



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Kuessaare kolledž

# **KANEPIKIU KEEMILISE EELTÖÖTLUSE MÕJU KIU HÜDROFIILSUSELE**

## **EFFECT OF CHEMICAL PRETREATMENT OF HEMP FIBER ON FIBER HYDROPHILICITY LÕPUTÖÖ**

Üliõpilane: Tanel Niitmets

Üliõpilaskood 182611

Juhendaja: Mihkel Kõrgesaar, abiprofessor

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Tanel Niitmets

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kanepikiu keemilise eeltötluse mõju kiu hüdrofiilsusele, mille juhendaja on professor Mihkel Kõrgesaar,

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.

---

18.05.2023

---

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

# SISUKORD

Mina, Tanel Niitmets .....	2
EESSÕNA.....	5
Lühendite ja tähiste loetelu.....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1.    Meetod .....	9
1.1 Ülevaade biokiududest .....	9
1.1.1 Kenafkiud.....	9
1.1.2 Kanepikiud .....	9
1.1.3 Sisalkiud.....	10
1.1.4 Džuudikiud.....	10
1.1.5 Linakiud .....	10
1.2 Biokiu valik .....	10
1.3 Materjali eeltöötlus .....	11
1.3.1 Leelisega eeltöötlus.....	11
1.3.2 Silaaniga eeltöötlus .....	12
1.3.3 Atsetüülimisega eeltöötlus .....	12
1.3.4 Destilleeritud veega eeltöötlus .....	12
1.4 Materjali katsed .....	12
1.4.1 Niiskuse absorbeerimine .....	13
1.4.2 Mehaanilised katsed .....	13
2 Katsete tulemused.....	15
2.1 Ilma eeltöötluseta kuivad ja niisked katsed .....	15
2.2 Leelisega eeltööteldud ning ahjus kuivatatud kuivad ja niisked katsed .....	16
2.3 Leelise ja atsetüüliga eeltööteldud ning ahjus kuivatatud kuivad ja niisked katsed .	18
2.4 Leelise ja silaaniga eeltööteldud ning ahju kuivatatud kuivad ja niisked katsed .....	19
2.5 Destilleeritud veega kuivad ja niisked katsed.....	21
2.6 Leelisega eeltööteldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed .	23
2.7 Leelise ja atsetüüliga eeltööteldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed .....	25
2.8 Leelise ja silaaniga eeltööteldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed.....	26

2.9 Kuivade katsete võrdlus.....	28
2.10 Niiskete katsete võrdlus.....	29
2.11 Ebaõnnetustunud katsed .....	30
3 Analüüs.....	31
3.1 Edasiarenduseks.....	31
<b>KOKKUVÕTE.....</b>	<b>32</b>
<b>KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....</b>	<b>33</b>
4 LISAD .....	34
4.1 Eraldi ilma eeltötlusega kuivad ja niisked katsed.....	34
4.2 Eraldi leelisega eeltöödeldud ning ahjus kuivatatud kuivad ja niisked katsed.....	34
4.3 Eraldi leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivad katsed .....	35
4.4 Eraldi leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivad ja niisked katsed .....	35
4.5 Eraldi destilleeritud veega kuivad ja niisked katsed.....	36
4.6 Eraldi leelisega eeltöödeldud ning ilma ahjuta kuivatatud kuivad ja niisked katsed.	36
4.7 Eraldi leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning ilma ahjuta kuivatatud kuivad katsed. ....	37
4.8 Eraldi leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning ilma ahjuta kuivatatud kuivad ja niisked katsed.....	37
4.9 Repositooriumi failid.....	37

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema sõnastati juhendajate Mihkel Kõrgesaare ja Andrus Šultsi algatusel. Lisaks aitasid juhendajad katsekehade eeltöötlust läbi viia ning kodeerida. Eeltöötlusted ja katsed viidi läbi Kuressaare kolledži materjalilaboris.

Maailma liigub rohepöörde poole, samuti vajab seda ka komposiidid, kuid biokiudid on alles algstaadiumis. Biokiud on looduslik taimekiud, mille eesmärk on vähendada komposiidi massi ja vähendada saastet. Biokiust biokanga kättesaadavus on piiratud, kuna nende puuduste pärast on nõudlus väike. Biokomposiite laialdasemat kasutamist piirab nende vastupidavus ja niiskusimavus paljudes keskkondades. Selle parandamiseks tuleb biokiude eeltöödelda.

## Lühendite ja tähiste loetelu

IK – ilma eeltöötluseta kuiv katsekeha

IM – ilma eeltöötluseta niiske katsekeha

LK – leelisega eeltöödeltud ahjus kuivatatud kuiv katsekeha

LM – leelisega eeltöödeltud ahjus kuivatatud niiske katsekeha

AK – leelise ja atsetüüluga eeltöödeltud ahjus kuivatatud kuiv katsekeha

AM – leelise ja atsetüüluga eeltöödeltud ahjus kuivatatud niiske katsekeha

SK – leelise ja silaaniga eeltöödeltud ahjus kuivatatud kuiv katsekeha

SM – leelise ja silaaniga eeltöödeltud ahjus kuivatatud niiske katsekeha

DK – destileeritud veega eeltöödeltud kuiv katsekeha

DM – destileeritud veega eeltöödeltud niiske katsekeha

ILK – leelisega eeltöödeltud toatemperatuuril kuivatatud kuiv katsekeha

ILM – leelisega eeltöödeltud toatemperatuuril kuivatatud niiske katsekeha

IAK – leelise ja atsetüüluga eeltöödeltud toatemperatuuril kuivatatud kuiv katsekeha

IAM – leelise ja atsetüüluga eeltöödeltud toatemperatuuril kuivatatud niiske katsekeha

ISK – leelise ja silaaniga eeltöödeltud toatemperatuuril kuivatatud kuiv katsekeha

ISM – leelise ja silaaniga eeltöödeltud toatemperatuuril kuivatatud niiske katsekeha

S – jäikus

F – jõud

$\delta$  - nihe

$l_f$  – lõugade vaheline kaugus purunemise hetkel

$l_0$  – lõugade vaheline kaugus

## SISSEJUHATUS

Komposiitmaterjal on heterogeenne materjal, mille omadused (korrosiooni- ja kuumuskindlus, magnetilised omadused, jäikus, tugevus jm) on määratud tema koostisse kuuluvate faasidega. Komposiitmaterjalid on kahest või enamast faasist koosnevad materjalid. Üks faas on armatuur ehk sarrus, mis on kõva ja tugev ning see annab komposiitmaterjalile tugevuse, jäikuse ja tagab mehaaniliste omaduste säilimise tööolukorras (kõrgel või madalal temperatuuril, agressiivses keskkonnas jne). Teine osa on maatriks, mis on plastne ja/või elastne ning annab materjalile vormi, monoliitsuse ning tagab koormuse armatuuri jaotumise elementide vahel. Armatuur võtab vastu põhipinge kiulistes komposiitides, mis tekib välisjõudude mõjul. See tagab kiudude pikisuunas tugevuse ja jäikuse. Maatriks jagab koormuse kiudude vahel ühtlaselt tänu elastsele deformatsioonile. Armatuuri kiudude tugevusega, maatriksi jäikusega ja sideme kiud-maatriks tugevusega määratakse komposiitmaterjali mehaanilised omadused. (Daniil Arensburger, 2005)

Biokomposiidid on komposiitmaterjalid, mis on looduslike kiududega tugevdatud biopolümeerid. Biopolümeerid on biolagunevad polümeerid. Teadlased on biokomposiitmaterjale välja töötanud asendamaks tavapäraseid komposiitmaterjale, mis on taastumatud või toodetud saastet tekitavate protsesside käigus. Biokomposiidid on alles algstaadiumis, kuigi neid on kasutatud aastakümneid (vineer ja puitlaastplaat). Biokomposiitide laialdasemat kasutuselevõttu piirab nende vastupidavus paljudes keskkondades. Biokomposiitmaterjalide suurim tehnoloogiline probleem on vastupanu niiskuse imandumisele, mis piirab praegu nende laiemat kasutust. (S.J. Christian, 2016)

Biokomposiidid on niiskusele vastuvõtlikumad, sest neis sisalduvad looduslikud kiud on enamasti hüdrofiilse iseloomuga ehk niiskusele vastuvõtlikumad. Samuti on looduslikud kiud sünteetilisest kiududest nõrgemad. Enne komposiitide valmistamist tuleb leida lahendus, kuidas kiudude hüdrofoobsust suurendada ehk muuta nad vett tõrjuvaks. Uuringuid on tehtud eeltötluste mõjust komposiitide kohta, kuid vähe on uuritud eeltötluste mõjust biokiule.

Biokiud on bioloogilise päritoluga biokomposiitide põhikomponendid, näiteks mille kiud pärinevad põllukultuurist (puuvill, lina või kanep), ringlussevõetud puit, vanapaber, põllukultuuride kõrvalsaadused või regenereeritud tsellulooskiud. (Joshi S.V et al., 2004)

Biokiude ei saa toorel kujul kasutada, kuna seal on tselluloosi, tolmu ja muid osakesi. Seetõttu on vajalik eeltötlus. Hemitselluloos on peamine kiu koostisosa, mis imab niiskust. Eeltöötlemisena võib kiude pesta puhtas vees, kuumutada teatud perioodi vältel või immutada kemikaalidega. Kõik need töötled eemaldavad kiust ebavajaliku tselluloosi, suurendavad selle tugevust ja muudavad selle vaiguga sidumiseks sobivamaks. Soovimatu tselluloosi eelmaldamisega suureneb looduslike kiudude pinnakaredus. Tulemusena suurendab see kiu sidumisvõimet vaiguga ja suurendab seega komposiidi mehaanilist tugevust. Erinevate keemiliste töötledude kohta on tehtud palju uurimistöid - selgitamaks nende mõju komposiidi omadustele. Mehaaniliste omaduste uuringus sisal- ja džudikiudude töötlemisel naatriumhüdrosiidiga (NaOH), leiti et see suurendas komposiidi tõmbetugevust, paindetugevust, löögitugevust ja kõvadust. (Vinayagamoorthy R., 2019)

Mutasheri ja teiste varasemad uuringud on näidanud, et leelise töötlemine parandas sidet maatriksi ja kiu vahel, hapralt purunenud komposiitidel. Lisaks leiti, et kenafkiuga tugevdatud epoksü komposiidiga puhul suurenes tõmbemoodul, tõmbetugevus ja paindetugevus. (Nur Farhani Ismail et al., 2021)

Üks olulisi kemikaale, mida kasutatakse peamiselt polüetüleenist või polüpropüleenist valmistatud komposiitide jaoks on maleiinhüdriid. Lisaks eelnimetatud kemikaalidele on kasutusel veel kaaliumhüdrosiid, vesinikperoksiid, bensoüülkloriid, silaanid, estrid jne. (Vinayagamoorthy R., 2019)

Antud lõputöö eesmärk on muuta biokiukanga võimet niiskust absorbeerida läbi keemilise eeltötluse. Töötledude mõju komposiidi omadustele hinnatakse mehaaniliste katsetega.



