväärtuse ja tuhasuse korrelatsioon

Joonisel (vt. Joonis 3.4) on välja toodud tuhasuse korrelatsioon kütteväärtusega, milleks saadi korrelatsioonikordaja 0,4557. See jääb 0,3 ja 0,7 vahele, mis tähendab, et seost tuhasuse ja materjalide kütteväärtuste vahel on keskmine. Antud tulemustele toetudes saab väita, et tuhasusest sõltub kütteväärtus. Antud joonise alusel saab väita, et tuha sisaldused olid väiksed, et kütteväärtusi suurel määral mõjutada. Sellegipoolest näeb joonisel ühe materjali kütteväärtuse ja tuha sisalduse vahel on tugev korrelatsioon, et kõrge tuhasisalduse puhul langeb materjali kütteväärtus. Kõrgemate kütteväärtuste puhul oli tuhasuse sisaldus 0% ja 5% vahel ning kõige madalam kütteväärtus oli kõige suurema tuhasuse (40%) puhul.

3.3 Kütteväärtused uuritavas materjalis

3.3.1 Looduslike tekstiilmaterjalide kütteväärtus

Looduslike materjalide kütteväärtuse määramisel selgunud bruto kütteväärtused jäävad vahemikku 19,04-25,15 MJ/kg ning neto kütteväärtused jäävad vahemikku 18,77 – 23,53 MJ/kg.

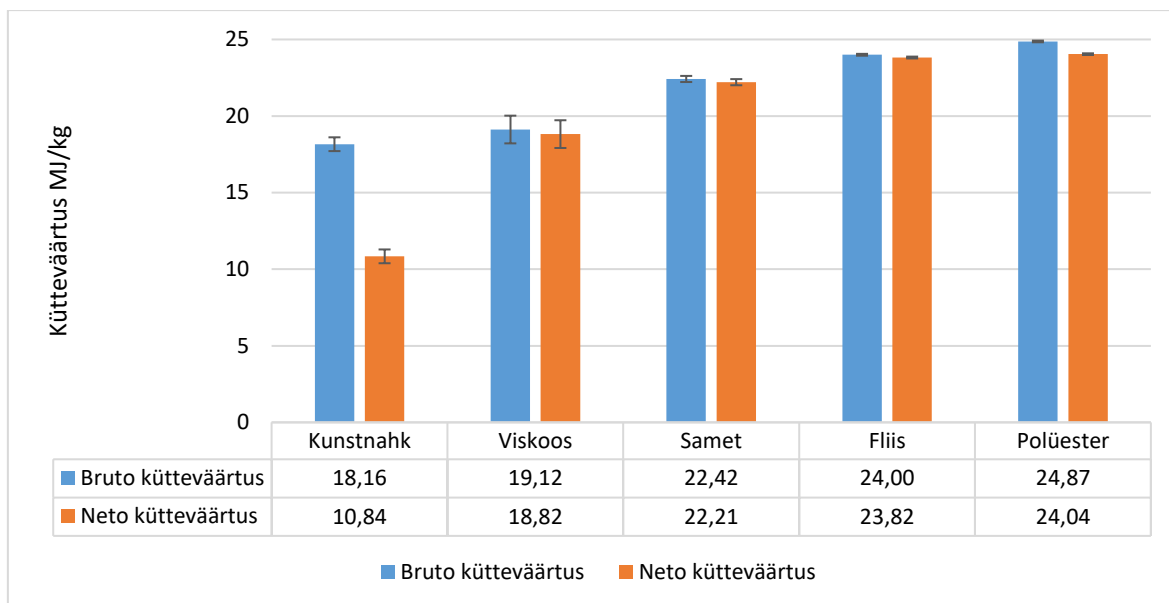


Joonis 3.5 Looduslike tekstiilmaterjalide bruto ning neto kütteväärtused

Looduslikest tekstiilmaterjalides oli kõige madalama kütteväärtusega materjal puuvill väärtusega $18,77 \pm 1,85$ MJ/kg. Kõige kõrgema kütteväärtusega tekstiilmaterjal oli nahk väärtusega $23,53 \pm 1,2$ MJ/kg, mille põhjuseks võis olla tekstiili valguline koostis. Loodusliku naha bruto ja neto kütteväärtuste suurem vahe võrreldes teiste looduslike kiududest koosnevate tekstiilidega võis tuleneda tekstiili suurest niiskuse- ja tuhasisaldusest. Antud vahemikku jäid järgmiste tekstiilmaterjalide kütteväärtused kasvavalt: (lina $20,37 \pm 2,05$ MJ/kg; vill $22,83 \pm 0,54$ MJ/kg; siid $22,3 \pm 0,54$ MJ/kg). Joonisel on märgata, et valgulise koostisega tekstiilide puhul on kütteväärtus kõrgem kui tselluloosilikudel põhinevatel tekstiilidel. Samuti on märgata loodusliku naha bruto ja neto väärtuste suur vahe, mis on mõjutatud suuresti suuremast tuha- ja niiskusesisaldusest võrreldes teiste looduslike tekstiilmaterjalidega.

3.3.2 Sünteetiliste tekstiilmaterjalide kütteväärtused

Sünteetiliste materjalide kütteväärtuste määramisel selgunud bruto kütteväärtused jäävad vahemikku 18,16-24,87 MJ/kg neto kütteväärtused jäävad vahemikku 10,84-24,04 MJ/kg (vt Joonis 3.6).

