



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

PILLIROOST POLÜMEERKOMPOSIITIDE MEHAANILISED OMADUSED

MECHANICAL PROPERTIES OF REED BASED POLYMER COMPOSITES

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Heleene Pak

Üliõpilaskood: 185118EANB

Juhendaja: Heikko Kallakas, teadur

Kaasjuhendaja: Percy Festus Alao,
doktorant-nooremteadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 1.06.2021

Autor: Heleene Pak

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 1.06.2021

Juhendaja: Heikko Kallakas

/ allkiri /

Kaasjuhendaja: Percy Festus Alao

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Heleene Pak

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Pilliroost polümeekomposiitide mehaanilised omadused, mille juhendaja on Heikko Kallakas,

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.

1.06.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise 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. jq 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Heleene Pak, 185118

Õppekava, peeriala: EANB61, Materjalitehnoloogia

Juhendaja(d): Dr. Heikko Kallakas +372 620 2910, doktorant Percy Festus Alao
+372 5324 5774

Konsultant: Sutu OÜ

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Pilliroost polümeerkomposiitide mehaanilised omadused*

(inglise keeles) *Mechanical properties of reed based polymer composites*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Eesmärgiks on uurida polüpropüleen (PP) ja polüpiimhappe (PLA) baasil valmistatud pilliroost polümeerkomposiitide mehaanilisi omadusi ning anda hinnang kumb komposiitmaterjal on sobilik ühekordsete või korduvkasutatavate nõude valmistamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Polüpropüleen komposiitsegu valmistamine	1.10.2020
2.	Komposiitplaatide valmistamine	15.11.2020
3.	Mehaanilised katsetused	15.12.2020
4.	Füüsikaline katsetus (UV katse)	25.01.2021
5.	Polüpiimhappe komposiitsegu valmistamine	10.03.2021
6.	Komposiitplaatide valmistamine	15.04.2021
7.	Mehaanilised katsetused	10.05.2021

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: Heleene Pak ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Heikko Kallakas ".....".....20.....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Percy Festus Alao
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
1.1 Komposiitmaterjalide olemus	9
1.2 Looduslikud komposiidid	10
1.2.1 Looduslikud kiud	10
1.3 Pilliroog	11
1.4 Looduslikes komposiitides kasutatavad polümeerid	12
1.4.1 Polümeermaatriks	12
1.4.2 Polüpropüleen (PP)	13
1.4.3 Polüpiimhape (PLA)	16
1.4.4 PLA segud	18
1.5 Looduslikud komposiidid maailma turul	18
1.6 Komposiitide valmistamise tehnoloogia	19
2 MATERJALID JA KATSEMEETODID	22
2.1 Materjalid	22
2.1.1 Polümeerid	22
2.2 Pilliroopulbri valmistamine	23
2.2.1 Kopaundimine ja granuleerimine	24
2.3 Komposiitplaatide valmistamine	25
2.4 Katsematerjalide välja lõikamine	25
2.4.1 Survevaluga katsekehade valmistamine	28
2.5 Katsekehade ettevalmistamine katseteks	29
2.6 Katsetused	30
2.6.1 Tõmbekatse	30
2.6.2 Paindekatse	32
2.6.3 UV katse	33
2.6.4 Tiheduse katse	35
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS	37
3.1 Tõmbeomadused	37
3.2 Paindeomadused	40
3.2.1 Painde elastsusmoodul	42
3.3 Värvuse ja läike muutus UV kiirguse toimetel	44
3.4 Tihedus	47
KOKKUVÕTE	49

SUMMARY	51
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	53
LISA 1. PPH 11012 polüpropüleenide omadused	57
LISA 2. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi tõmbetugevus	58
LISA 3. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi paindekatsede tulemused	60
LISA 4. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi UV katse tõmbetugevuse tulemused	62
LISA 5. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi UV katse paindetugevuse tulemused	65
LISA 6. Pilliroost polüpiimhappekomposiidi tõmbetugevus 1 BA	68
LISA 7. Pilliroost polüpiimhappekomposiidi paindetugevus tüüp 1 BA	71
LISA 8. Pilliroost polüpiimhappekomposiidi tõmbetugevus tüüp 1 A.....	74
LISA 9. Materjalide tihedused.....	76

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema sai valitud materjalitehnoloogia projekti alusel. Töö autor valis puidusuunaga projekti, mille pealkirjaks on „Pilliroost valmistatud polümeerkomposiitide valmistamine ja katsetamine“. Antud lõputöö tehti koostöös ettevõttega Sutu OÜ. Töö koostati ja põhilisemad andmed koguti TalTech Puidutehnoloogia laboris, kus töö autorit juhendasid dr. Heikko Kallakas ja doktorant Percy Festus Alao.

Lõputöö sisuks on valmistada looduslikke pilliroost polümeerkomposiite, mis suudaks asendada turul olevaid ühekordseid plastikust topse ja taldrikuid. Töös valmistatakse polümeerkomposiidi segust katseplaate, mida hiljem lõigatakse sobilikuks kujuks mõõtmete poolest. Katseplaatide sobilikke omadusi testitakse nii tõmbekatsel kui ka paindekatsel. Katse tulemuste põhjal selgitatakse, kas antud materjal on sobilik joogitopside ja ühekordsete nõude valmistamiseks.