# 1. Meetod

Keskkonnasõbraliku komposiidi valmistamisel tuleb arvesse võtta kiu kättesaadavust ning hüdrofiilsust. Viimase parandamiseks kasutame eeltötluseid, et parandada biokiu tõmbetugevust niisketes oludes.

## 1.1 Ülevaade biokiududest

Keskendume kirjanduses kõige laialdasemalt tähelepanu saanud ja tuntumatele biokiudele ning tuleb leida, mida oleks kõige targem kasutada. Euroopas ja just Eestis on kõige populaarsemad kanepi- ja linakiud, mujal maailmas on tuntumad kenaf, sisal ja džuuut.

### 1.1.1 Kenafkiud

Kenafkiudu istutakse kaubanduslikult, see on odav, kerge ja biolagunev ning sellel on head mehaanilised omadused. Kenaf võib kasvada mitmesugustes ilmastikutingimustes. Üldiselt koosnevad kenafi taimed südamikukiust (60-65%) ja niinekiust (35-40%). Kenafi kiudkomposiite kasutatakse üha enam lennundus, kosmose, auto ja muudes tööstusharudes. Selle põhjuseks on nende füüsikalised ja mehaanilised omadused kõrge eritugevus ja kõrge erijäikus. Kenafi kiudkomposiidid on kuumuse ja niiskuse suhtes tundlikud, kui neid kasutatakse muutuvates keskkonnatingimustes. Kenafi kiudkomposiitidel on üks piiranguid on veel hüdrofiilsete looduslike kiudude ja hüdrofoobsete polümeeride vaheline kokkusobimatus. (Nur Farhani Ismail et al., 2021)

### 1.1.2 Kanepikiud

Euroopa Liidus toodeti 2013. aastal 25000 tonni kanepikiudu, millest ligikaudu 3500 tonni (14%) läks biopõhiste komposiitide. Kanepikiu lõppkasutuseks olid tõenäoliselt spetsiaalne pabermass ja paber (57%) ja isolatsioon (26%). 2013. aastal Euroopas kasvatati 16000 hektaril kanepit ja 4 aastat hiljem oli see peaaegu kolmekordistunud (45000 hektarit). Taimse kiu komposiitmaterjalidel on madal elastsuspiir (umbes 0.15% rakendatud pingest) ja seetõttu on kõrge voolavuspiiri tagamiseks soovitud suurt jäikust. Kanepikiul on võrreldes klaasikiuga eelis märkimisväärselt vähendada massi komposiitides. (Jörg Müssiga et al., 2020)

### 1.1.3 Sisalkiud

Sisal on lehtkiud, mis pärineb Lõuna-Mehhikost. Selle kiud on liiga sitked tekstiilide ja kangaste jaoks. Neid kasutatakse köite valmistamiseks. Sisalitaime eluiga on 7-10 aastat ning selle ajaga kasvatab tavaliselt 200-250 lehte. Iga leht sisaldab umbes 1000 kiudu. Kiud on keskmiselt 80-120cm pikad ja läbimõõt on 0.2-0.4 mm. Sisalit ei soovitata kasutada niiskes keskkonnas. 2020. aastal kasvatati 210000 tonni sisalit, millest umbes 41% saadi Brasiiliast.(Thariq Mohamed & Jawaid Mohammad, 2018)

### 1.1.4 Džuudikiud

Džuudil on pikad ja pehmed niinekiud. Seda kasvatatakse peamiselt Bengali piirkonnas. Džuut kasvab 5-7 kuud ja võib kasvada 1-4 meetri pikkuseks. Džuudil on palju häid omadusi – UV-kaitse, heli- ja soojusisolatsioon ja madal soojusjuhtivus. 2020. aastal toodeti umbes 2.7 miljonit tonni džuuti, milles peaaegu 70% toodeti Indias. Seda kasutatakse köite, nõõride ja vaipade valmistamiseks.(Aly-Hassan Mohamed S., 2015)

### 1.1.5 Linakiud

Linakiud on loodussõbralikud ja vastupidavad ning neid kasutatakse mitmesugustes tööstusharudes. Linast tehakse tugevat lõnga ning kõige laialdasemalt kasutatakse seda kangatööstuses. Lisaks tehakse linas linaõli. Samuti kasutatakse lina majade soojustuses, autotööstuses istmete täidismaterjalina, biokütuse valmistamisel ja pabertoomises. Linast tehtud riided imevad hästi niiskust. Suurimad kasvatuspiirkonnad on USA, India, Hiina, Eetioopia, Venemaa, Euroopa ja Kanada. (Badole S.L et al., 2013)

## 1.2 Biokiu valik

Džuudi-, sisal ja kenafkiude kasvatatakse Euroopas vähe võrreldes kanepi ja linaga. Tabel 1 näitab, et kanepil ja linal on kõige suurem tõmbetugevus. Kuid kuna linakiud imavad hästi niiskust, siis antud lõputöös kasutame katsetes kanepikiudu.

Tabel 1 Biokiudude võrdlus. (Vinayagamoorthy R., 2019)

Kiud	Tihendus (g/cm <sup>3</sup> )	Diameeter (µm)	Tõmbetugevus (MPa)	Young'i moodul (GPa)	Nihe(%)
Kanep	1.1	120	389-900	35	1.6
Džuut	1.3	260	393-773	23-27	1.4
Kenaf	1.31	106	427-519	23-27	1.8

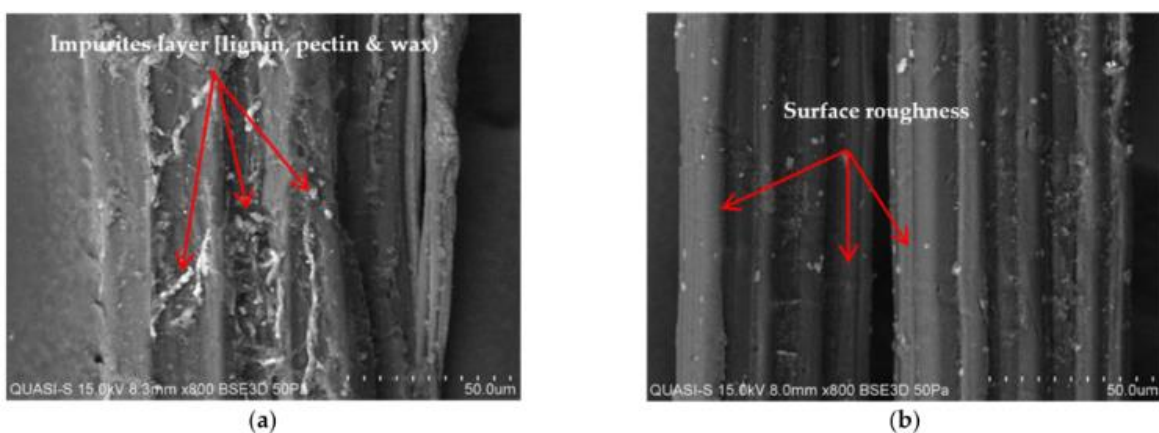
Sisal	1.5	50-80	511-635	9.4-22	2.0-2.5
Lina	1.5	50-100	345-1035	50-70	2.7-3.2

### 1.3 Materjali eeltöötlus

Biokiu vastupidavuse parandamiseks niisketes oludes tuleb kiude eeltöödelda. Hemitselluloos on peamine kiu koostisosa, mis imab niiskust. Hemitselluloos on väga hüdrofiilne, leelises lahustuv ja hapetega kergesti hüdrolüüsitav. Eeltöötlus mõjutab kiudude võimet reageerida veemolekulidega. Eeltöötlemisena võib kiude pesta puhtas vees, kuumutada teatud perioodi vältel või immutada kemikaalidega. Kõik need töötled eemaldavad kiust ebavajaliku tselluloosi, suurendavad selle tugevust ja muudavad selle vaiguga sidumiseks sobivamaks. Soovimatu tselluloosi eelmaldamisega suureneb looduslike kiudude pinnakaredus. Tulemusena suurendab see kiu sidumisvõimet vaiguga ja suurendab seega komposiidi mehaanilist tugevust.

#### 1.3.1 Leelisega eeltöötlus

Kõige populaarsem biokiudude eeltöötlus on leelisega (NaOH) töötled. Naatriumhüdroksiidi vesilahus lagundab ligniini, pektiini ja hemitselluloosi. Nende eemaldamine parandab kiu ja maatriksi vahelist sidet. Joonis 1 näitab, et leelisega eeltöötledel muutus biokiu pind puhtamaks ja karedamaks. Paljud uuringud on leidnud, et leelisega eeltöötlus suurendab nihketugevust, tõmbetugevust, Youngi moodulit, löögitugevust, purunemisjõudu ning vähendab niiskuse omastamist. (K.L. Pickering et al., 2015)



Joonis 1. (a) Töötlemata kenafkiud, (b) leelisega töödeldud kenafkiud. (Nur Farhani Ismail et al., 2021)

### **1.3.2 Silaaniga eeltöötlus**

Tavaliselt silaaniga eeltötlusele eelneb leelisega eeltöötlus. Silaan suurendab looduslike kiudude hüdrofoobsust ja komposiidi tugevust, aga silaani ja maatriksi vahel tekib keemiline side. Silaan moodustas keemilised sidemed pinnakatete hüdroksüülrühmadega ja ei soodusta tugevaid sidemeid kiududega, vaid toimivad täiendava keemilise kihina kiupindadel. Keemilised kihid survekoormuse ajal tekitavad kiududes ja neid ümbritsevates liidestest paindepingeid, mis soodustavad maatriksis pragude teket. See vähendab komposiidi kandevõimet ja surveomadusi. (K.L. Pickering et al., 2015)

### **1.3.3 Atsetüülimisega eeltöötlus**

Tavaliselt atsetüülimisele eelneb leelisega eeltöötlus. Atsetüüli eeltöötlus biokiududel suurendab kiu hüdrofoobsust ehk tõrjub vett ja takistab vee imandumist. Atsetüülimise eeltöötlus võib parandada biokiudude termilist stabiilsust, muutes need kõrgetele temperatuuridele vastupidavamaks. Atsetüüli ületöötlemisel põhjustab see kiudude pragunemist ning see on tänu katalüsaatori üledoseerimisele. Atsetüül vähendab löögitugevust komposiidis. (K.L. Pickering et al., 2015)

### **1.3.4 Destilleeritud veega eeltöötlus**

Biokiudude eeltöötlemiseks destilleeritud veega võib kiud vette panna ja segada, et eemaldada lahtised osakesed. Seda saab teha käsitsi. Kiude tuleks mitu korda loputada destilleeritud veega, et tagada kõigi saasteainete eemaldamine. Teine võimalus on biokiude hoida 23 kraadises destilleeritud vees 72 tundi. Pärast destilleeritud veega eeltöötlemist saab kiude kuivatada ja vajadusel edasi töödelda. Üldiselt on biokiudude eeltöötlemine destilleeritud veega lihtne viis materjali ettevalmistamiseks edasiseks töötlemiseks, aga destilleeritud veega eeltöötlus üksi ei eemalda hemitselluloosi.