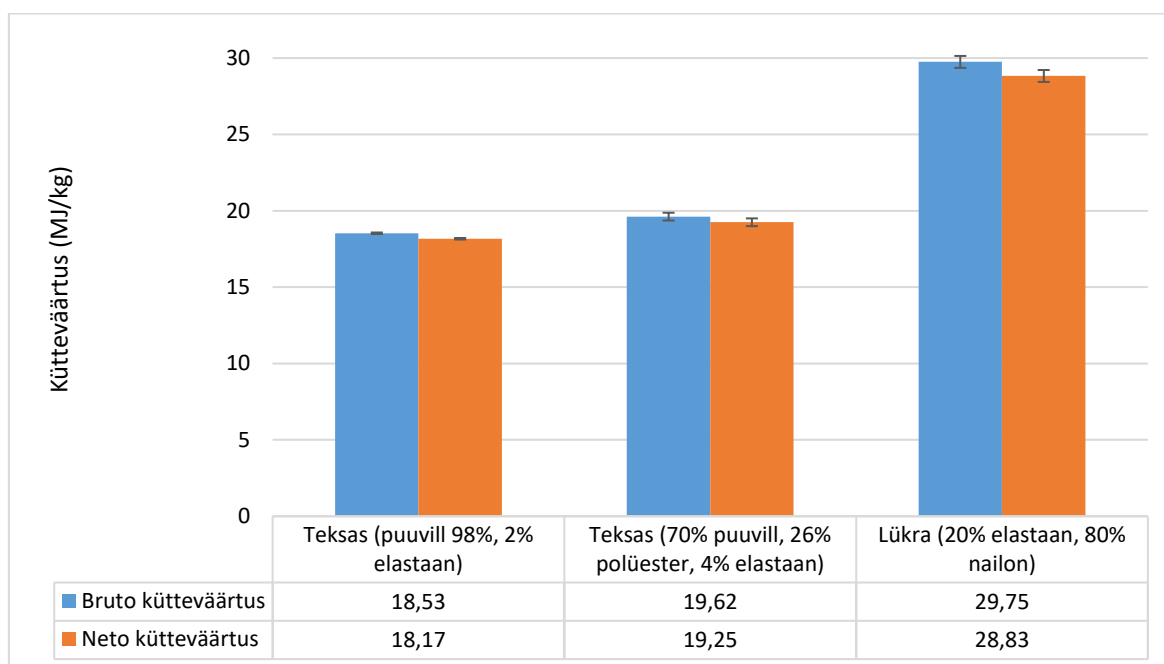


Joonis 3.6 Sünteetiliste tekstiilmaterjalide bruto ja neto kütteväärtused

Sünteetilistest tekstiilmaterjalidest oli kõige madalama kütteväärtusega materjal kunstnahk $10,84 \pm 0,9$ MJ/kg, ning kõige kõrgema kütteväärtusega tekstiilmaterjal oli polüester, mille väärtusega $24,04 \pm 0,055$ MJ/kg. Antud vahemikku jäid järgmised tekstiilmaterjalid kütteväärtusega kasvavalt: viskoos väärtusega $18,82 \pm 1,81$ MJ/kg; samet $22,21 \pm 0,4$ MJ/kg ning fliis $23,82 \pm 0,12$ MJ/kg. Tulemustest võib märgata, et bruto ning neto kütteväärtuste vahel suuri kõikumisi ei ole, välja arvatud kunstnahk.

Kunstnaha bruto ning neto kütteväärtuste suureks erinevuse põhjuseks on kõrge tuhasisaldus põletatavas materjalis. Madalaima kütteväärtusega kunstnahk on polüvinüülkloriidil (PVC) põhinev materjal ning omab mingil määral tulekindlat omadust ning selle keemilise koostise tõttu see ei põle vaid laguneb kõrgel temperatuuril, mis võib olla madala kütteväärtuse põhjuseks. Samuti tuleb tulemustest välja, et fliis ja samet, mille koostiseks on 100% polüesterkiud, on ligilähedase kütteväärtusega. Nende kahe tekstiili kütteväärtuse vahe on vaid $1,61$ MJ/kg, mis võib olla tingitud niiskuse sisalduse ning tuhasisalduse erinevustest. Fliisi tuhasisaldus on väiksem ja niiskusesisaldus suurem kui sametil, mille tulemusel on fliisi kütteväärtus kõrgem. Antud tulemustest võib järeldada ka, et polüesterkiudu sisaldavatel tekstiilidel on kõrgem kütteväärtus kui viskoosil, kuna viskoos põhineb looduslikul polümeeril, milleks on tselluloos. Viskoosil on küll madal tuhasuse protsent kuid teiste sünteetiliste tekstiilidega võrdlemisi suur niiskusesisaldus.

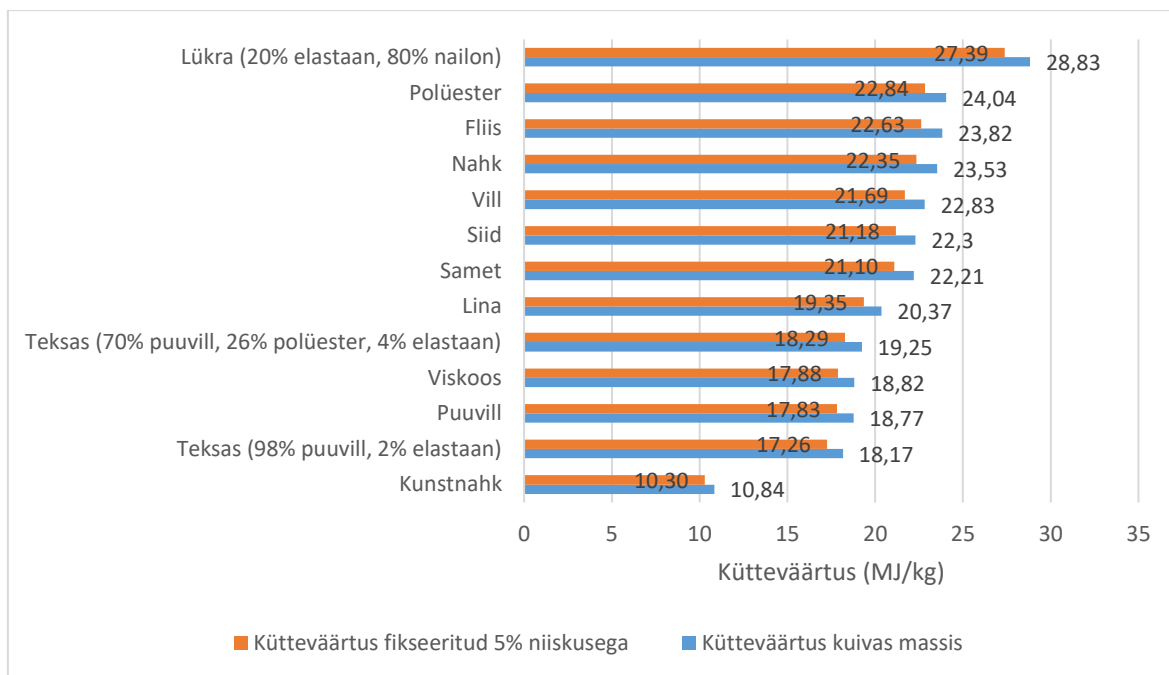
3.3.3 Segakiuliste tekstiilmaterjalide kütteväärtused