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on suund vähendada plastist ühekordsete igapäevaesemete, nagu taldrikute, topside ja joogikõrte, tootmist ja kasutamist. Aina rohkem mõeldakse maailmas rohelisemale tootmisele ja pannakse rõhku taaskasutatavate keskkonnasõbralike materjalide kasutamisele.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on uurida polüpropüleen (PP) ja polüpiimhappe (PLA) baasil valmistatud pilliroost polümeerkomposiitide mehaanilisi omadusi ning anda hinnang kumb komposiitmaterjal on sobilik korduvkasutatavate nõude valmistamiseks. Antud bakalaureusetöö ülesanneteks on:

- Valmistada pilliroost polümeerkomposiitmaterjal, mida oleks võimalik kasutada ühekordsete või korduvkasutatavate nõude ja joogitopside valmistamiseks.
- Uurida komposiidi vastupidavust mehaanilistele ja füüsikalistele katsetustele.
- Võrrelda sünteetilise ja biopolümeeri mehaanilisi omadusi ja sobivust pilliroost biokomposiidi valmistamiseks.

Bakalaureusetöö eksperimentaalne osa hõlmab pilliroo, polüpropüleen (PP) ja polüpiimhappe (PLA) baasil komposiitide valmistamist, millele tehakse seejärel mehaanilised omadused tõmbe- ja paindekatsetega. Lisaks teostatakse ka UV katsetused, et selgitada välja, kuidas UV kiirgus mõjutab katsekehade värvust, läiget ja mehaanilisi omadusi. Varasemad teadusuuringud on katsetatud töötlemata ja bensüülitud pilliroost kiude polüstüreeni, polüpropüleen, formalaldehüüdi, kõrge tihedusega polüetüleen matriksis täiteainena, kus kahe erineva täiteaine sisaldus võib olla 30-40 % [1, 2].

Antud lõputöö käsitleb pilliroog polüpropüleen komposiiti ning pilliroog polüpiimhappe komposiiti, mille komponentide vahekorrad on 50/50 massi järgi. Bakalaureusetöö on ülesehitatud kolme suurema peatükina. Töö ülesehitusel on lähtunud töö eesmärgist ja esitatud nõuetest. Töö esimeses osas tutvustatakse komposiitmaterjale ning töös kasutatavaid plastikuid ja pilliroogu. Tuuakse välja nende omadused ning üldised komposiitide valmistamise meetodid. Teises osas kirjeldatakse katsekehade valmistamist ning katsemeetodeid. Kolmandas osas tuuakse välja katsetulemused ja nende analüüs ning lisaks analüüsile ja tulemustele põhinev kokkuvõte.

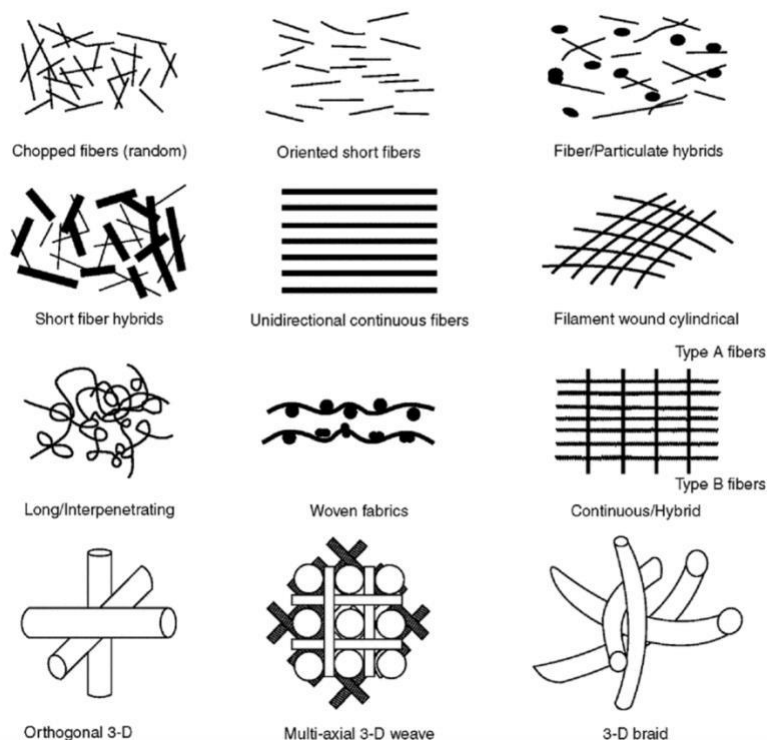
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Komposiitmaterjalide olemus

Komposiitmaterjalid on mitme komponendilised materjalid, mida valmistatakse kombineerides vähemalt kahte või enam, sageli erinevate omadustega materjali. Praktikas tavaliselt leiab seletust selline põhimõte, kus kahe või enama komponendi ühendamisel tuuakse mõlema materjali paremad ja soovitud omadused välja, leevendades vähem soovitud omadusi. Komposiidid võivad koosneda nii naturaalsest produktist kui ka rohkem tehiskumast [3]. Komposiitmaterjalides kasutatavad maatriksid võivad olla:

- Metall;
- Polümeerid;
- Tsement;
- Keraamika.

Täiteainena/sarrusena kasutatakse mitmeid kunstlikke ja looduslikke aineid erinevas vormis, näiteks kiuline, nanoosakesed, peeneks hajutatud, mikro hajutatud (joonis 1.1.1) [3].



Joonis 1.1.1 Sarruse struktuurid [3].