## **1.4 Materjali katsed**

Materjali eeltöötlus ja katsed tehti 20-25.03.2023 Kuressaare Meremajanduse keskuse laboris. Kanepikangas oli tellitud Itaalia firmalt Linificio e Canapificio Nazionale. Kangas on tasakaalustatud ja sisaldas kanepikiude 385g ruutmeetri kohta. Tõmbekatsed tehti Electroplus E10000 tõmbeteimi vahel.

Katseseeria raporti tõmbegraafikute joonised 4 a ja b näitasid, et kanepikangast valmistatud komposiitidel olid piki- ja ristikiudu tõmbetulemused samad. Sellele tuginedes on antud lõputöö tõmbekatsed kõik tõmmatud pikikiudu aja ja materjali säästmiseks. (Šults & Kõrgesaar, 2022)

#### **1.4.1 Niiskuse absorbeerimine**

Hemitselluloos on peamine kiu koostisosa, mis imab niiskust. Selleks, et vähendada niiskuse absorbeerimist tuleb kiude eeltöödelda.

Leelistöötles kasutati NaOH lahust. Lahustele lisati 5% NaOH (massi järgi) vee-etanooli segusse(80:20). Siis segati seda toatemperatuuril tund aega. Kanepikiude leotati lahuses 3 tundi toatemperatuuril. Siis pesti kiud 4 korda destilleeritud veega, et vabaneda imendunud leelisest. Pestud kiud kuivatati alguses toatemperatuuril 8h ja peale seda ahjus 100 kraadi juures 6h. (M.M. Kabir et al., 2013)

Atsetüüluga töötlemisel leotati leelisega eeltöödeldud kanepikiude äädikhappes ja seejärel töödeldi toatemperatuuril 3h äädikhappe anhüdriidiga. Peale seda pesti neli korda destilleeritud veega, et vabaneda imendunud atsetüülist. Pestud kiud kuivatati alguses toatemperatuuril 8h ja peale seda ahjus 100 kraadi juures 6h. (M.M. Kabir et al., 2013)

Silaaniga töötlemiseks lahustati oligomeerne siloksaan (3 massiprotsenti) metüülalkoholi lahuses (alkohol: vesi = 60:40). Lahust segati toatemperatuuril tund aega. Leelisega eeltöödeldud kiud pandi toatemperatuuril kolmeks tunniks lahusesse. Kiud kuivatati alguses toatemperatuuril 8h ja peale seda ahjus 100 kraadi juures 6h. (M.M. Kabir et al., 2013)

Kõige looduslikum eeltöötlus on destilleeritud veega töötlemine. Katsekehad asetati 23 kraadisesse destilleeritud vette ning pandi kliimakappi, et vältida temperatuuri kõikumist ja neid hoiti seal 72 tundi. Peale seda kiude kuivatati 24 tundi toatemperatuuril.

#### **1.4.2 Mehaanilised katsed**

Materjali katsed tehti ISO 13934-2:2014 „Grab“ meetodi järgi ning kasutati Electroplus E10000 tõmbeteimi. Antud standardi järgi katseruumis temperatuur pidi olema 20 kraadi sooja (+- 2 kraadi). Kuressaare Meremajanduse keskuse katseruumis oli 22 kraadi sooja. See temperatuur garanteeriti tänu keskküttele. Enne katse algust viidi katsekehad atmosfääriga tasakaalu, et õhk voolaks vabalt läbi tekstiili. Tasakaaluks loetakse, kui järjestikusel 2 tunnilisel kaalumisel ei ilmne massi muutumist rohkem kui 0.25%. Standard

soovitas vähemalt 24h hoida katsekehasid toatemperatuuril, kuid tõmbeteimi ja katsekehade ettevalmistusega kulus rohkem aega ning hoiti kangarulli katseruumis enne eeltötlusi ja tõmbekatseid üle 48h.

Katsekehad tehti 1 komplekti kanga pikisuunas lõigatuna. Standardi järgi pidi tegema katsed ka kangarulliga ristisuunas lõigatud katsekehade, aga varasemalt punktis 1.4 selgituse järgi tehti ainult kangarulliga pikisuunas katsekehad. Iga erinev eeltötluse kuiv ja niiske komplekt koosnes 8 katsekehast, kuna katse standard nõudis vähemalt 5 õnnestunud katset. Katsekeha laius oli 100mm (+2mm) ja pikkus oli 160mm ning tõmbeteimi lõugade vaheline kaugus oli 100mm. Masina tõmbamiskiiruse oli 50mm/min. Igal katsekehal tõmmati ühest servast 38 mm kaugusele joon, mis on paralleelne lõime(pikikiu) lõngaga.

Niisked katsekehad asetati peale eeltötlusi 1 tunniks destilleeritud vette ning veest välja võttes suruti ajalehtede vahel üleliigne vee katsekehast välja.

Katsekehad kinnitati tsentraalselt nii, et selle pikisuunaline keskjoon läbis lõugade esiservade keskpunkti ja asetseks lõugade servadega risti, et katsekehale tõmmatud joon langeks kokku lõugade ühe servaga. Pärast ülemise lõua sulgemist välditi katsekeha reguleerimisel eelpinget piki alumise lõua juhtjoonega nii, et kangas ripuks oma raskuse all, kui alumine klamber on suleti.

Masin seati maksimaalsele jõule ning ülemine liigutatav klamber pandi liikuma ja pikendati katsekeha purunemiskohani.

Eeltötlusi oli 8 erinevat kuivades oludes ja 8 erinevat niisketes oludes. Igal eeltötlusele tehti 8 katsekeha, et saavutada igal katsekomplektil vähemalt 5 õnnestunud katset. Katsekehasid oli kokku 128 tk.

Tabel 2. Katsemaatriks

Töötused	Kordus	Leotuse variatsioonid	Kuivatusviisid	Katsekehade arv
Töötlemata	8	2	1	16
Leelis	8	2	2	32
Silaan	8	2	2	32
Destilleeritud	8	2	1	16
Atsetüül	8	2	2	32
Kokku				128

## 2 Katsete tulemused

Valmistatud katsekehade katseseeria tulemused on kajastatud käesolevas peatükis. Teostatud tõmbekatsete andmete analüüsiks kasutati Python programmeerimis keelt. Graafikute valmistamiseks kasutati Visual Studio Code programmi. Visual Studio Code võimaldas tehtud niiskete ja kuivade katsete tulemused kanda graafikule ning saada katsekehade maksimaalne tõmbejõu ja nihke andmed materjali purunemiseni. Katsekehade keskmiste graafikute tulemused ei ühtinud tabeli keskväärtustega, kuna igal katsel oli nihkepikkus erinev. Lisaks osad katsed ebaõnnestusid ja need on tabelitest ja graafikutest välja arvatud.

### 2.1 Ilma eeltöötluseta kuivad ja niisked katsed

Vastavalt katsemaatriksi tabelile 2 teostati ilma eeltöötluseta kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 8 ja niisketest 6 katset.

Joonisel 2 on kuvatud ilma eeltöötluseta kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

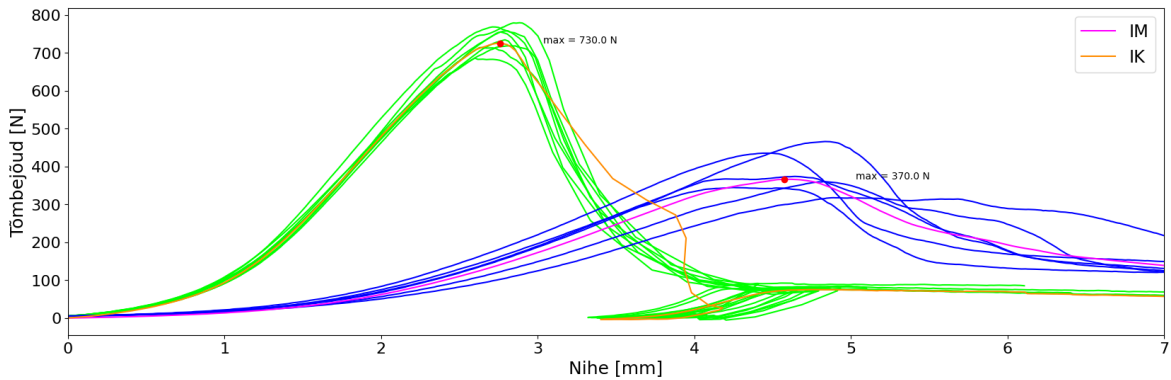
Katsete keskmiste tabelid 3 ja 4 näitavad, et niiskete katsekehade tõmbetugevus on 49% väiksem võrreldes kuivade katsekehadega. Nihe on lõugade vahelise kauguse purunemise hetke ja algse lõugade vahelise kauguse suhe, mis avaldub järgnevalt:

$$\delta = \frac{l_f - l_0}{l_0} * 100\% \quad (1)$$

Niiskete katsete nihe suurenes 85% võrreldes kuivadega. Jäikus on jõu ja nihke suhe, mis avaldub järgnevalt:

$$S = \frac{F}{\delta} \quad (2)$$

Nihke muutus näitab, et niiskete katsete jäikus vähenes 72%.



Joonis 2. Ilma eeltötluseta kuivad ja niisked katsed.

Tabel 3. Ilma eeltötluseta kuivad katsekehad.

	Mass [g]	Temp	Õhuniiskus	Tõmbejõud [N]	Nihe [%]
Katse nr,	Algne	[°C]	[%]	[N]	[%]
IK1	5,981	22	35	780	3,83
IK2	5,82	22	35	760	3,12
IK3	5,884	22	35	770	3,1
IK4	5,705	22	35	710	2,97
IK5	5,818	22	35	730	3,21
IK6	5,792	22	35	690	3,12
IK7	5,861	22	35	760	3,31
IK8	5,779	22	35	720	3,67
<b>Keskmine:</b>	<b>5,83</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>740</b>	<b>3,29</b>

Tabel 4. Ilma eeltötluseta niisked katsekehad.

	Mass [g]		Temp	Õhuniiskus	Tõmbejõud [N]	Nihe [%]
Katse nr	Algne	Niiske	[°C]	[%]	[N]	[%]
IM1	5,806	18,077	22	35	340	5,6
IM2	5,67	19,252	22	35	440	5,43
IM4	5,806	16,9	22	35	320	6,66
IM5	5,644	17,124	22	35	470	6,14
IM7	5,685	17,242	22	35	370	5,87
IM8	5,816	17,697	22	35	360	6,79
<b>Keskmine:</b>	<b>5,74</b>	<b>17,72</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>380</b>	<b>6,08</b>

## 2.2 Leelisega eeltöödeldud ning ahjus kuivatatud kuivad ja niisked katsed

Vastavalt katsematriksi tabelile 2 teostati leelisega eeltötluse kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 7 ja niisketest 8 katset.