Joonis 3.7 Segakiuliste tekstiilmaterjalide bruto ja neto kütteväärtused

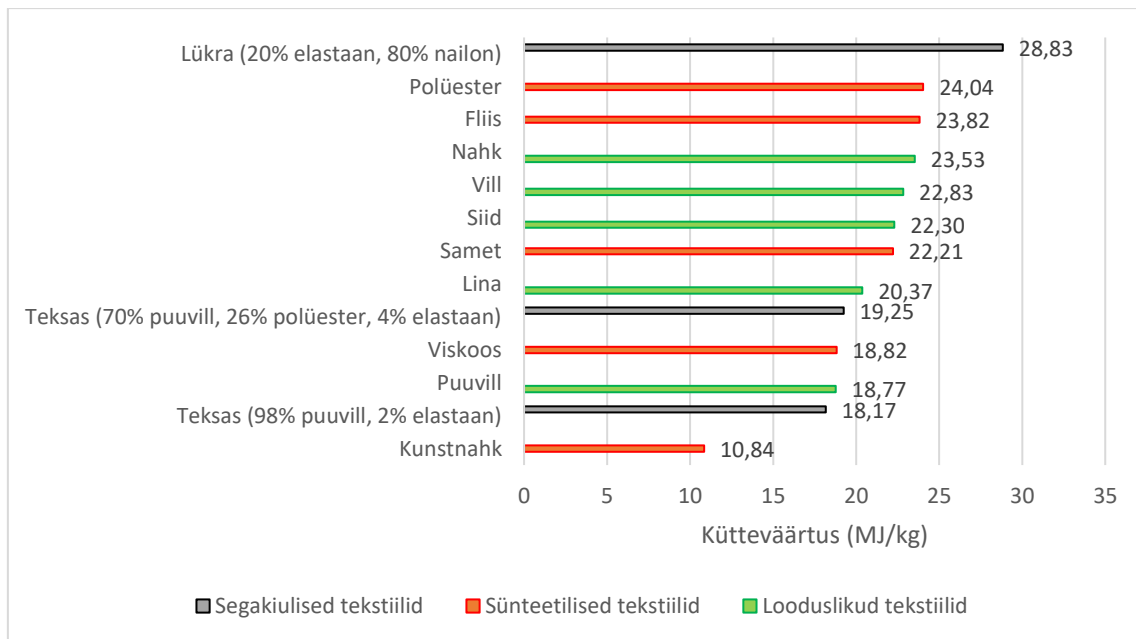
Segakiulistest tekstiilidest oli madalama kütteväärtusega teksas $18,17 \pm 0,1$ MJ/kg (vt Joonis 3.7), millel oli suurem looduslike kiude osakaal, mille tõttu teksamaterjalid omavahel erinesid ka kütteväärtuse poolest. Teksamaterjal, mille koostisosas oli 30% sünteetilisi kiude, oli kütteväärtusega $19,25 \pm 0,51$ MJ/kg. Mõlema materjali niiskuse ning tuhasisaldus oli üksteisele ligilähedane, kuid vähesel määral oli märgata, et sünteetilise kiu osakaaluga tõusis ka tuhasus ning langes niiskusesisaldus. Isegi kui lükra on segakiulise koostisega, koosneb see 100% sünteetilisest kiust, mille keemilise koostise tõttu on tal ka märgatavalt kõrge kütteväärtus ($28,83 \pm 0,78$ MJ/kg).

3.3.4 Kütteväärtuste võrdlus



Joonis 3.8 Kütteväärtuse fikseeritud 5% niiskusesisaldusega võrreldes kütteväärtusega kuivas materjalis

Joonisel (vt **Tõrge! Ei leia viiteallikat.**) on toodud välja katsematerjalide kütteväärtused (MJ/kg) fikseeritud 5% niiskusesisaldusega ning võrdluseks on välja toodud kütteväärtused (MJ/kg) kuivas materjalis. Fikseeritud protsentuaalne väärtus on välja toodud kõigis katsetes esinenud materjalide keskmise niiskusesisaldusena. Joonisel on märgata, et kõikide katses kasutatud materjalide kütteväärtused on võrdlemisi väiksemad, kui põletatav materjal sisaldab niiskust. Antud tulemuste põhjal saab väita, et enamus tekstiile on konkurentsivõimelised alternatiivse kütusena võrreldes tabelis 2.1 (vt Tabel 2.1) välja toodud kütteväärtuseid pakkudes kõrgemat väärtust papp- ja paberile, puidule ning olmejäätmetele.



Joonis 3.9 Looduslike, sünteetiliste ning segakiuliste tekstiilmaterjalide kütteväärtus

Kui sünteetilise koostisega tekstiilide alla liigitada ka lükra ning jätta välja kunstnahk siis keskmiseks kütteväärtuseks tuleks 22,37 MJ/kg, mis on loodusliku koostisega tekstiilide keskmisest kütteväärtusest (20,48 MJ/kg) 1,88 MJ/kg võrra väiksem. Joonisel (vt Joonis 3.9) on märgata, et looduslikest kiududest koosnevate tekstiilmaterjalide kütteväärtused on kõrgemad tekstiilides, mis koosnevad valgust. Tselluloosil põhinevatel tekstiilide kütteväärtused on võrreldes teiste tekstiilidega madalamal kohal ning väiksemate väärtustega. Samuti on märgata, et kõrgemate väärtustega tekstiilid on sünteetilisi kiude sisaldavad tekstiilid.

4. ARUTELU JA JÄRELDUSED

Antud magistritöös uuriti erinevate looduslike ning sünteetiliste tekstiilmaterjalide kütteväärtusi, nende niiskuse ja tuhasisaldusi. Käesoleva magistritööga uuriti, kuidas mõjutavad tekstiilikiud ning nende koostis tekstiilide kütteväärtusi, et saada parem ülevaade põletatavate tekstiilijäätmete kasulikkusest.

Jäätmehierarhia toetab jäätmete maksimaalset ringlussevõttu enne selle põletusse suunamist, mis tähendab, et tekstiilijäätmete kogumine ja sorteerimine peaks aset leidma enne tekstiilide jõudmist jäätmekäitleja kätte. Samuti on raskendatud ka juba jäätmekäitleja kätte jõudnud tekstiilijäätmete ringlussevõtt, kuna jäätmejaamad on kohustatud andma jäätmed üle selleks jäätmeluba omavale isikule, mille tõttu tekstiilijäätmete käitlemine sõltub jäätmevaldajast. Kui jäätmejaama pinnal kogutakse ka koostööpartnerite konteinerites taaskasutatavat materjali, mida jäätmejaama aruandluses ei kajastata, jääb nende materjalide statistika puudulikuks.