Komposiitmaterjalid on moodustunud kahest või enamast osast faasist, kus üks osa annab jäikuse ja tugevuse, teine osa plastse ja elastse struktuuri, milles koostisosad

moodustavad maatriksi ning täiteained, mis võivad anda komposiidile mitmeid tähtsaid omadusi. Polümeerkomposiite võib klassifitseerida looduslike või sünteetiliste kiududega tugevdatud biopõhised polümeerkomposiidid ning kiud- või sünteetiliste kiududega tugevdatud sünteetilised polümeerkomposiidid. Suuremas osas valitakse komposiite jäikuse, tugevuse, kaalu, kõrge temperatuuri, korrosioonikindluse, kõvaduse, juhtivuse või tasuvuse poolest [3, 4].

1.2 Looduslikud komposiidid

1.2.1 Looduslikud kiud

Tänapäevane ökoloogiline mure on põhjustanud suure huvi looduslike materjalide vastu ning uute materjalide ja toodete kasutuselevõtmisel on üha olulisemad kriteeriumid nagu taaskasutatavus ja keskkonnasõbralikkus. Looduslikud kiud on viimasel ajal märkimisväärset huvi pakkunud insenerikomposiitides tugevdajana [5]. Looduslikud kiud jagunevad nende päritolu põhjal, pärinedes taimedest, loomadest või mineraalidest. Komposiitides kasutatakse peamiselt täiteainena taime kiude, mis jagunevad kuute suuremasse gruppi:

- Niinekiud (lina, kanep, džüüt);
- Seemnekiud (puuvill);
- Lehekiud (abaka, sisal);
- Roostikud;
- Muud tüübid (puit ja juurestik) [6].

Naturaalsetel kiududel on tavaliselt diameeter suurusjärgus 10 μm ja neid peetakse komposiitmaterjaliks, kuna nad koosnevad primaarsest rakuseinast ja kolmest sekundaarsest rakuseinast. Rakusein koosneb mikrofibrillidest, mis on juhuslikult orienteeritud. Mikro fibrillide nurk kiudtelje suhtes omab suurt rolli kiudude omadustes, näiteks väiksemad nurgad annavad kiule tugevuse ja jäikuse. See eest suuremad nurgad annavad kiule nõtkuse. Kliimatingimused ja vanus mõjutavad lisaks kiudude struktuurile ka keemilist koostist. Tselluloos on kõigi taimekiudude oluline komponent. Peale tselluloosi koosnevad taimed ka hemitselluloosist, lingiinist ja veeslahustuvatest ainetest [7].

Kasutatav kiudude töötlemise tehnoloogia tüüp on üks kiudainete kvaliteedi olulistest kriteeriumidest. Ainete mikroobne rikkumine algab kiust kohe pärast varre südamiku

kuivamist ja jätkab seda sõltuvalt keskkonnatingimustest. Kiud valmistatakse tavaliselt ette järgmiste protsessidena: kiudude omaduste homogeniseerimine; polümerisatsiooni ja kristalliseerumise astmed; hea adhesiooni tekitamine kiudude ja maatriksi vahel; niiskust tõrjuva toime lisamine; ja leegiaeglustite lisamine [7]. Looduslikud kiud pakuvad mitmeid eeliseid:

- Taimekiud on taastuv tooraine ja nende kättesaadavus on enam-vähem piiramatult;
- Looduslike kiudude abrasiivne omadus on madalam, mis toob eeliseid tehnilise materjalide ringlussevõtu või komposiitmaterjalide protsessi osas üldiselt;
- Loodusliku kiuga tugevdatud plastid, kasutades maatriksina biolagunevaid polümeere on kõige keskkonnasõbralikumad materjalid, mida saab nende olemusringi lõpus kompostida [7].

Looduslikud kiud sobivad termoreaktiivide kui ka termoplastide tugevdamiseks nende suhteliselt kõrge tugevuse, jäikuse ja väikese tiheduse tõttu (tabel 1.2.1) [7].

Tabel 1.2.1 Erinevate looduslike kiudude mehaanilised omadused [7]

Kiu materjal	Tihedus (g/cm³)	Pikenemine (%)	Tõmbetugevus (MPa)	Youngi moodul (GPa)
Vill	1,5-1,6	7-8	287-597	5,5-12,6
Džuut	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Lina	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Kanep	-	1,6	690	-
Ramjee	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Sisalkiud	1,5	2-2,5	511-635	9,4-22

1.3 Pilliroog

Eelnevalt toodi välja komposiitides kasutatavad erinevad looduslikud kiud. Üheks olulisemaks looduslikuks komposiitmaterjaliks loetakse pilliroogu. Pilliroog on üks levinumaid ja kõrge tootlikkusega märgalataimi maailmas. Tänu oma loodussõbralikkusele loetakse teda taastuvaks ressursiks, Eestis looduslikult kasvav pilliroog on Euroopas hinnaline ehitusmaterjal [2,8].