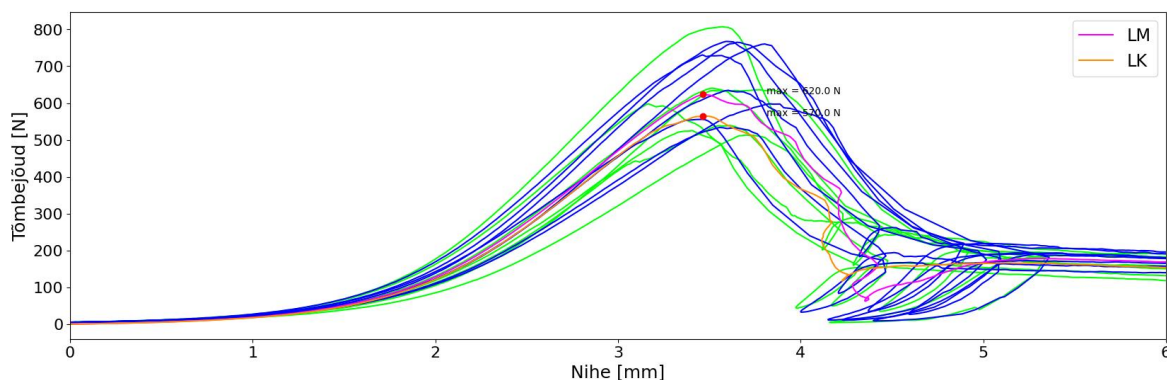


Joonisel 3 on kuvatud leelisega eeltöödeldud ning ahjus kuivatatud kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

Nihke arutamiseks kasutati valemit (1) ning jäikuse arutamiseks valemit **Tõrge! Ei leia viiteallikat..**

Katsete keskmiste tabelid 5 ja 6 näitavad, et niiskete katsekehade tõmbetugevus on 12% suurem võrreldes kuivade katsekehadega. Niiskete katsete nihe vähenes 3,7% võrreldes kuivadega. Nihke muutus näitab, et niiskete katsete jäikus suurenes 16%.

Leelisega eeltöödeldud kuivade katsekehade puhul on eeltöötusel negatiivne mõju, kuna tõmbetugevus vähenes 19%, nihe suurenes 64% ja jäikus vähenes 51% võrreldes ilma eeltöötluseta kuivade katsekehadega. Leelisega eeltöödeldud niiskete katsekehade puhul avaldas eeltöötlus positiivset mõju, kuna tõmbetugevus suurenes 76%, nihe vähenes 15% ja jäikus suurenes 106% võrreldes ilma eeltöötluseta niiskete katsekehadega.



Joonis 3. Leelisega eeltöödeldud ning ahjus kuivatatud kuivad ja niisked katsed.

Tabel 5. Leelisega eeltöödeldud ja ahjus kuivatatud kuivad katsekehad.

	Mass [g]		Temp	Õhuniiskus	Tõmbetugevus	Nihe
Katse nr,	Algne	Leelisega eeltöödeldud	[°C]	[%]	[N]	[%]
LK2	5,372	5,101	22	35	530	4,73
LK3	5,507	5,27	22	35	440	4,85
LK4	5,825	5,45	22	35	600	4,45
LK5	5,82	5,495	22	35	510	6,4
LK6	5,78	5,405	22	35	640	7,01
LK7	5,701	5,39	22	35	810	4,79
LK8	5,73	5,37	22	35	640	5,47
<b>Keskmine:</b>	<b>5,68</b>	<b>5,35</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>600</b>	<b>5,39</b>

Tabel 6. Leelisega eeltöödeldud ja ahjus kuivatatud niisked katsekehad.

Katse nr	Mass [g]			Temp	Õhuniiskus	Tõmbetugevus	Nihe
	Algne	Leelisega eeltöödeldud	Niiske	[°C]	[%]	[N]	[%]
LM1	5,668	5,258	18,575	22	35	600	5,7
LM2	5,625	5,295	17,182	22	35	640	4,86
LM3	5,692	5,312	16,58	22	35	760	5,09
LM4	5,751	5,422	16,613	22	35	770	4,95
LM5	5,972	5,6	17,681	22	35	560	5,16
LM6	5,951	5,578	17,193	22	35	730	4,61
LM7	5,998	5,63	16,602	22	35	770	5,86
LM8	5,957	5,786	16,875	22	35	530	5,3
Keskmine:	5,83	5,49	17,16	22	35	670	5,19

### 2.3 Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning ahjus kuivatatud kuivad ja niisked katsed

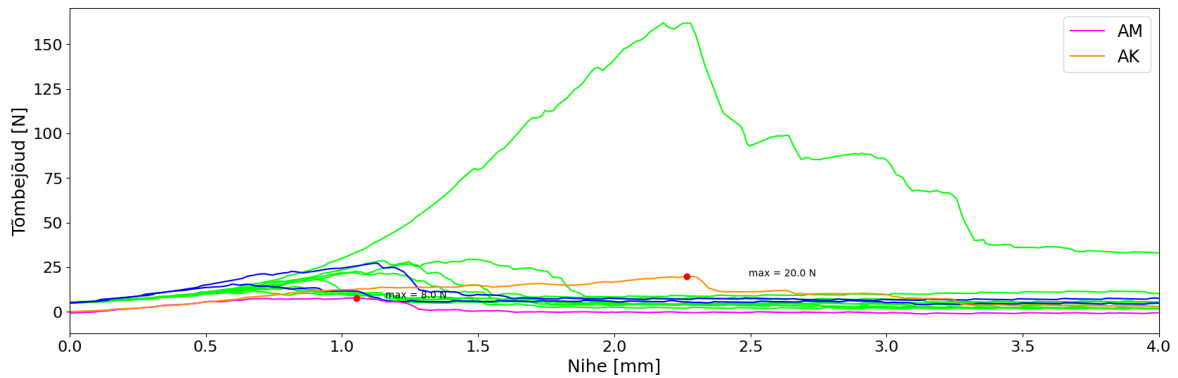
Vastavalt katsemaatriksi tabelile 2 teostati leelise ja atsetüüliga eeltöötuse kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 8 ja niisketest 3 katset.

Joonisel 4 on kuvatud leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning ahjus kuivatatud kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

Nihke arvutamiseks kasutati valemit (1) ning jäikuse arvutamiseks valemit **Tõrge! Ei leia viiteallikat.**

Joonisel 4 sinised jooned on niiskete katsete graafikud. Niiskete katsete tulemusi ei saa arvesse võtta, kuna standardi ISO 13934-2:2014 järgi peab olema vähemalt 5 õnnestunud katset, et neid analüüsida. Atsetüüli eeltöötuse käigus purunesid 5 katsekeha ja neid ei olnud võimalik tõmbeteimi vahel tõmmata.

Joonisel 4 kuivade katsete graafikud on eraldi näha joonisel 14. Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud kuivade katsekehade puhul mõjus eeltöötus negatiivselt, kuna tõmbetugevus vähenes 98%, nihe vähenes 24% ja jäikus vähenes 93% võrreldes ilma eeltöötusega kuivade katsekehadega.



Joonis 4. Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivad ja niisked katsed.

Tabel 7. Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ja ahjus kuivatatud kuivad katsekehad.

Katse nr,	Mass [g]			Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldud	Atsetüüliga eeltöödeldud				
AK1	5,52	5,695	5,143	22	35	14	1,88
AK2	5,748	5,78	5,474	22	35	19	2,03
AK3	5,557	5,592	5,291	22	35	14	2,42
AK4	5,529	5,57	5,052	22	35	22	2,78
AK5	5,849	5,892	5,445	22	35	29	2,24
AK6	5,876	6,1	5,608	22	35	29	2,81
AK7	5,702	6,055	5,568	22	35	160	3,38
AK8	5,992	6,02	5,563	22	35	12	2,47
<b>Keskmine:</b>	<b>5,72</b>	<b>5,84</b>	<b>5,39</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>37</b>	<b>2,5</b>

Tabel 8. Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ja ahjus kuivatatud niisked katsekehad.

Katse nr	Mass [g]				Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldud	Atsetüüliga eeltöödeldud	Niiske				
AM1	5,927	6,6	5,658	15,706	22	35	16	1,55
AM2	6,092	6,483	5,731	16,552	22	35	27	2,04
AM3	6,112	6,42	5,731	14,438	22	35	4	1,25
<b>Keskmine:</b>	<b>6</b>	<b>6,23</b>	<b>5,5</b>	<b>14,14</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>16</b>	<b>1,61</b>

## 2.4 Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivad ja niisked katsed

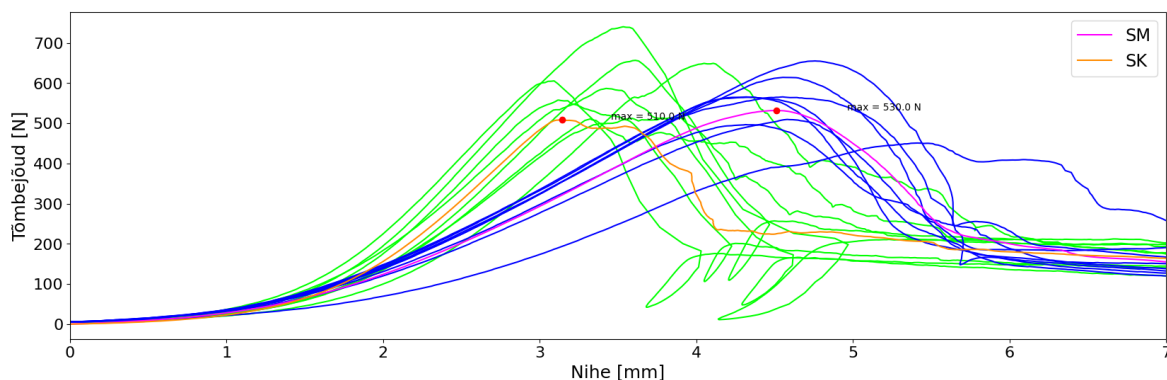
Vastavalt katsemaatriksi tabelile 2 teostati leelise ja silaaniga eeltötluse kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 8 ja niisketest 8 katset.

Joonisel 5 on kuvatud leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

Nihke arutamiseks kasutati valemit (1) ning jäikuse arutamiseks valemit **Tõrge! Ei leia viiteallikat.**

Katsete keskmiste tabelid 9 ja 10 näitavad, et niiskete katsekehade tõmbetugevus on 8% suurem võrreldes kuivade katsekehadega. Niiskete katsete nihe suurenes 14% võrreldes kuivadega. Nihke muutus näitab, et niiskete katsete jäikus vähenes 19%.

Leelise ja silaaniga eeltöödeldud kuivadele katsekehadele mõjus eeltöötlus negatiivselt, kuna tõmbetugevus vähenes 18%, nihe suurenes 46% ja jäikus vähenes 44% võrreldes ilma eeltöötluseta kuivade katsekehadega. Leelisega eeltöödeldud niisketele katsekehadele avaldas eeltöötlus positiivset mõju, kuna tõmbetugevus suurenes 47%, nihe vähenes 10% ja jäikus suurenes 64% võrreldes ilma eeltöötluseta niiskete katsekehadega.



Joonis 5. Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivad ja niisked katsed.

Tabel 9. Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ja ahjus kuivatatud kuivad katsekehad.

Katse nr,	Mass [g]			Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldud	Silaaniga eeltöödeldud				
SK1	5,656	5,458	5,274	22	35	740	4,47
SK2	5,666	5,453	5,177	22	35	650	5,51
SK3	5,827	5,562	5,278	22	35	660	4,61
SK4	5,761	5,61	5,174	22	35	510	5,33
SK5	5,576	5,27	4,929	22	35	610	4,36
SK6	5,64	5,277	4,921	22	35	590	4,67
SK7	5,628	5,328	4,941	22	35	560	4,33
SK8	5,833	5,551	4,999	22	35	520	5,14
<b>Keskmine:</b>	<b>5,7</b>	<b>5,44</b>	<b>5,09</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>610</b>	<b>4,8</b>

Tabel 10. Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ja ahjus kuivatatud niisked katsekehad.