Tekstiilijäätmed hoiustamiseks ei ole jäätmeseaduses kajastatud eraldi nõudeid, mille tõttu võib neid ka välikeskkonnas hoiustada, kus tekstiilid riknevad, minnes hallitama või muul viisil kaotavad oma kvaliteedi. Looduslikele kiududele on omane hästi niiskust siduda ning on elukohaks paljudele insektidele, kes antud materjalist toituvad. Mille tulemusel tekstiil kahjustub ning on taaskasutuseks ning ringlussevõtuks rikutud. Sünteetilisi tekstiile, välja arvatud looduslikust polümeerist koosnevale viskoosile, sellised tegurid samasugust mõju ei avalda, mille tõttu võivad need paremini säilida. Aga kuna tekstiilid on hoiustatud samades tingimustes ja keskkonnas riknenud materjalidega võivad nad riknemata materjalidele mõju avaldada, näiteks jäävad külge erinevad lõhnad, hallituse eosid ning võivad määrduda.

Keemiline tekstiilide käitlemine on veel vähe uuritud (Payne 2015), mille tõttu töötlemine osutub kalliks või keskendub teatud liiki kiule. Mehhaanilise töötlemisviisi puhul on tähtis kiuline koostis, osakaal ning kiupikkus, puhtus ning kulumisaste. (Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor, 2023) Brändidel, kes soovivad juba taaskasutatud materjalidest lõngu kasutada, on raskus leida vajaliku kvaliteediga lõngu (Watson, Elander, Gylling, Andersson, & Heikkilä, 2017).

Jäätmemajanduses peetakse arvestust jäätmete kohta tekke põhiselt. Jäätmete vaatest puudub ülevaade ja statistika koostise järgi. Mis tähendab, et tekstiilijäätmed on tarvis

enne taaskasutusse suunamist sorteerida liigiti koostise järgi. Samuti esineb tekstiile, mis koosnevad mitmest erinevast kiuliigist või juba taaskasutatud/segatud materjalist, mis raskendab taaskasutamist või on määratud materjaliga, mis muudab tekstiili taaskasutamise, muul moel kui põletamine, võimatuks.

Taaskasutamine on raskendatud, sest palju riideid koosnevad ka erinevatest materjalidest (st, et erinevad materjalid on juba kokku õmmeldud, lapitud või muul moel seotud). Lisaks sisaldavad materjalide veel võõriseid nt nõõbid, lukud, trükid, kaunistused ehk lisaks on detailid erinevatest plastidest, metallidest, klaasist. Seega liigiti kogumine ei pruugi anda oma tulemust ning parimaks viisiks võib olla vaid korduskasutamine ning alles peale seda jäätmekäitlusesse suunamine. Teiste taaskasutusvormide rakendamiseks on tarvis suure üldsuse mõttemaailma muutmist ning tekstiilide kogumissüsteemi ümbertöötlemist lõpptöötuse lihtsustamiseks. Valikuvariandiks oleks ka toote disaini muutmine, kiirmoe osakaalu vähendamine, tootmise suunamine otse tarbijale (personaliseeritud tooted).

Lisaks tekstiilide keskkonnajalajälg on eriti problemaatiline, sest puuvilla tootmiseks kulub märkimisväärselt palju vett ning putukatõrjeks erinevaid kemikaale (Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor, 2023). Poolsünteetiline tekstiil nagu kunstiid või viskoos vajab keemilist töötlemist, mis mõjuvad toksiliselt nii keskkonnale kui ka töötajatele. (MaterialDistrict, 2018)

Looduslike tekstiilide kütteväärtus on kõrgema kütteväärtusega kui paberi ja papi ning olmejäätmete kütteväärtus ning sünteetiliste kiudude kütteväärtus sarnaneb polüuretaanvahu kütteväärtusele. Kokkuvõtvalt toetab nende kasutamist alternatiivsete kütustena esmaste kütuste lisamaterjalina põletamisel, mis aitab tõsta kütteväärtust kõrgemaks. Kui tekstiilmaterjal enne põletamist purustatakse on sellega kergem kütteväärtust reguleerida, sest manustamist saab kontrollida väiksemates kogustes ning materjal segus hajub. Samuti leidub tekstiile, nagu PVC põhine kunstnahk, mille kõrge tuhasisalduse tõttu ei ole otstarbekas neid põletusse suunata.

Katse tulemusena (vt Joonis 3.9) on välja toodud looduslikud tekstiilmaterjalid võrdluses sünteetiliste materjalidega. Antud andmete näitel võib pidada looduslike tekstiilmaterjale materjalideks, mis seovad ja säilitavad tõhusamalt niiskust kui sünteetilised materjalid. Looduslike materjalide põhikoostisosaks on kas tselluloos või valk, mis tagab riidekiu hingavuse ning samuti imavad hästi niiskust. Millest võib järeldada, et sünteetiliste tekstiilide niiskusesisaldus püsib madalamana ka

välitingimustes kui looduslikud tekstiilid ja seega kõigub kütteväärtus sünteetiliste kiudude puhul vähem kui looduslike tekstiilide puhul.

Lisaks on magistritöös kasutatud segakiudest koosnevaid tekstiile nagu teksas ja lükra, kus koostise sisaldab nii looduslikku kui ka sünteetilist kiudu või mitme kiu segu. Nagu ka näha magistritöö tulemustes, et lükra, mida on välja toodud kui segakiuline tekstiil (sünteetiline kiud + sünteetiline kiud), on võrdlemisi teiste tekstiilidega kõige suurema kütteväärtusega. Lükra koostises leidub nii polüuretaani kui ka polüamiide, mis tagab selle kõrge kütteväärtuse. Samuti on võrdluses välja toodud kahe segakiulise (looduslik kiud + sünteetiline kiud) tekstiili kütteväärtuste võrdlus, millest saab järeldada, et sünteetilise kiu sisalduse suurenedes tõuseb ka kütteväärtus. Sellisel juhul väheneb ka niiskuse sisaldus tekstiilis, kuna väheneb puuvilla osakaal ja niiskuse mõju kütteväärtusele on väiksem.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöö eesmärgiks oli selgitada välja, millised tekstiilmaterjalid on kütteväärtuse poolest kõige suurema tootlusega sõltuvalt tekstiilmaterjali koostisest. Töö eesmärgi saavutamiseks määras autor uurimisülesanded, mille abil anda ülevaade tekstiiljäätmest Eestis, tekstiilmaterjalidest, nende koostisest ning omadustest ja selgitada välja, millised tekstiilmaterjalid on kütteväärtuse poolest kõige suurema tootlusega sõltuvalt nende koostisest.