Ladinakeelse nimetusega *Phragmites Australis* ehk harilik pilliroog võib kasvada 1,5 m või isegi 4,5–6 m kõrguseks. Eriti sobivad nende taimede kasvukohaks vee- ja maismaa piir, siseveekogude ääred ja mererannikud. Pilliroog on kõrreliste sugukonda kuuluv taim, mida iseloomustavad teravaservalised karedad lehed ja suur peopesa suurune

õisik [8]. Kuna pilliroog on väga kiiresti kasvav, lõigatakse seda sageli, muutes tooraine laialdaselt kättesaadavaks. Pilliroog on üks vanimaid looduslikke ehitusmaterjale. Erinevad kultuurid üle kogu maailma on oma suurepärase omaduste tõttu kasutanud pilliroogu ehitusmaterjalina, kombineerituna tavaliselt mudaga ja puiduga, luues tuhandeid aastaid varjupaike [2]. Enamikus piirkondades koristatakse pilliroogu talvel. Kui kliima on piisavalt külm, vähendab see koristamiskulusid. Lisaks kulukokkuhoiule vähendab konflikti looduskaitsega (nt pesitsevad linnud). Vastupidi talvele, annab suvel koristamine pilliroole suurema toitainesisaldusega biomassi. Saagikuse määravad peamiselt kliima (päikesekiirgus, temperatuur), veevarustus, mulla ja vee soolsus ning toitainetega varustus [9].

Pilliroog on liik, millel on palju erinevaid kasutusviise: väga tuntud on selle varte või keppide kasutamine onnide, katuste, aedikute jms ehitusmaterjalina, olenemata sellest, kas need on üksikult paigutatud või ühendatud. Haljastuses kasutatakse pilliroogu piirdeaedade, tuuletõkke seinte, ruloode ja puude kaitsmise materjalina. Pilliroo heast poorsusest tulenevad head isolatsiooniomadused. Samuti on pillirool vastupidavus kõrge ränidioksiidi ja vaha sisalduse tõttu [2]. Praegused pilliroo kasutamise võimalused saab jagada tööstuse, energeetika, põllumajanduse ja veepuhastuse kasutusalaadeks [9].

Uuringutega on välja toodud, et pilliroo varre ja termoplastset polümeeri sisaldaval komposiidil võib olla suurepärase sidumistugevus ja suur tihedus ning suurepärase tugevus (tõmbetugevus, paindetugevus, löögitugevus ja painduvus). Seda saab kasutada ehitusmaterjalide jaoks, sealhulgas sisematerjalid (põrandakattematerjal, sisematerjal, mööblimaterjal, müratõke ning ukсед ja aknad), haljastusmaterjal (reeling, piirdeaed, sulgur ja post) ning välisseinale paigaldatud välimaterjal hoonele. Mehaaniliste omaduste tulemuste põhjal võib järeldada, et pillirool on komposiitplaatide tootmise toorainena potentsiaali [10].

1.4 Looduslikes komposiitides kasutatavad polümeerid

1.4.1 Polümeermaatriks

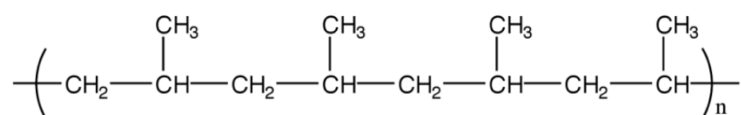
Polümeerid on ideaalsed maatriksmaterjalid, kuna neid saab töödelda kergesti ja nad pakuvad soovitud mehaanilisi omadusi. Kaks peamist maatriksmaterjalina kasutatavat tüüpi on termoplastid ja termoreaktiivid [3].

Termoreaktiivid on pärast kõvenemist hästi seotud 3D- molekulaarstruktuuriga. Antud polümeerid ei sula, vaid kõvenemisel lagunevad ning neid saab hoida osaliselt kõvenenud kujul pikemat aega. Seega on nende kasutamine suhteliselt paindlik. Termoreaktiivid leiavad rakendust hakitud kiudkomposiitvormis, eriti eelnevalt segatud või vormimisseguna. Sobivad ka hästi kiudkomposiitide jaoks ja struktuuriliseks insenerirakenduseks. Peamisteks termoreaktiivseteks polümeerideks on epoksiidid, polüestrid, fenoolid ja polüimiidid [3].

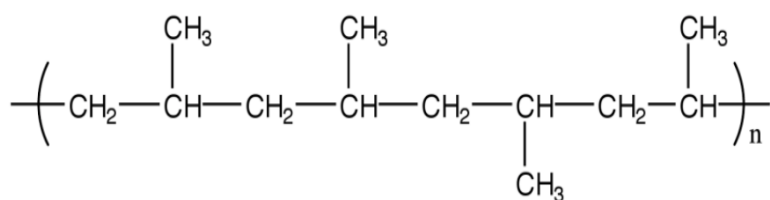
Termoplastidel on ühe- või kahemõõtmeline molekulaarne struktuur, nad on võimelised kõrgendatud temperatuuridel pehmenema ja sulama. Nad leiavad suuremat kasutamist ja on muutunud enimkasutatavateks komposiitide rühmaks. Termoplastiliste süsteemide eelised termosettide ees: pole keemilisi reaktsioone, mis sageli tekivad gaasi või soojuse eraldumisel. Tootmisele kuluvat aega on võimalik optimeerida, vähem aega kulub struktuuri kuumutamise, kujundamise ja jahutamise peale. Täiteainete lisamine suurendab termoplastide kuumakindlust. Miinuseks võib pidada seda, et mingil määral kõik termoplastsed komposiidid kipuvad kõrgemal temperatuuril tugevust kaotama [3].