Katse nr	Mass [g]				Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldud	Silaaniga eeltöödeldud	Niiske				
SM1	6,062	5,81	5,375	13,32	22	35	610	5,47
SM2	5,855	5,682	5,24	10,886	22	35	660	5,63
SM3	6,053	5,87	5,538	13,011	22	35	510	5,29
SM4	6,101	5,864	5,50	12,108	22	35	450	6,91
SM5	5,776	5,462	5,238	11,652	22	35	570	5,07
SM6	5,86	5,475	5,284	12,588	22	35	500	4,86
SM7	5,664	5,425	5,081	13,095	22	35	570	5,11
SM8	5,685	5,323	5,229	14,36	22	35	570	5,26
<b>Keskmine:</b>	<b>5,88</b>	<b>5,61</b>	<b>5,31</b>	<b>12,63</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>560</b>	<b>5,45</b>

## 2.5 Destilleeritud veega kuivad ja niisked katsed

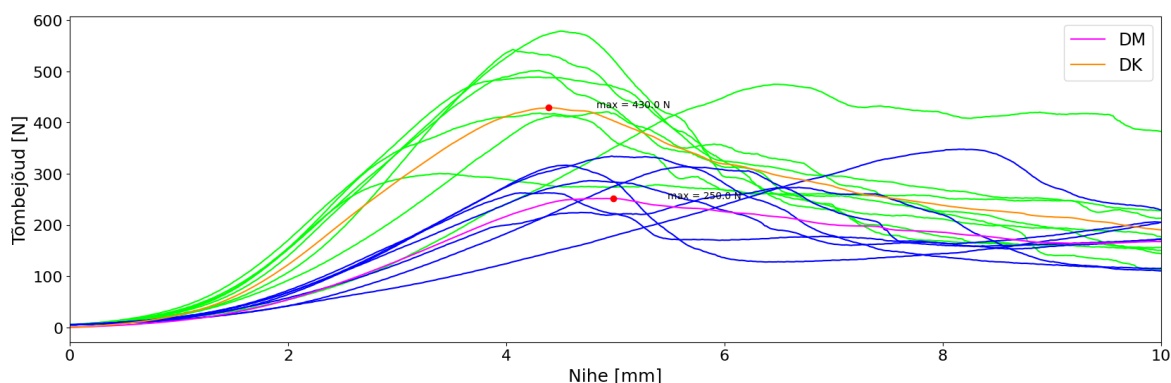
Vastavalt katsemaatriksi tabelile 2 teostati destilleeritud veega eeltötluse kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 8 ja niisketest 7 katset.

Joonisel 6 on kuvatud destilleeritud veega eeltöödeldud kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

Nihke arvutamiseks kasutati valemit (1) ning jääkuse arvutamiseks valemit **Tõrge! Ei leia viiteallikat..**

Katsete keskmiste tabelid 11 ja 12 näitavad, et niiskete katsekehade tõmbetugevus on 34% väiksem võrreldes kuivade katsekehadega. Niiskete katsete nihe suurenes 11% võrreldes kuivadega. Nihke muutus näitab, et niiskete katsete jäikus vähenes 40%.

Destilleeritud veega eeltöödeldud kuivade katsekehadele mõjus eeltöötlus negatiivselt, kuna tõmbetugevus vähenes 36%, nihe suurenes 104% ja jäikus vähenes 67% võrreldes ilma eeltöötluseta kuivade katsekehadega. Destilleeritud veega eeltöödeldud niisketele katsekehadele mõjus eeltöötlus negatiivselt, kuna tõmbetugevus vähenes 18%, nihe suurenes 22% ja jäikus vähenes 33% võrreldes ilma eeltöötluseta niiskete katsekehadega.



Joonis 6. Destilleeritud veega kuivad ja niisked katsed.

Tabel 11. Destilleeritud veega eeltöödeldud kuivad katsekehad.

Katse nr,	Mass [g]		Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Destilleeritud veega eeltöödeldud				
DK1	5,617	5,875	22	35	490	5,53
DK2	5,734	6,597	22	35	480	8,59
DK3	5,57	5,811	22	35	500	7,11
DK4	5,735	5,989	22	35	420	10,18
DK5	5,662	5,964	22	35	580	5,63
DK6	5,819	5,765	22	35	540	6,3
DK7	5,733	5,625	22	35	420	5,82
DK8	5,842	5,776	22	35	300	4,54
<b>Keskmine:</b>	<b>5,71</b>	<b>5,93</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>470</b>	<b>6,71</b>

Tabel 12. Destilleeritud veega eeltöödeldud niisked katsekehad.

Katse nr	Mass [g]			Temp	Õhuniiskus	Tõmbetugevus	Nihe
	Algne	Niiske		[°C]	[%]	[N]	[%]
DM1	5,921	19,75		22	35	350	11,01
DM2	5,597	19,133		22	35	270	8,68
DM3	5,84	20,344		22	35	260	6,97
DM4	6,079	21,166		22	35	320	5,72
DM6	5,786	20,356		22	35	310	7,38
DM7	5,717	20,291		22	35	290	5,93
DM8	5,757	20,706		22	35	340	6,36
Keskmine:	5,81	20,25		22	35	310	7,44

## 2.6 Leelisega eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed

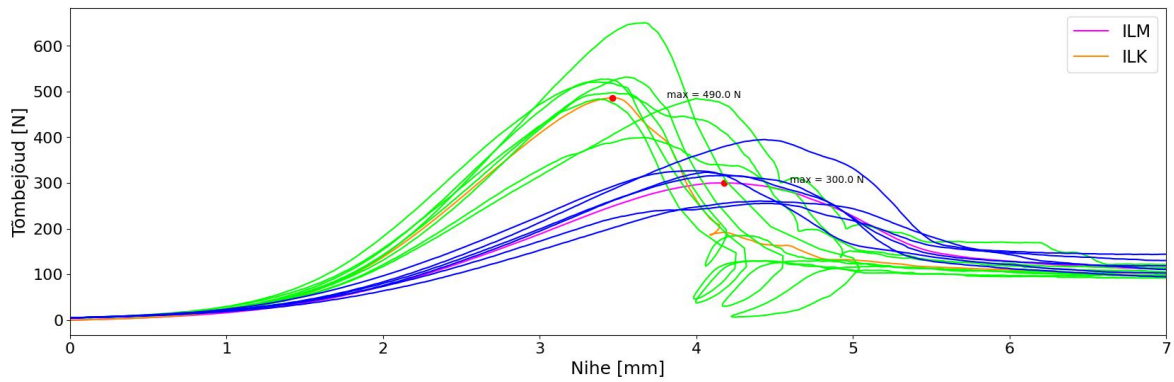
Vastavalt katsemaatriksi tabelile 2 teostati leelisega eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 7 ja niisketest 6 katset.

Joonisel 7 on kuvatud leelisega eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

Nihke arvutamiseks kasutati valemit (1) ning jäikuse arvutamiseks valemit **Tõrge! Ei leia viiteallikat.**

Katsete keskmiste tabelid 13 ja 14 näitavad, et niiskete katsekehade tõmbetugevus on 37% väiksem võrreldes kuivade katsekehadega. Niiskete katsete nihe suurenes 14% võrreldes kuivadega. Nihke muutus näitab, et niiskete katsete jäikus vähenes 45%.

Leelisega eeltöödeldud ja toatemperatuuril kuivatatud kuivadele katsekehadele mõjus toatemperatuuril kuivatamine negatiivselt, kuna tõmbetugevus vähenes 15%, nihe vähenes 9% ja jäikus vähenes 6% võrreldes ahjus kuivatatud leelisega eeltöödeldud kuivade katsekehadega. Leelisega eeltöödeldud ja toatemperatuuril kuivatatud niisketele katsekehadele avaldas negatiivset mõju toatemperatuuril kuivamine, kuna tõmbetugevus vähenes 52%, nihe suurenes 7% ja jäikus vähenes 55% võrreldes ahjus kuivatatud leelisega eeltöödeldud niiskete katsekehadega.



Joonis 7. Leelisega eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed.

Tabel 13. Leelisega eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad katsekehad.

Katse nr,	Mass [g]		Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldud				
ILK2	5,895	6,3	22	35	530	4,91
ILK3	5,735	6,105	22	35	650	4,83
ILK4	5,795	6,167	22	35	480	4,71
ILK5	5,7	5,977	22	35	500	4,77
ILK6	5,763	5,953	22	35	530	4,34
ILK7	5,75	5,953	22	35	400	5,38
ILK8	5,597	5,972	22	35	520	4,48
<b>Keskmine:</b>	<b>5,76</b>	<b>6,07</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>510</b>	<b>4,88</b>

Tabel 14. Leelisega eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud niisked katsekehad.

Katse nr	Mass [g]			Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldud	Niske				
ILM1	5,737	5,994	18,575	22	35	400	5,56
ILM2	5,49	5,511	17,182	22	35	260	6,52
ILM3	5,322	5,345	16,58	22	35	320	5,13
ILM4	5,407	5,474	16,613	22	35	320	5,16
ILM5	5,558	5,591	17,681	22	35	260	6,14
ILM7	5,52	5,492	16,602	22	35	330	4,82
<b>Keskmine:</b>	<b>5,51</b>	<b>5,57</b>	<b>17,21</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>320</b>	<b>5,56</b>



## 2.7 Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed

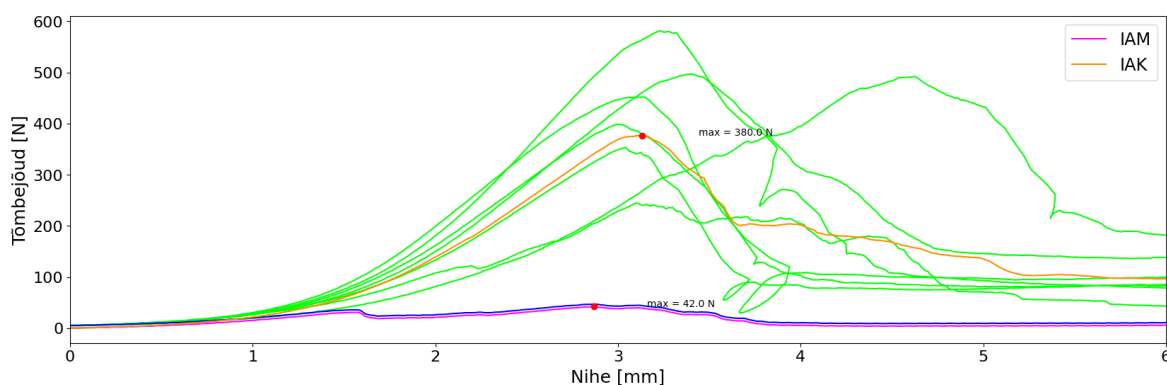
Vastavalt katsemaatriksi tabelile 2 teostati leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 7 ja niisketest 2 katset.