Käesoleva töö eesmärgi saavutamiseks viis autor läbi katse Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži laboris pisteliselt valitud tekstiilmaterjalidega, et leida katsematerjalide kütteväärtused vähemalt kolmes korduses, niiskusesisaldused ühes korduses ning tuhasus kahes korduses.

Töö tulemusena võib öelda, et kui valimist jätta välja kunstnahk siis sünteetilised tekstiilmaterjalid on kütteväärtuste poolest esirinnas võrreldes kütteväärtusi looduslike kiududega. Sünteetiliste tekstiilide keskmise kütteväärtuse toob alla kõrge tuhasusega (PVC) kunstnahk, mille kütteväärtus 10,84 MJ/kg on kogu valimi väikseim. Samuti leiti, et looduslikest kiudest koosnevate tekstiilide kütteväärtuseid mõjutab teiste tekstiilidega võrreldes kõrgem niiskusesisaldus. Looduslikest kiudest koosnevad tekstiilid olid kõrgemate kütteväärtustega, kui kiud põhineb valgulisel koostisel.

Autor tõdeb, et jäätmejaamadesse kogutav tekstiilmaterjalid on korduvkasutuseks ning ringlussevõtuks kõlbmatu, sest tekstiilide kvaliteet võib olla madal või materjal võib olla riknenud. Sellisel juhul oleks kõige mõistlikum tekstiilijäätmete suunamine jäätmekütuseks või põletusse, kui need on juba jäätmekäitleja kätte jõudnud. Et tagada tõhusam tekstiilide ning rõivaste ringlussevõtt tuleks materjalide sorteerimine teostada enne nende jõudmist jäätmekäitleja kätte. Samuti toob autor välja, et kõiki tekstiile ei saa lõpmatuseni ümber töödelda, sest kiud kandmisel ning töötlemisel kaotavad oma kvaliteedi või töötlemiseks kiude eraldamine segakiulistest tekstiilidest on võimatu või raskendatud.

Käesoleva magistritöö uurimisülesanded lahendati ning töö eesmärk täideti. Kõige kõrgema kütteväärtusega tekstiilmaterjaliks selgus lükra väärtusega 28,83 MJ/kg, mille tekstiilis sisaldus 20% elastaani ning 80% nailonit ning mille koostises on peamiselt polüuretaan ja polüamiid. Tulemuste põhjal saab väita, et täissünteetilised ehk sünteetilistest polümeeridest koosnevatel sünteetilistel tekstiilidel on kõige kõrgemad

kütteväärtused, välja arvatud kunstnahk (PVC), mis on tootjate poolt juba disainitud selliseks materjaliks, mis põledes laguneb ja suure tuhasisalduse tõttu on sel ka väikseim kütteväärtus. Lisaks on erisuseks ka viskoos, mis põhineb looduslikul polümeeril, mille kütteväärtus sarnaneb puuvillale ning teksamaterjalidele, mis suuremal osal sisaldavad puuvilla. Looduslikest kiudest koosnevate tekstiilide kõrgeimate kütteväärtustega tekstiilid olid valgulise koostisega (nahk, vill, siid).

Antud lõputöö käigus selgusid üksikud probleemid, mille lahendamine antud töö piiridesse ei mahtunud. Näiteks ei saa konkreetselt välja tuua põhjust, miks polüvinüülkloriidil põhineval kunstnahal on kordi suurem tuhasisaldus võrreldes teiste sünteetiliste tekstiilmaterjalidega ning mida võiks põhjalikumalt tulevikus uurida. Lisaks esineb turul erinevaid teisi tekstiile, mille kütteväärtuse potentsiaali tasub uurida.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to examine which textiles have the highest calorific value depending on the composition of the textile. In order to achieve the goal of the thesis, the author set research tasks by providing an overview about textile wastes in Estonia, about textiles and their composition and properties, and to find out which textile materials have the highest yield in terms of calorific value depending on their composition.

To achieve the goal of this work, the author conducted an experiment with randomly selected known textiles in the laboratory of Tallinn University of Technology, Tartu College, in order to find the calorific value of the test materials in at least three repetitions, the moisture content in one repetition and the ash content in two repetitions.

As a result, it can be said that if artificial leather (PVC) is excluded from the selection, synthetic textiles are in the forefront in terms of calorific values compared to textiles that consist of natural fibres. The average calorific value of synthetic textiles is brought down by high-ash content in (PVC) synthetic leather, which calorific value of 10.84 MJ/kg is the lowest of all textiles. It was also found that the calorific values of textiles made of natural fibres are affected by a higher moisture content compared to other textiles. Natural textiles based of protein had higher calorific values than natural textiles based of cellulose.

The author acknowledges that the textile materials collected in waste plants are unsuitable for reuse and recycling, because the quality of the textiles may be low or the material may be damaged or spoiled. In this case, it would be most reasonable to send the textile waste to incineration or to be used as fuel, if it has already reached the waste handler. To ensure more efficient recycling of textiles and clothing, materials should be sorted before they reach the waste handler. The author also points out that not all textiles can be reprocessed indefinitely, because the fibres lose their quality during wear and processing, or it is impossible or difficult to separate fibres from mixed fibre textiles for processing.

The research tasks of this master's thesis were solved and the purpose was fulfilled. Textile with the highest calorific value turned out to be lycra with a value of 28.83 MJ/kg, whose textile contained 20% elastane and 80% nylon and whose composition is mainly polyurethane and polyamide. Based on the results, it can be stated that fully synthetic, i.e. synthetic textiles consisting of synthetic polymers, have the highest calorific value, with the exception of artificial leather (PVC), which is already designed by the manufacturers to be a material that decomposes when burned and, due to its high ash content, also has the lowest calorific value. In addition, viscose, which is based on a natural polymer whose calorific value is similar to cotton, and denim materials, which mostly contain cotton, is also an exception. Textiles containing protein have highest calorific value of natural fibre textiles (leather, wool, silk).

In the course of this thesis, some problems were revealed. solutions of which did not fit within the limits of this thesis. For example, the reason why artificial leather based on polyvinyl chloride has a several times higher ash content compared to other synthetic textiles cannot be specifically identified, and which could be investigated more thoroughly in the future. In addition, there are various other textiles on the market, whose calorific value potential is worth investigating.