1.4.2 Polüpropüleen (PP)

Polüpropüleen on termoplastne polümeer, mis saadakse ahelpolümerisatsiooni tulemusena, tema molekulide polümeriseerimisega pikkadeks polümeeri molekulideks. Makromolekul koosneb 10000 kuni 20000 monomeeri ühikust. Metüülrühmade paigutus ahela iga teise süsiniku külge võib varieeruda. Kui kõik metüülrühmad on spiraalahela molekuli samal pool, on tegemist isotaktilise polüpropüleeniga ehk kristalliseerumisvõimet omava polüpropüleeniga (joonis 1.4.1). Kui ripatsrühmad paiknevad juhuslikul viisil spiraalahelal, tekib halvemate omadustega pehme, kleepuv amorfne ataktiline PP ehk Poolkristalliline PP (joonis 1.4.2) [11,12].



Joonis. 1.4.1 Isotaktiline polüpropüleen [11].



Joonis. 1.4.2 Ataktiline polüpropüleen [11].

Polüpropüleen on mitmekülgne termoplastiline materjal, mis ühildub paljude töötlemistehnikatega. Peamisteks töötlemistehnikateks on ekstrusioon, survevalu ning pressimine. Polüpropüleen on üks kergemaid termoplaste (tihedus on $0,9 \text{ g/cm}^3$). Suure tugevuse ja kaalu suhte tõttu on see rohkem jäigem kui teised polüolefiinid. Polüpropüleeni sulamistemperatuuriks on $160\text{--}170 \text{ }^\circ\text{C}$ [12].

Aastatega on polüpropüleen muutunud insenerialasel praktikal kasulikuks polümeeriks. Polüpropüleenil on palju häid omadusi: suhteliselt madal hind, suurepärase keemiline vastupidavus, hea töödeldavus ning võimalus muuta tema mehaanilisi omadusi lisades talle täiteaineid ja tugevdusi [12]. Lisaks on polüpropüleenil head mehaanilised, soojuslikud, füüsikalised omadused toatemperatuuri juures (tabel 1.4.1) [12]. Suhteliselt madala töötlemistemperatuuri tõttu peetakse polüpropüleeni üheks peamiseks polümeerseks matriksmaterjaliks termoplastsete ja biokiudkomposiitide jaoks. Madal töötlemistemperatuur on vajalik naturaalse kiudude stabiilsuse pärast [13].

Tabel 1.4.1 Modifitseerimata polüpropüleeni mehaanilised, soojuslikud, füüsikalised omadused [13]

Omadused	PP
Paindemoodul (GPa)	1,5
Tõmbetugevus (MPa)	33
Tihedus (g/cm^3)	0,905
Erimoodul (GPa)	1,66
Sulamistemperatuur ($^\circ\text{C}$)	120-176
Pinna kõvadus (R- skaala)	RR90
Maksumus (€)	660

Biokomposiitide pidev arendamine viib üha täiuslikemate matriksite leidmisele. Tänu PP suurepärasele omadustele katsetavad ja arendavad teadlased polüpropüleeni ja looduslike kiude polümeermaatriksina. Katsed on suunatud peamiselt tõmbetugevus- ja paindetugevuse, löögitugevuse ja mikrokõvaduse uurimisele. Katsetusi on tehtud puidukiududega, bambuse, pilliroo, kanepi, abaka ja džuudiga [14].

Lisaks on teadlased teinud katseid puitplastkomposiitide (WPC) valmistamiseks, kasutades ära puidutööstuse erinevaid kõrvalsaadusi. Oma uurimustes tugineti kasevineeri tootmise kõrvalsaaduste lihvimistolmu (PSD) ja polüpropüleeniga maatriksile [16]. Peamisteks mehaanilisteks katsetusteks sooritati paindekatsed ja tõmbekatsed. Näiteks tugevdati töötlemata ja bensüülitud pilliroogu polüpropüleeniks ning saadud komposiiti iseloomustati mehaaniliste omaduste (tõmbetugevus ja paindetugevus) abil [1].

Puitplastkomposiidis (WPC) modifitseeriti täiteainet maleiinanahüdriid-polüpropüleeniga [15]. PP biokomposiitide paindetugevused ja elastsusmoodulid sõltusid kiu jäikusest, nende orientatsioonist materjalis ja mahu sisaldusest biokomposiidis [14].

Lähtudes uuringu katsete tulemustest on täheldatud, et bensüleeritud pilliroost polümeerkomposiidi painde- ja tõmbetugevus oli suurem kui puhta polümeeri omal, töötlemata pilliroo komposiitmaterjalide samad omadused olid vastupidi madalamad kui puhta polümeeri omadused. Kiudainesisalduse suurenemisega 30% -lt 40% -le täheldati paindetugevuse kerget halvenemist, kuid tõmbetugevus siiski suurenes. Painde- ja tõmbemoodul suurenesid mõlema kiudainesisalduse osas suuresti peamiselt töötlemata või bensüülumata kiudude olemasolu tõttu [1].

Näiteks saadi tulemused polümeeri ja puidukiudude omavahelisest seosest ja sellega tulenevast tõmbetugevuse mõjutusest. Tõmbetugevus sõltub komposiitide kõige nõrgemast osast, kui PP ja puidukiudude vaheline interaktsioon on nõrk. Katsetuste käigus tuvastati 10 massiprotsendi puuvillakiudude lisamisel tõmbetugevuse vähenemist, 20 ja 30 massiprotsendi puuvillakiudude lisamisel tõmbetugevuse suurenemist ja seda puuvillakiudude rabaduse tõttu [1].