Joonisel 8 on kuvatud leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

Nihke arvutamiseks kasutati valemit (1) ning jäikuse arvutamiseks valemit **Tõrge! Ei leia viiteallikat.**

Joonisel 8 sinised jooned on niiskete katsete tulemused. Niiskete katsete tulemusi ei saa arvesse võtta, kuna standardi ISO 13934-2:2014 järgi peab olema vähemalt 5 õnnestunut katset, et neid analüüsida. Atsetüüli eeltöötamise käigus purunesid 6 katsekeha ja neid ei olnud võimalik tõmbeteimi vahel tõmmata.

Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ja toatemperatuuril kuivatatud kuivadele katsekehadele mõjus toatemperatuuril kuivamine positiivselt, kuna tõmbetugevus suurenes 1062%, nihe suurenes 89% ja jäikus suurenes 516% võrreldes ahjus kuivatatud leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud kuivade katsekehadega.



Joonis 8. Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed.

Tabel 15. Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad katsekehad.

Katse nr,	Mass [g]			Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödel tud	Atsetüüliga eeltöödeltud				
IAK1	5,864	5,47	5,976	22	35	240	4,38
IAK2	5,336	5,971	5,363	22	35	350	4,01
IAK3	5,82	6,755	5,763	22	35	450	4
IAK4	5,686	6,9	5,636	22	35	580	4,08
IAK5	5,886	7,752	5,794	22	35	400	5,14
IAK6	5,856	7,369	5,772	22	35	490	6,84
IAK7	5,476	6,43	5,41	22	35	500	4,59
<b>Keskmine:</b>	<b>5,7</b>	<b>6,66</b>	<b>5,67</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>430</b>	<b>4,72</b>

Tabel 16. Leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud niisked katsekehad.

Katse nr	Mass [g]				Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödel tud	ga eeltöödel tud	Niiske				
IAM6	5,554	5,56	5,925	17,645	22	35	47	7,65
IAM8	5,873	5,837	6,111	17,229	22	35	78	8,53
<b>Keskmine:</b>	<b>5,56</b>	<b>5,74</b>	<b>5,71</b>	<b>15,3</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>63</b>	<b>8,09</b>

## 2.8 Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed

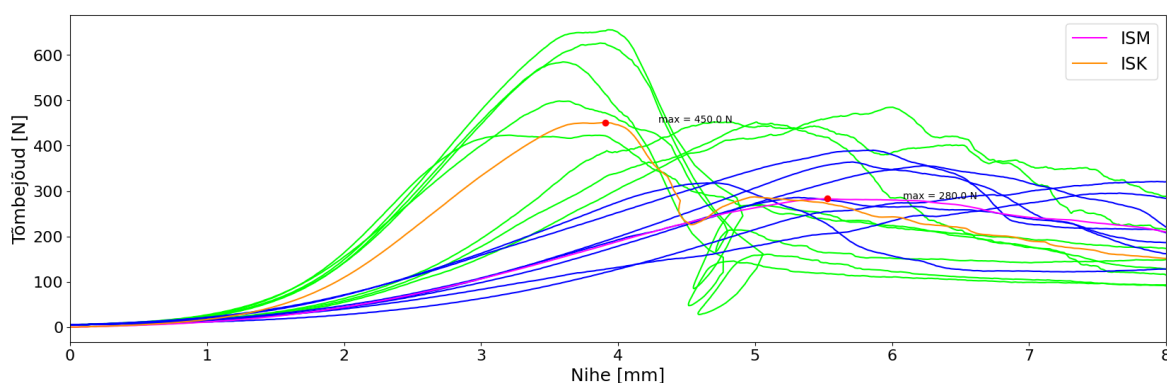
Vastavalt katsematriksi tabelile 2 teostati leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed. Kuivadest katsetest õnnestusid 8 ja niisketest 7 katset.

Joonisel 9 on kuvatud leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivade ja niiskete katsekehade tõmbejõu graafikud.

Nihke arvutamiseks kasutati valemit (1) ning jäikuse arvutamiseks valemit **Tõrge! Ei leia viiteallikat..**

Katsete keskmiste tabelid 17 ja 18 näitavad, et niiskete katsekehade tõmbetugevus on 37% väiksem võrreldes kuivade katsekehadega. Niiskete katsete nihe suurenes 116% võrreldes kuivadega. Nihke muutus näitab, et niiskete katsete jäikus vähenes 71%.

Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ja toatemperatuuril kuivatatud kuivadele katsekehadele mõjus toatemperatuuril kuivatamine negatiivselt, kuna tõmbetugevus vähenes 15%, nihe suurenes 29% ja jäikus vähenes 34% võrreldes ahjus kuivatatud leelise ja silaaniga eeltöödeldud kuivade katsekehadega. Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ja toatemperatuuril kuivatatud niisketele katsekehadele avaldas negatiivset mõju toatemperatuuril kuivamine, kuna tõmbetugevus vähenes 41%, nihe suurenes 144% ja jäikus vähenes 76% võrreldes ahjus kuivatatud leelise ja silaaniga eeltöödeldud niiskete katsekehadega.



Joonis 9. Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad ja niisked katsed.

Tabel 17. Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud kuivad katsekehad.

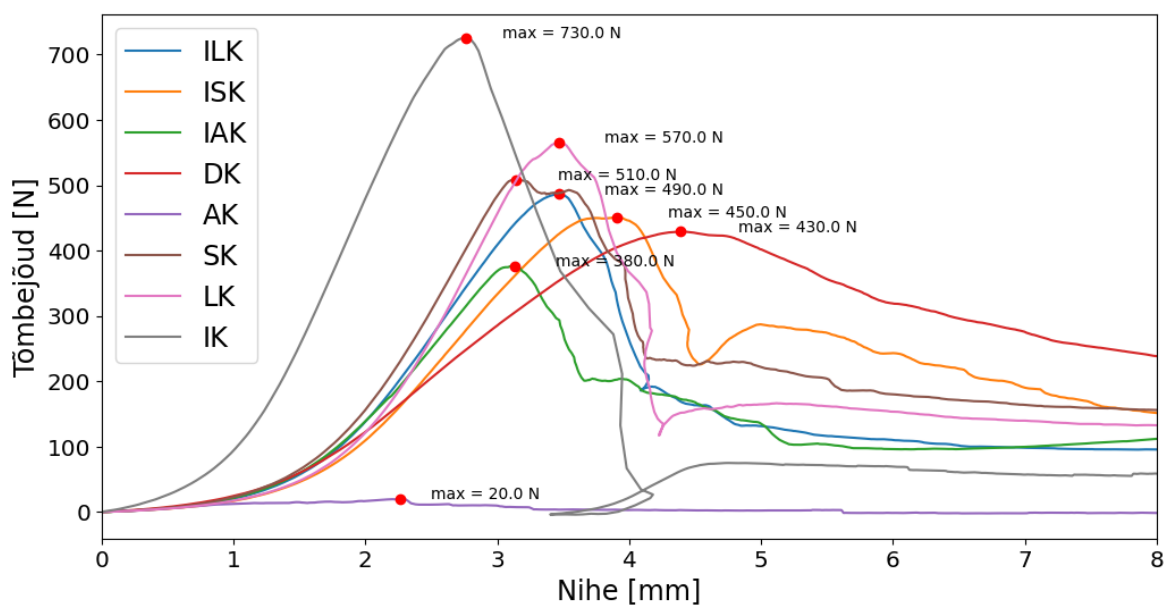
Katse nr,	Mass [g]			Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	eeltöödel tud	Silaaniga eeltöödeltud				
ISK1	5,7	6,288	5,562	22	35	480	9,05
ISK2	5,298	5,749	5,157	22	35	580	4,64
ISK3	5,11	5,99	5,31	22	35	450	7,8
ISK4	5,194	5,686	5,093	22	35	630	6,17
ISK5	5,525	5,915	5,524	22	35	450	7,62
ISK6	5,515	5,792	5,297	22	35	420	4,43
ISK7	5,658	5,982	5,52	22	35	660	5,09
ISK8	5,675	5,964	5,592	22	35	500	4,55
<b>Keskmine:</b>	<b>5,46</b>	<b>5,92</b>	<b>5,38</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>520</b>	<b>6,17</b>

Tabel 18. Leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning toatemperatuuril kuivatatud niisked katsekehad.

Katse nr	Mass [g]				Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	eeltöödel tud	eeltöödel tud	Niiske				
ISM1	6,234	6,475	6,01	20,62	22	35	320	18,85
ISM2	5,95	6,06	5,892	19,34	22	35	320	11,52
ISM3	6,039	6,176	5,265	17,76	22	35	290	9,92
ISM4	5,95	6,073	5,835	19,47	22	35	360	15,55
ISM5	5,859	5,967	5,753	19,62	22	35	360	13,71
ISM6	6,102	6,15	6,00	19,8	22	35	390	8,14
ISM8	5,443	5,361	5,827	19,87	22	35	300	15,46
<b>Keskmine:</b>	<b>5,94</b>	<b>6,04</b>	<b>5,8</b>	<b>19,5</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>330</b>	<b>13,31</b>

## 2.9 Kuivade katsete võrdlus

Tabel 19 näitab, et ilma eeltötluseta kuivadele katsekehadele tuli rakendada kõige rohkem jõudu, et kiud puruneksid. Kuivadele katsetele avaldasid eeltötlused negatiivset mõju.



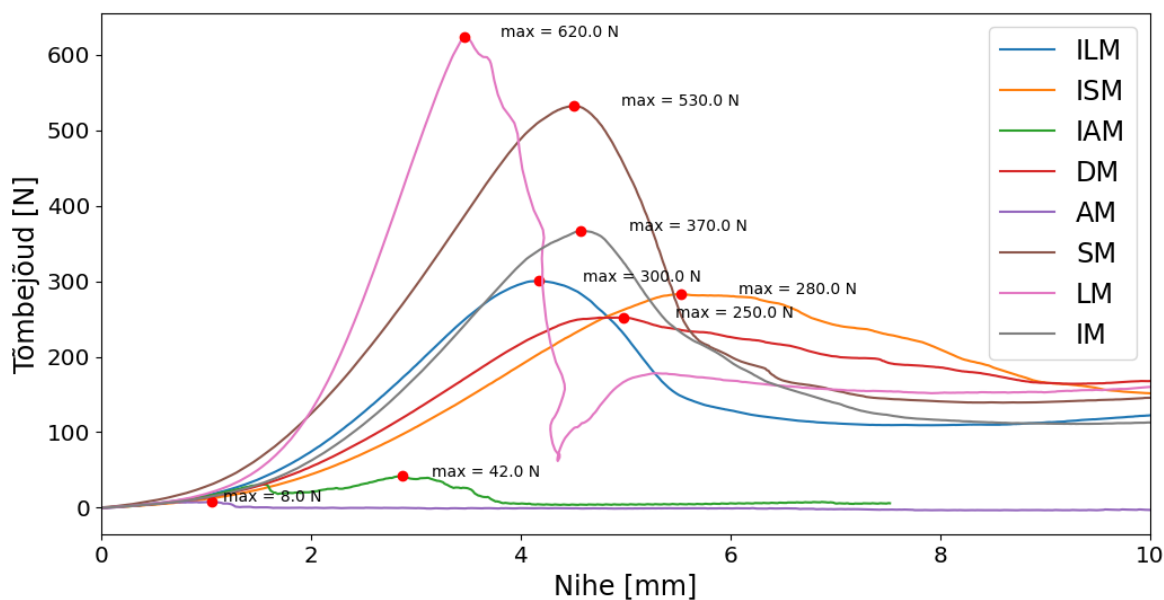
Joonis 10. Kuivade katsete võrdlus.