Kasutatud kirjandus

- Altindag, I. A., & Akdogan, Y. (15. jaanuar 2021. a.). *Spectrophotometric characterization of plasticizer migration in poly(vinyl chloride)-based artificial leather*. allikas: ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058420313146>
- AS Epler & Lorenz. (2021). *Analüüsiprotokoll nr.20/ 052*. AS Epler & Lorenz.
- Bagwala, M. (15. märts 2021. a.). *Problems Associated of Man-made Fibers and Their Methods of Rectification*. allikas: Textilelearner: <https://textilelearner.net/problems-of-man-made-fibers/>
- Benin, S. R., Kannan, S., Bright, R. J., & Moses, A. J. (2020). A review on mechanical characterization of polymer matrix composites & its effects reinforced with various natural fibres. (Volume 33, Part 1). Allikas: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320347271#!>
- Concord, D. (n.d). *Does Leather Burn? – Etching and Otherwise*. Allikas: Liberty leather goods: <https://www.libertyleathergoods.com/does-leather-burn/>
- Cook, J. G. (1959). *Handbook of textile fibres VOL. I - Natural Fibers* (Kd. V). Abington Cambridge, English: Woodhead Publishing Limited Abington Hall.
- D. La Rosa, A., & Grammatikos, S. A. (25. november 2019. a.). Comparative Life Cycle Assessment of Cotton and Other Natural Fibers for Textile Applications. Gjøvik, Norway. doi:<https://doi.org/10.3390/fib7120101>
- DDS Calorimeters. (2022). *DDS CALORIMETERS OPERATIONS MANUAL*. Kasutamise kuupäev: 4. aprill 2022. a., allikas DDS Calorimeters: CAL3K Calorimeters: https://ddscalorimeters.com/wp-content/uploads/DDSCalorimeters_Operators_Manual_2022.pdf
- Digital Data Systems (Pty) Ltd. (2016). *Air Cooler*. Kasutamise kuupäev: 7. veebruar 2023. a., allikas DDS Calorimeters: <https://www.ddscalorimeters.com/air-cooler/>
- Eesti Kunstiakadeemia Jätkusuutliku disaini ja materjalide labor. (15. veebruar 2023. a.). *Tekstiilijäätmed: Eestis tekkivate tekstiiljäätmete ringlussevõtu ja tootearenduse lahendused*. Kasutamise kuupäev: 15. aprill 2023. a., allikas Keskkonnaministeerium: <https://www.envir.ee/media/9136/download>
- Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. (1. detsember 2021a. a.). *Textiles - Man-made fibres - Generic names (ISO 2076:2021) (EVS-EN ISO 2076:2021)*.

- Kasutamise kuupäev: 20. märts 2023. a., allikas Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-2076-2021>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ. (9. detsember 2014. a.). *Textiles - Natural fibres - Generic names and definitions (ISO 6938:2012) (EVS-EN ISO 6938:2014)*. Allikas: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-6938-2014>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ. (31. detsember 2020. a.). *Solid recovered fuels - Vocabulary (ISO 21637:2020) (EVS-EN ISO 21637:2020)*. Allikas: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-21637-2020>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ. (1. aprill 2021b. a.). *Solid recovered fuels - Determination of ash content (ISO 21656:2021) (EVS-EN ISO 21656:2021)*. Allikas: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-21656-2021>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ. (1. aprill 2021c. a.). *Solid recovered fuels - Determination of moisture content using the oven dry method - Part 3: Moisture in general analysis sample (ISO 21660-3:2021) (EVS-EN ISO 21660-3:2021)*. Allikas: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-21660-3-2021>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ. (20. juuli 2021d. a.). *Solid recovered fuels - Determination of calorific value (ISO 21654:2021) (EVS-EN ISO 21654:2021)*. Allikas: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-21654-2021>
- Ellen MacArthur Foundation. (28. november 2017. a.). *A New Textiles Economy: Redesigning fashion's future*. Allikas: Ellen MacArthur Foundation: https://emf.thirdlight.com/file/24/IwnEDbfI5JTFoAIw_2QI2Yg-6y/A-New-Textiles-Economy_Summary-of-Findings_Updated_1-12-17.pdf
- Enefit Green AS. (august 2021. a.). *Keskkonnaaruanne 2020*. Kasutamise kuupäev: 15. aprill 2023. a., allikas Enefit Green AS: https://enefitgreen.ee/.resources/green/webresources/assets/pdf/Keskkonnaaruanne_2020.pdf
- Enefit Green AS. (12. september 2022. a.). *Keskkonnaaruanne 2021*. Kasutamise kuupäev: 5. mai 2022. a., allikas Enefit Green AS: <https://keskkonnaagentuur.ee/media/2868/download>

- Euroopa Liidu Teataja. (30. mai 2018. a.). *EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV (EL) 2018/851*. allikas: Euroopa Liidu Teataja: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN>
- European Association for Textile Polyolefins. (2021). *About Man-Made Fibres*. (European Association for Textile Polyolefins) Kasutamise kuupäev: 13. veebruar 2023. a., allikas <https://www.cirfs.org/man-made-fibers/man-made-fibers>
- European Association for Textile Polyolefins. (2021). *Product and Production Process*. (European Association for Textile Polyolefins) Kasutamise kuupäev: 13. veebruar 2023. a., allikas <https://www.cirfs.org/man-made-fibers/Product-and-production-process>
- European man-made fibres association. (2021). *World Production By Fibre*. (European Association for Textile Polyolefins) Kasutamise kuupäev: 13. veebruar 2023. a., allikas <https://www.cirfs.org/statistics/key-statistics/world-production-fibre>
- German Insurance Association. (2023). *Industrial raw materials, semi-manufactured articles & industrial goods - Hides, furs, leather goods*. Allikas: Container Handbook: https://www.containerhandbuch.de/chb_e/scha/index.html?/chb_e/scha/scha_19_05.html
- Global Fashion Agenda. (2021). *Global Fashion Agenda: Priorities for a prosperous industry*. Kasutamise kuupäev: 5. mai 2022. a., allikas <https://www.globalfashionagenda.com/publications-and-policy/fashion-ceo-agenda-2021/>
- Hossain, N. (11. juuli 2014. a.). *Viscose Rayon: A Regenerated Cellulosic Fiber*. Kasutamise kuupäev: 25. aprill 2023. a., allikas Textile Learner: <https://textilelearner.net/viscose-rayon-a-regenerated-cellulosic-fiber/>
- Hossain, P. S. (15. september 2021. a.). *Textilelearner*. Kasutamise kuupäev: 18. detsember 2022. a., allikas <https://textilelearner.net/an-overview-of-glass-fibre/>
- Hossain, S. (12. veebruar 2022. a.). *Polyester Fiber: Properties, Manufacturing and Applications*. Kasutamise kuupäev: 15. aprill 2023. a., allikas Textile Learner: <https://textilelearner.net/polyester-fiber-properties-manufacturing/>
- Igniss energy. (2023). *Calorific value (CV) of waste - "Waste to Energy"*. allikas: Igniss Energy - Incineration Technology: <https://www.igniss.com/calorific-value-waste>