60/40 massiprotsendi maatriksi ja kiu suhte korral on puidukiududega võimalik saavutada materjali paindemooduli/elastsusmooduli peaaegu 4-kordne suurenemine, samas kui kanepi kiud võivad suurendada kuni 6 korda. Tulemuste põhjal võib järeldada, et biokomposiitide omadusi mõjutavad peamiselt kiudude mehaanilised omadused [16].

Bambuse-polüpropüleeniga (PP) komposiitidel järelitati märkimisväärselt head painduvus omadused, mille tulemusena nad sobivad asendama tänapäeval autotööstuses kasutatavaid klaaskiude. Antud uuringus vaadeldi kiudude ja polümeeri sobivust komposiidis ehk biolagunemise kiirust. Täheldati, et lagunemine toimub piirkondades, kus kiud jäävad füüsilise jõu tõttu maatriksile kinnitamatuks ehk nakkumine ei toimu. Lisaks uuriti mehaanilisi omadusi ja järelitati, et leelise ja atsetüüli eeltöötlemise mõjul

paranesid bambuse-PP komposiidi mehaanilised omadused, samuti suurenes adhesioon bambuskiu ja polüpropüleenmaatriksi vahel [17]. Kasevineeritolmu komposiidil täheldati head siduvust polüpropüleenimaatriksiga, tulemustest nähti positiivset mõju komposiidi omadustele [15].

1.4.3 Polüpiimhape (PLA)

PLA kuulub alifaatsete polüestrite perekonda. Kõige laialdamaselt toodetakse PLA taastuvatest biolagunevatest polümeeridest. Tegemist on väga mitmekülgse, biolaguneva, alifaatse polüestriga, mis on saadud 100 % taastuvast ressursist. Toodetakse piimhapest, looduslikult esinevast orgaanilisest happest kääritamise teel. [18, 19]. Piimhape ehk 2-hüdroksüpropioonhape on kõige laiemalt tuntud optiliselt aktiivne hüdroksükarboksüülhape. Selle happe kiraalne molekul võib esineda kahe enantiomeeri kujul - L- ja D-piimhape. Puhas L-piimhape või D-piimhape või mõlema ühendi segud on vajalikud PLA sünteesiks [18, 19].

PLA-l on hea kuumuskindlus ja head mehaanilised omadused. Üldiselt valmistatakse PLA keemilise fermentatsiooni läbi polümerisatsiooni ja aseptroopse kondensatsiooni. Seda saab lagundada aeroobsetes või anaeroobsetes tingimustes. Maisitärklise hüdrolyüs annab suhkruid, mida saab kääritada piimhappeks ning millele järgneb polümerisatsioon, saades PLA [18, 19].

Viimasel ajal on ilmnunud mitmed PLA-põhised tehnoloogiad, mis rõhutavad tavapäraste polümeeridega samaväärsete või paremate keemiliste, mehaaniliste ja bioloogiliste omaduste saavutamist. Töös tuuakse välja mõningad mehaanilised omadused (tabel 1.4.2). Viimasel kümnendil on märkimisväärset tähelepanu nõudnud PLA keemilise või füüsikalise modifitseerimise sagedane vajadus sobivate omaduste saavutamiseks kavandatud tarbijate ja biomeditsiiniliste rakenduste jaoks [18, 19]. Polüestermaatriksiga (mis on vee suhtes väga tundlik) piisavate kiudude piisavate ettevalmistuste tagamine heade liideseomaduste jaoks võib avada tee paremini toimivate PLA-komposiitide juurde [18].

Tabel 1.4.2 PLA mehaanilised omadused [18]

Omadused	PLA
Tihedus (g/cm ³)	1,252
Tõmbetugevus (MPa)	59
Paindemoodul (MPa)	3500

Paindetugevus (MPa)	106
Sulamistemperatuur (°C)	164-178

Sarnaselt polüpropüleeniga katsetavad ja arendavad teadlased PLA ja loodusliku kiuga polümeermaatrikseid. PLA maatriksi ja looduslike kiudude vahelises liideses toimuva interaktsiooni parandamiseks on uuritud erinevaid tsellulooskiudude pinna modifitseerimise meetodeid [15]. Tulemustest on täheldatud, et PLA/looduslike kiudude komposiididel, mis sisaldavad vähem kui 30 massiprotsenti kiudaineid, on võrreldes PLA-ga suurenenud tõmbemoodul ja vähenenud tõmbetugevus. Seda seost on kirjeldatud teguritega, mis hõlmavad hüdrofoobse PLA maatriksi ja hüdrofiilse tsellulooskiu dispersiooni puudumisel kiudude suure aglomeratsiooni tõttu [21].

Polülaktiidiga tugevdatud linakiudude ja polüpropüleeni komposiitide vahel on tehtud võrdlusuuringuid, mis näitasid olulist paranemist linaga tugevdatud polülaktiidi paindemoodulis. Puhas PLA ja 30% ja 40% linakiudude sisaldusega komposiitide tõmbemooduli väärtused olid vastavalt 3,4 GPa, 8,3 GPa ja 7,3 GPa [21].

Lisaks on uuritud pinnatöötamise mõju ramjeepolüpiimhappe komposiitide omadustele. Nähti, et ramjee kiudude lisamine polülaktiididesse parandas tõmbetugevust võrreldes puhta polümeeriga. Maksimaalne tõmbetugevus oli 66,8 MPa (komposiit, milles oli 30 % rammikiude töödeldud NaOH-ga), samas kui puhta PLA tõmbetugevus oli 45,2 MPa ja töötlemata rambikiududega komposiidi 52,5 MPa. Samamoodi paranesid löögi-, painde- ja dünaamilised mehaanilised omadused. See omaduste paranemine tulenes paremast ühilduvusest ja sidumisest maatriksi ja ramjee kiudude vahel [22].