Tabel 19. Kuivade katsekehade võrdlus.

Katse nr,	Mass [g]			Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldud	Atseüüli/silaaniga eeltöödeldud				
IK	5,83			22	35	740	3,29
LK	5,68	5,35		22	35	600	5,39
AK	5,72	5,84	5,39	22	35	37	2,5
SK	5,7	5,44	5,09	22	35	610	4,8
DK	5,71	5,93		22	35	470	6,71
ILK	5,76	6,07		22	35	510	4,88
IAK	5,7	6,66	5,67	22	35	430	4,72
ISK	5,46	5,92	5,38	22	35	520	6,17

## 2.10 Niiskete katsete võrdlus

Tabel 20 näitab, et niisketes tingimustest oli vaja kõige rohkem jõudu rakendada leelisega eeltöödeldud katsekehadele. Niisketele katsekehadele mõjus leelise ja silaaniga eeltöötlus positiivselt, nende katsekehade rakendatav tõmbetugevus oli võrreldes teiste katsekehadega märgatavalt suurem.



Joonis 11. Niiskete katsete võrdlus.

Tabel 20. Niiskete katsekehade võrdlus.

Katse nr	Mass [g]				Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldatud	Atsetüüli/silaaniga eeltöödeldatud	Niiske				
IM	5,74			17,72	22	35	380	6,08
LM	5,83	5,49			22	35	670	5,19
AM	6	6,23	5,5	14,14	22	35	16	1,61
SM	5,88	5,61	5,31	12,63	22	35	560	5,45
DM	5,81			20,25	22	35	310	7,44
ILM	5,51	5,57		17,21	22	35	320	5,56
IAM	5,56	5,74	5,71	15,3	22	35	63	8,09
ISM	5,94	6,04	5,8	19,5	22	35	330	13,31

## 2.11 Ebaõnnestunud katsed

Ebaõnnestunud katsed olid katsed, mis hävisid eeltötluse ajal või tõmbeteimiga tõmbamisel, mille siire võrreldes sama eeltötlusega katsekehade oli märkimisväärselt erinev. Ahjus kuivatatud ja toatemperatuuril kuivatatud atsetüüliga eeltöödeldud niiskete katsekehade tulemusi ei saa analüüsida, kuna õnnestunud katseid ei olnud piisavalt.

Tabel 21. Ebaõnnestunud katsekehad.

Katse nr	Mass [g]				Temp [°C]	Õhuniiskus [%]	Tõmbetugevus [N]	Nihe [%]
	Algne	Leelisega eeltöödeldatud	Atsetüüli/silaaniga eeltöödeldatud	Niiske				
LK1	5,603	5,397			22	35	430	26,45
DM5	5,897			20,612	22	35	360	34,94
IM3	5,795			19,874	22	35	330	18,65
IM6	5,684			17,911	22	35	290	46,58
ILM6	5,442	5,441		17,193	22	35	260	45,47
ILM8	5,444	5,342		16,875	22	35	240	41,55
IAK8	5,716	6,245	5,777		22	35	370	25,82
ISM7	5,43	5,777	5,603	18,754	22	35	360	42,26

### **3 Analüüs**

Ahjus kuivatatud leelise (LM) ja silaani (SM) eeltötluste märgade katsekehade tulemused näitasid, et ahjus kuivatatud katsekehade tõmbetugevus oli märkimisväärselt suurem, kui ööpäev toatemperatuuril kuivatatud katsekehad.

Leelisega eeltööteldud katsekehad näitasid parimaid tulemusi märgades tingimustes. Kuivade katsekehade kiudude purunemiseks tuli rakendada kõige rohkem jõudu ilma eeltötlusega katsekehadele.

Atsetüüli ja leelisega märgade katsekehade katseid ei saa kasutada, kuna ei saadud kokku piisavalt ettenähtud õnnestunud katseid. Atsetüüliga eeltööteldud katsekehad näitasid väga kehvasid tulemusi võrreldes teiste katsekehadega. Siit võib järeldada, et atsetüüliga eeltötlusel sai atsetüül lahus üledoseeritud katalüsaatoriga. Selleks, et saada paremat ülevaadet atsetüüliga eeltötlusest tuleks katseid uuesti korrata.

#### **3.1 Edasiarenduseks**

Edasiarenduseks tuleks uuesti teha leelise ja atsetüüliga eeltötlus välja selgitamiseks, kas eeltötlus andis halvad tulemused katalüsaatori üledoseerimise tõttu. Lisaks tuleks teada saada, kuidas eeltötlused mõjutavad katsekehade biolagunemist. Kui katsekeha ei ole enam biolagundatav, kas on üldse biokomposiididel tulevikku. Kolmandaks tuleks uurida kuidas mõjutavad eeltötlused kiude ja maatriksi omavahelist nakkumist. (K.L. Pickering et al., 2015) artiklis leiti, silaan moodustas keemilised sidemed pinnakatete hüdroksüülrühmadega ja ei soodusta tugevaid sidemeid kiudude ja maatriksi vahel ning survekoormuse ajal tekivad paindepinged, mis aitavad kaasa maatriksi pragude tekkele.

## KOKKUVÕTE

Selles töös keskenduti biokiu eeltöötlustega hüdrofoobsuse suurendamisele ning seejärel tulemuste katselise valideerimisele. Katsete läbiviimisel lähtuti ISO 13934-2:2014 „Grab“ meetodi standarditest.

Tõmbekatsed tehti Electroplus E10000 tõmbeteimi vahel Kuressaare kolledži materjalilaboris. Katsetega mõõdeti pikikiudu suunatud kanepikiust katsekeha tõmbejõudu. Ebaõnnestusid atsetüüluga (AM ja IAM) katsed, seetõttu ei saanud nende katsekehade tulemusi analüüsida.

Analüütiliste arvutuste tegemiseks ning katsetest saadud andmete analüüsimiseks loodi Python'i baasil Visual Studio Code programm, mis on lõputööga esitatud failide hulgas (Kanepi keemiline tootlus.ipynb).

Katseliselt saadud leelisega eeltöötluste tulemused niisketes oludes suurenesid 76%, nihe vähenes 15% ja jäikus suurenes 106% võrreldes ilma eeltöötlusteta niiskete katsekehadega. Samas eeltöötlus avaldas negatiivset mõju kuivadele katsekehadele, siis leelisega eeltöötluste puhul olid tulemused kõige lähemal töötlemata biokiule. Märkimisväärne on, et leelisega eeltöödeldud niiskete katsekehade tõmbetugevus oli 12% suurem võrreldes kuivade katsekehadega.

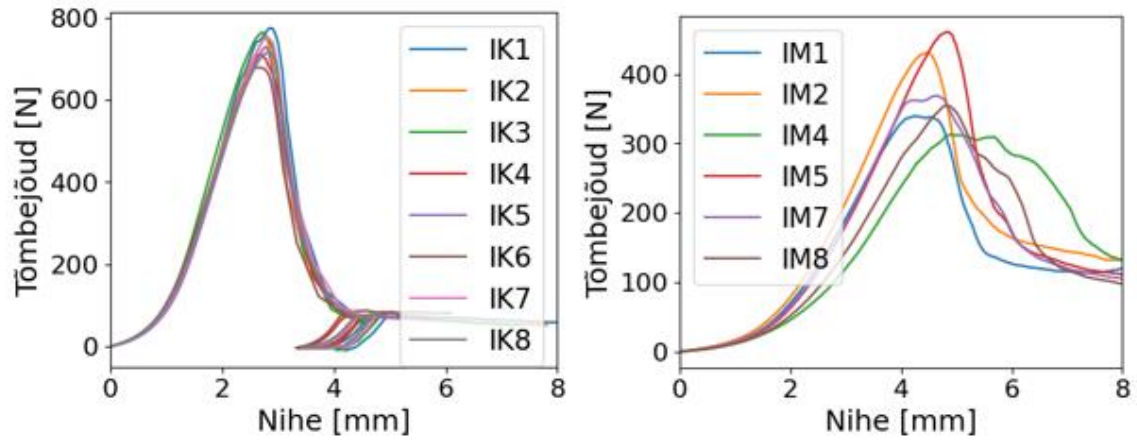


## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

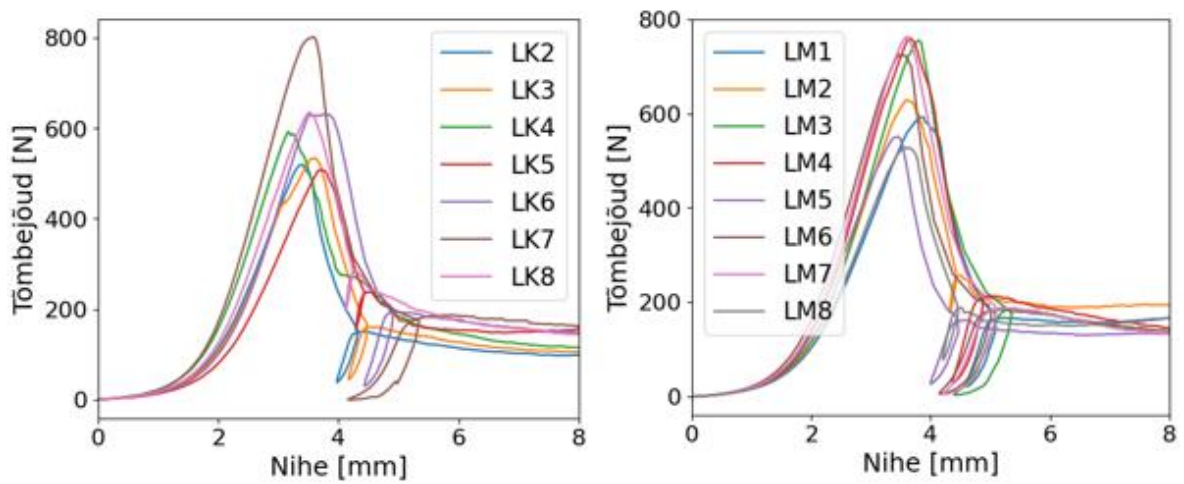
- Aly-Hassan Mohamed S. (2015). *Multifunctionality of Polymer Composites*.
- Badole S.L, Zanwar A.A, & Bodhankar S.L. (2013). *Bioactive food as dietary interventions for diabetes*.
- Daniil Arensburger. (2005). *KOMPOSITMATERJALID*.
- Jörg Müssiga, Stefano Amaducci, Alain Bourmaud, Johnny Beaugrandd, & Darshil U.Shah. (2020). *Transdisciplinary top-down review of hemp fibre composites: From an advanced product design to crop variety selection*. 2–2.
- Joshi S.V, Drzal L.T, Mohanty A.K, & Arora S. (2004). *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?*
- K.L. Pickering, M.G. Aruan Efendy, & T.M. Le. (2015). *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance*. 4–5.
- M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, & F. Cardona. (2013). *Tensile properties of chemically treated hemp fibres as reinforcement for composites*. 2.
- Nur Farhani Ismail, Nabilah Afiqah Mohd Radzuan, Abu Bakar Sulong, Norhamidi Muhamad, & Che Hassan Che Haron. (2021). *The Effect of Alkali Treatment on Physical, Mechanical and Thermal Properties of Kenaf Fiber and Polymer Epoxy Composites*. 1–9.
- S.J. Christian. (2016). *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*.
- Šults, A., & Kõrgesaar, M. (2022). *KANEPIKIUGA BOKOMPOSIIT-MATERJALIMADUSED*. 13.
- Thariq Mohamed, & Jawaid Mohammad. (2018). *Sustainable Composites for Aerospace Applications*.
- Vinayagamoorthy R. (2019). *Trends and Challenges on the Development of Hybridized Natural Fiber Composites*. 4–9.