- Islam, R. (11. jaanuar 2021. a.). *Spandex Fiber: Properties, Manufacturing Process and Uses*. Allikas: Textile learner: <https://textilelearner.net/spandex-fiber-properties-manufacturing/>
- Keskkonnaagentuur. (5. oktoober 2022. a.). Jäätmeliigid 2020-2021. Allikas: <https://public.tableau.com/app/profile/keskkonnaagentuur/viz/Jtmeliigid2020-2021/Riigitasand>
- Keskkonnaamet. (30. mai 2022. a.). *Jäätmed*. allikas: Keskkonnaamet: <https://envir.ee/ringmajandus/jaatmed>
- Keskkonnaamet. (4. oktoober 2022. a.). *Keskkonnakompleksluba nr KKL/317497*. (aktsiaselts Epler & Lorenz) Kasutamise kuupäev: 23. aprill 2023. a., allikas Kotkas - Keskkonnaotsuste infosüsteem: https://kotkas.envir.ee/permits/detail_view?represented_id=78816&permit_id=134168&cft=a3f7a310
- Keskkonnaamet. (15. märts 2023. a.). *Keskkonnakompleksluba L.KKL.HA-222658*. (Enefit Green AS Iru elektrijaam) Kasutamise kuupäev: 23. aprill 2023. a., allikas Kotkas - Keskkonnaotsuste infosüsteem: https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=78816&search=1&permit_nr=&owner_name=enefit%20green&issue_date_start=&issue_date_end=&valid_start_date_start=&valid_start_date_end=&permit_status=ISSUED&ehak_ac_long_id=&db_ahak_label=&obje
- Keskkonnaministeerium. (2021). Keskkonnaministri määruse „Olmejäätmete liigiti kogumise ja sortimise nõuded ja kord.
- Keskkonnaministeerium. (26. november 2021. a.). *Tekstiil ringlusse!* allikas: Keskkonnaministeerium: <https://envir.ee/et/tekstiilringlusse>
- Keskkonnaministeerium. (2023). *Eelnõu: Riigi jäätmekava 2022-2028*. allikas: Keskkonnaministeerium: <https://www.envir.ee/media/9346/download>
- Kiron, M. I. (26. september 2021. a.). *Textile Fibers and Their Classification*. Kasutamise kuupäev: 28. veebruar 2022. a., allikas Textile Learner: <https://textilelearner.net/classification-of-textile-fibers/>
- Kivisoo, M. (2020). *tekstiiljäätmete käitlemine Eestis*. Tartu: Eesti Maaülikool.
- Konwar, M., & Boruah, R. R. (19. november 2018. a.). *Natural Fibers as Sustainable Textiles: A Review*. Allikas: International Journal of Pure & Applied Bioscience: <http://www.ijpab.com/form/2018%20Volume%206,%20issue%206/IJPAB-2018-6-6-504-507.pdf>

- Kuldasheva, A., Saidmuratov, B., & Kuldashev, H. (2020). *The Use of Wollastonite Fiber to Enhance the Mechanical Properties of Cement Compositions*. Usbekistani: International Journal of Progressive Sciences and Technologies.
- Kumar, S. S., & Allamraju, K. V. (26. november 2019. a.). A review of natural fiber composites [jute, sisal, kenaf]. *Materialstudy: proceedings*, lk 2556-2562. allikas:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S221478531932245X?token=CA8D4F1700989F624A0839341B3B3CE822E4AAA287088DEDB6B7189529E5A2FE58DA3153E4603AE42F7E1A571F436108&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220328110006>
- Martin, K., Moora, H., Hvass, K. K., & Watson, D. (Mai 2020. a.). *Eesti tarbimisjärgsed rõiva- ja tekstiivood*. Allikas: Stockholm Environment Institute: <https://www.envir.ee/media/8066/download>
- MaterialDistrict. (13. august 2018. a.). *THIS WOOD-BASED TEXTILE FIBRE IS MADE WITHOUT CHEMICAL SOLVENTS*. (MaterialDistrict) Kasutamise kuupäev: 16. oktoober 2022. a., allikas <https://materialdistrict.com/article/wood-based-textile-fibre/>
- Mulder, K., & Knot, M. (aprill 2001. a.). *PVC plastic: a history of systems development and entrenchment*. allikas: Sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X01000136>
- Nordic Council of Ministers. (juuli 2020. a.). *Post-consumer textile circularity in the Baltic countries*. Kasutamise kuupäev: 5. mai 2022. a., allikas <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1466009/FULLTEXT01.pdf>
- Nunes, L. J., Godina, R., Matias, J. C., & Catalão, J. P. (10. jaanuar 2018. a.). *Economic and environmental benefits of using textile waste for the production of thermal energy*. allikas: ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617324617?via%3Dihub>
- Peets, P. (2020). *Development of instrumental methods for the analysis of textile fibres and dyes*. Tartu: University of Tartu. allikas: https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/68506/peets_pilleriin.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Raudik, J. M., Rohtmets, L., & Taraskin, A. (12. veebruar 2023. a.). *Jäätmete ringlussevõtu võimekuse analüüs - Paberi- ja kartongijäätmed, klaasi- ning tekstiilijäätmed*. Kasutamise kuupäev: 2. märts 2023. a., allikas