Võrreldes polüpropüleeniga on teadlaste poolt välja toodud, et PLA komposiitide mehaanilised omadused on palju kõrgemad kui PP analoogidel; võrreldi Polü (3-hüdroksübutüraat-ko-3-hüdroksüvaleraat) ehk PHBV termomehaanilist käitumist nii polüpropüleeni kui polüpiimhappega. Mõlemat tugevdati samade kiududega ja töödeldi identsete tehnikatega. Tulemuseks oli jäigem PLA polümeer. PLA mõningaid puudusi võib seostada madala klaasistumise temperatuuriga, materjali iseloomustab madal kristalliseerumisaste. Seetõttu on termiliselt töötlemata PLA ja tsellulooskiudude kombinatsioon insenerimaterjalina kasutatav ainult temperatuuril kuni 50–60 °C (lühiajaline) [23].

1.4.4 PLA segud

Hoolimata puhta PLA eelistest laiemas kasutuses, piirab seda hüdrofoobsus, vähene löögikindlus ja aeglane lagunemiskiirus. PLA segamine teiste polümeeridega pakub mugavat võimalust selle omaduste parandamiseks. Polüpiimhappe ja polükaprolaktooni (PCL) segud- PCL sisalduse suurenemisega näitas segu tõmbetugevust ja mooduli vähenemist; materjali mõõtmed aga suurenesid [24].

PCL-i lisamisega muutus puhas PLA rabedast murdumisest kõrgtugevaks murdumiseks. Polüpiimhappe ja PHA segud- Polülaktiidi ja PHA segusid iseloomustab oluliselt suurem löögitugevus ning veidi suurem elastsus- ja tugevusmoodul [25].

Kaltsiumkarbonaadi (CaCO_3) mikro- / nanoosakeste suuruse mõju PLA -le. uuringus leiti, et rasvhapetega töödeldud CaCO_3 lisamine vähendas PLA termilise lagunemise tõttu CaCO_3 -PLA biokomposiitide viskoossust. Mikro- CaCO_3 lisamine võib säilitada ekstrudeeritud PLA viskoossuse, mis oleks lähedal puhtale PLA-le [26].

Üheks täiustatud PLA versiooniks võib lugeda PLA+. Sisuliselt on PLA+ standardse PLA ümbertöödeldud versioon, kus standardse PLA omaduste parandamiseks on valemisse viidud muid plastikuid, lisaaineid või pigmente. PLA imab vett ja on habras, kuid PLA+ on nende nõrkuste osas tugevam, vähem habras, vastupidavam ja kihtidega paremini haarduv [29].

Teadlased jäävad küll oma valemities napolisõnaliseks, kuid siiski on neil õnnestunud saavutada väga hea kvaliteedi, värvi või mehhaaniliste omadustega segud, mille tulemusena muutuvad plasti omadused kuumakindlamaks, veekindlamaks ja täielikult lagunevaks [28].

1.5 Looduslikud komposiidid maailma turul

Keskkonnasõbralike toodete arendamine on üks oluline ettevõtete edutegur. Seoses üleminekul keskkonnasäästlikule tootmisele ja looduslike vahendite kasutusele võtmisele võib välja tuua erinevaid ettevõtteid üle maailma. Nova-Institute (Hürth, Saksamaa) avaldas nimekirja kõigist Euroopa biokomposiitgraanulite tootjatest ja tarnijatest, sealhulgas 30 tootjat üheksast riigist. Portugali korgitootja Amorim on Euroopa suurim biokomposiitgraanulite tootja, kes toodab aastas üle 50 000 tonni. Lisada võib siia veel kuulsaid tootjaid nagu: Biologic (Zwevegem, Belgia ja Advanced Compounding (Rudolstadt, Saksamaa) ja Tecnar (Ilsfeld, Saksamaa). Need kolm ettevõtet pakuvad täiteainena ja tugevdajana laias valikus polümeere, samuti

mitmesugust puitu ja looduslikke kiude [29]. Üheks populaarsemaks biokomposiidi tootjaks on Stora Enso, kes töötab välja ja toodab puidul ja biomassil põhinevaid lahendusi paljudele tööstusharudele ja rakendustele kogu maailmas, juhtides biomajandust ja toetades kliente nõudluse rahuldamisel taastuvate keskkonnasõbralike toodete järele. Antud ettevõtte populaarsemaks suunaks on biograanulid, mis koosnevad 30-60% puidukiudest ja polümeerist (PA, PP, PE) [30]. Katrin Kabuni loodud villakomposiit on Eestis toodetud ja kasutatavaid looduslike polümeere. Sobib kasutamiseks nii kodudes, avalikes ruumides kui ka näiteks sõidukite interjöörides ja mööblitööstuses. Rohkelt villa sisaldav komposiitmaterjal baseerub taastuvatel ressurssidel ja on oma kasutusea lõppedes ümbertöödeldav, ja komposteeritav [31]. Lisaks tuuakse välja teadlaste poolt patenteeritud biokomposiitidest valmistatud lauanõusid. Ameerika leiutaja Terry Lehman on taodelnud patendi bambusest ja pilliroost valmistatud lauanõudele (kausid, tassid), mille koostises on kasutatud biopolüetüleen, polüetüleen (PE) või polülaktiidi (PLA) ning kaunistatud FDA poolt heaks kiidetud värvainetega [32].