## 4 LISAD

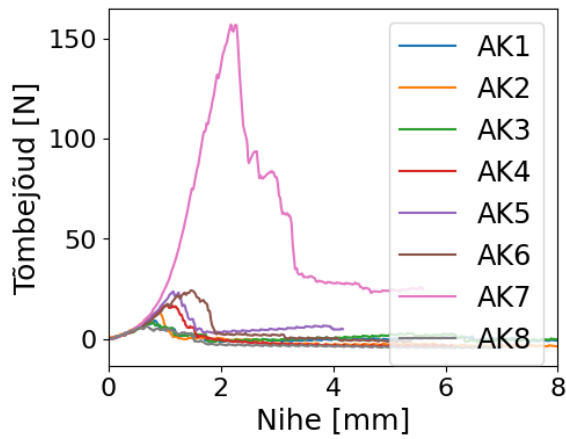
### 4.1 Eraldi ilma eeltöötluseta kuivad ja niisked katsed



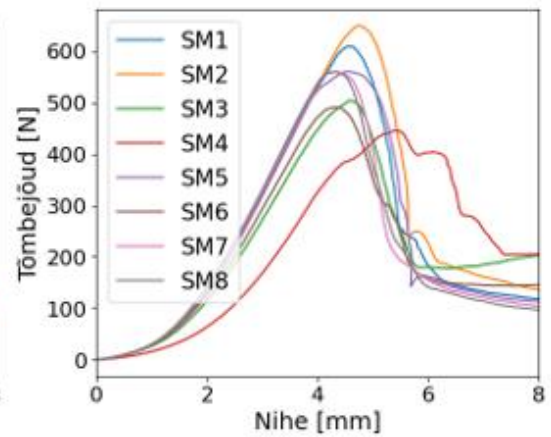
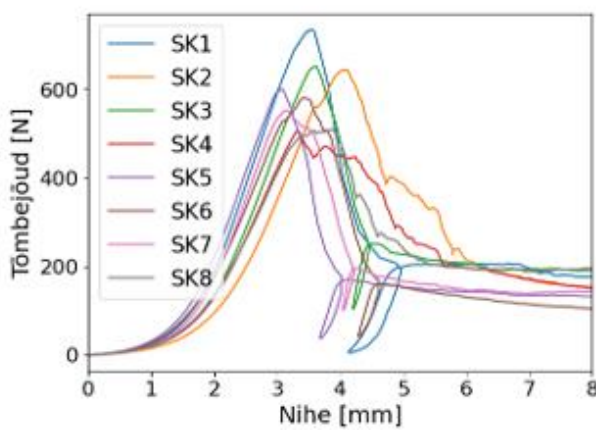
### 4.2 Eraldi leelisega eeltöödeldud ning ahjus kuivatatud kuivad ja niisked katsed



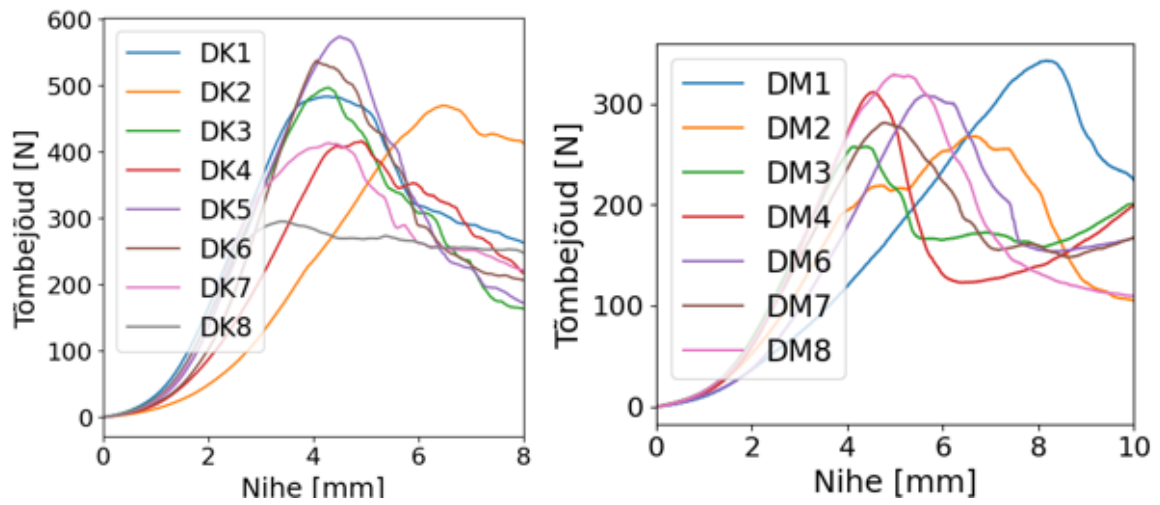
#### 4.3 Eraldi leelise ja atsetüüliga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivad katsed



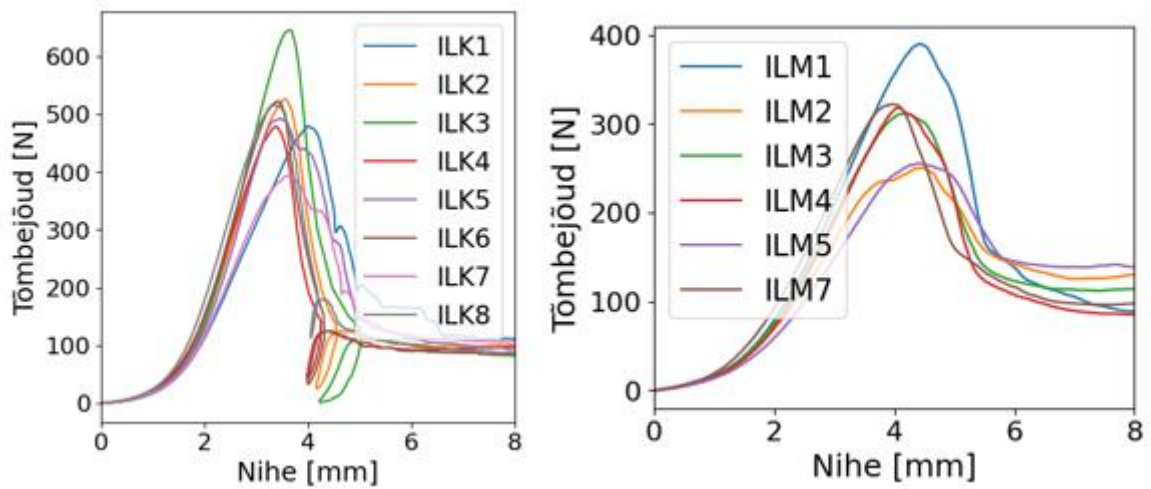
#### 4.4 Eraldi leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning ahju kuivatatud kuivad ja niisked katsed



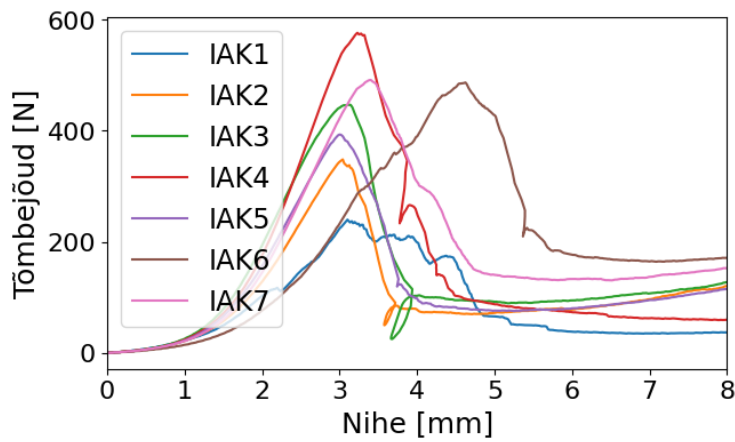
#### 4.5 Eraldi destilleeritud veega kuivad ja niisked katsed.



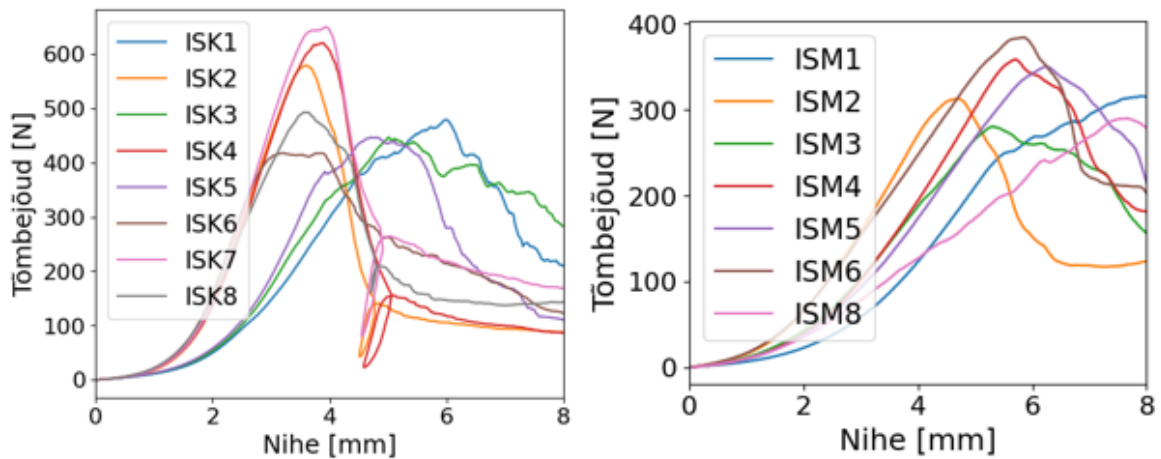
#### 4.6 Eraldi leelisega eeltöödeldud ning ilma ahjuta kuivatatud kuivad ja niisked katsed.



#### 4.7 Eraldi leelise ja atsetüüluga eeltöödeldud ning ilma ahjuta kuivatatud kuivad katsed.



#### 4.8 Eraldi leelise ja silaaniga eeltöödeldud ning ilma ahjuta kuivatatud kuivad ja niisked katsed.



#### 4.9 Repositooriumi failid

Kõik kasutatud andmed ja failid on selles repositooriumis <https://doi.org/10.48726/gm0pa-9h938>