- Keskkonnaamet:
<https://storymaps.arcgis.com/collections/524ba61e26a74a39b63cc255c03ae5f9?item=7>
- Riigi Teataja. (6. detsember 2019. a.). *Jäätmenimistu*. allikas: Riigi Teataja:
https://www.riigiteataja.ee/akt/1131/2201/9009/KKM_m65_lisa.pdf#
- Riigi Teataja. (2021). Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistu. *RT I, 18.12.2020, 26*. Keskkonnaminister. Kasutamise kuupäev: 5. mai 2022. a., allikas
<https://www.riigiteataja.ee/akt/118122015014?leiaKehtiv>
- Riigi Teataja. (11. juuni 2021. a.). *Jäätmete taaskasutamise- ja kõrvaldamistoimingute nimistud*. Allikas: RT I, 08.06.2021, 8:
<https://www.riigiteataja.ee/akt/108062021008?leiaKehtiv>
- Riigi Teataja. (10. juuni 2022. a.). *Olmejäätmete sortimise kord ning sorditud jäätmete liigitamise alused*. Allikas: Riigi Teataja:
<https://www.riigiteataja.ee/akt/12779785?leiaKehtiv>
- Riigi Teataja. (1. mai 2023. a.). *Jäätmeseadus*. allikas: RT I, 17.03.2023, 36:
<https://www.riigiteataja.ee/akt/117032023036?leiaKehtiv>
- Sandin, G., & Peters, G. M. (20. mai 2018. a.). *Environmental impact of textile reuse and recycling - A review*. allikas: Scie:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618305985>
- Serviceproekt. (2021). *Erinevate kütuste kütteväärtus. Võrdlev analüüs. Kütuse ja põlevate materjalide eripõlemissoojus Kcal m3 mJ*. allikas: Serviceproekt:
<https://serviceproekt.ru/et/real-estate/teplotvornaya-sposobnost-razlichnyh-vidov-topliva-sravnitelnyi-analiz/>
- Statistikaamet. (13. september 2021. a.). *Eesti Statistika: KE062: KÜTUSE TARBIMINE TEGEVUSALA JA KÜTUSE LIIGI JÄRGI*. (Statistikaamet) Kasutamise kuupäev: 30. aprill 2022. a., allikas
https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__energeetika__energia-tarbimine-ja-tootmine__aastastatistika/KE062
- Statistikaamet. (6. september 2021. a.). *Taastuenergiast elektri tootmine kasvab jõudsalt*. (Eesti statistika) Kasutamise kuupäev: 7. aprill 2022. a., allikas
<https://www.stat.ee/et/uudised/taastuenergiast-elektri-tootmine-kasvab-joudsalt>

- Statistikaamet. (2023). *Eesti statistika: Jäätmed ja ringmajandus*. Kasutamise kuupäev: 6. mai 2022. a., allikas <https://www.stat.ee/et/avastatistikat/valdkonnad/keskkond/jaatmed-ja-ringmajandus>
- Sulochani, R. M., Jayasinghe, R. A., Nilmini, A. H., & Priyadarshana, G. (17. oktoober 2021. a.). *Asian Journal of Chemistry*. Kasutamise kuupäev: 14. veebruar 2023. a., allikas https://asianjournalofchemistry.co.in/user/journal/viewarticle.aspx?ArticleID=34_3_3
- Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., & Soosaar, S. (2005). *BIOKÜTUSE KASUTAJA*. (V. Vares, Toim.) Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus. Kasutamise kuupäev: 25. veebruar 2023. a., allikas <https://www.digar.ee/arhiiv/et/raamatud/41786>
- Wasilewski, R. (2013). Energy recovery from waste plastics. *CHEMIK*(67(5)), 435-445.
- Watson, D., Elander, M., Gylling, A., Andersson, T., & Heikkilä, P. (2017). *Stimulating Textile-to-Textile*. Allikas: Nordic Council of Ministers: <https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1161916/FULLTEXT01.pdf>
- Weber, S., Weber, O., Habib, K., & Dias, M. G. (28. detsember 2022. a.). Textile waste in Ontario, Canada: Opportunities for reuse and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*(190). Allikas: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134492200667X>
- Yusuf, A. (25. september 2014. a.). *Nylon: The First Synthetic Fiber*. Kasutamise kuupäev: 25. aprill 2023. a., allikas Textile Learner: <https://textilelearner.net/nylon-the-first-synthetic-fiber/>

LISAD

Lisa 1 Katse tulemused

Tabel 0.1 Looduslike ning sünteetiliste tekstiilide katse tulemused

	Tekstiilmaterjal	Tuhasus (%)	adv. ±	Niiskus %	bruto kütteväärtus (MJ/kg)	neto kütteväärtus (MJ/kg)	adv. ±	Kütteväärtus fikseeritud 5% niiskusega
Looduslikud tekstiilid	Nahk	4,79	0,21	11,48	25,15	23,53	1,20	22,35
	Vill	0,58	0,19	8,38	23,17	22,83	0,54	21,69
	Siid	1,07	0,12	11,34	22,84	22,30	0,54	21,18
	Lina	0,50	0,10	5,41	20,60	20,37	2,05	19,35
	Puuvill	0,72	0,12	5,26	19,04	18,77	1,85	17,83
Sünteetilised tekstiilid	Polüester	3,13	0,03	1,77	24,87	24,04	0,11	22,84
	Fliis	0,66	0,08	0,74	24,00	23,82	0,12	22,63
	Samet	0,81	0,09	1,27	22,42	22,21	0,40	21,10
	Viskoos	0,55	0,02	7,90	19,12	18,82	1,81	17,88
	Kunstnahk	39,61	0,18	1,43	18,16	10,84	0,90	10,30
Segakiulised tekstiilid	Lükra (20% elastaan, 80% nailon)	2,92	0,24	1,76	29,75	28,83	0,78	27,39
	Teksas (70% puuvill, 26% polüester, 4% elastaan)	1,39	0,05	3,88	19,62	19,25	0,51	18,29
	Teksas (98% puuvill, 2% elastaan)	1,33	0,21	4,61	18,53	18,17	0,10	17,26

Lisa 2 AS Epler & Lorenz analüüsi protokoll



Analüüsi protokoll nr.20/ 052

Tellija:	AS Epler & Lorenz	Proovi nimetus/nr.	RDF
Aadress:	Ravila 75A, Tartu 54011	Proovivõtmise koht:	Epler & Lorenz jäätmekütuse ladu
Telef.:	7421398	Proovivõtmise aeg/akti nr.	5.08.2021/
Kontaktisik			

Analüüsimeetodid ja tulemused

Kvaliteedinäitaja	Analüüsimeetod	Tulemus	Mõõtühik
Alumine kütteväärtus kuivas materjalis	EVS EN 15400	25,42	MJ/kg
Alumine kütteväärtus LHV Ar	EVS EN 15400	20,68	MJ/kg
Niiskus	ISO 3733	16	%
Tuhasus	EN ISO 18122	17	%
Cl	EVS EN 15408	0,18	%
S	EVS EN 15408	0,21	%
F	EVS EN 15408	0,004	%
C	EVS EN 15936	38	%
Mahukaal		220	kg/m ³
Osakeste suurus < 300*300*300	Visuaalne	vastab	
Ohtlike ainete sisaldus		< 1	%

Analüüsis: laborijuht R. Pärismaa
Kuup. 10.08.2021

R. Pärismaa

AS Epler Lorenz
Ravila 75a, Tartu 50411
Reg. nr. 10136864

Lk. 1(1)

Tel. 7 421 398
Fax. 7 422 780