Hiinas on patenteeritud lauanõud ja köögiriistad kasutades maatriksmaterjalina melamiini. Antud leiutises on looduslikuks täiteaineks maisitärklis ja puidujahu [33]. Siinkohal on oluline ära märkida, et Euroopa Komisjon on avaldanud oma 2021. aasta programmi Euroopa Liidu (EL) õigusaktide rakendamise ja jõustamise jälgimiseks toidu- ja söödaohutusele. Võttes arvesse Euroopa Komisjoni direktiivi on Hiinast pärit või sealt lähetatud melamiinist köögitarvetest teadete kohaselt toitu eraldunud lubatud suuremaid formaldehüüdi koguseid, mis ei vasta liidu õigusaktide nõuetele [34].

1.6 Komposiitide valmistamise tehnoloogia

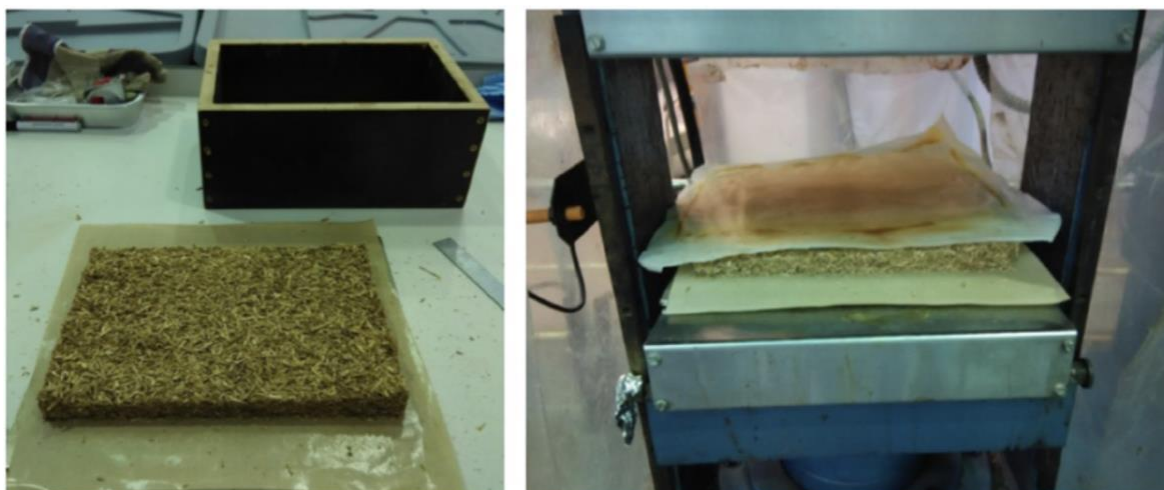
Komposiitide tootmine jaotatakse kolme suuremasse etappi: immutamine, laotamine, konsolideerimine (joonis 1.6.1). Kogu liitvalmistamine hõlmab sama kolme põhietappi, samal ajal kui erinevad töötlemistehnikad saavutavad erinevaid tulemusi. Üldiselt on polümeermaatriksi komposiit valmistamise tehnoloogiad jagunenud tugevduste ja maatriksvaigusüsteemide abil [35].

Tabel 1.6.1 Komposiidi töötlemise tehnoloogiad [35]

Maatriksi materjal	Täiteaine materjal	Valmistamise tehnoloogia
Termoreaktiivsed komposiidid	Lühikesed kiud	Lehtvormimissegude (<i>SMC</i>), struktuurne reaktsiooni survevormimine (<i>SRIM</i>), lahtiselt vormitav segu (<i>BMC moulding</i>), pihustamine, survevalu.
Termoreaktiivsed komposiidid	Pikemad kiud	Niidi ketramine, pultrusioon, <i>RTM</i> , vakuumiga vaigu ulekandevormimine (<i>VARTM</i>), käsitsi pihustamine, autoklaav, rullide mähkimine, Seemanni komposiitvaikude infusiooni vormimise protsess (<i>SCRIMP</i>).
Termoplastilised komposiidid	Lühikesed kiud	Survevalu, puhumisvormimine.
Termoplastilised komposiidid	Pikemad kiud	Termovormimine, survevalu, autoklaav.

Antud tabelist 1.6.1 võib välja lugeda, et materjali tootmistehnoloogia valik sõltub, kas täiteaineks on lühikesed kiud või pikad kiud. Termoplastiliste komposiitide korral, milles on lühikesed kiud kasutatakse survevalu ja puhumisvormimist. Pikemate kiudude korral kasutatakse termovormimist, survevalu, autoklaavi töötlemisprotsesse.

Taimseid kiude töödeldakse komposiitide edasiseks tootmiseks, mis hõlmab kuivatamist, pallide pakkimist ja jahvatamist. Termoplastiliste biokomposiitide tootmise protsess hõlmab taimsete kiudude defibrillatsiooni vaigus, millele järgneb anorgaaniliste kiudude immutamine komposiitmaterjalides ja kiudude dispergeerimine komposiitide saamiseks [2, 36].



Joonis 1.6.1 Pillirookomposiidi valmistamine (vasakul) ja konsolideerimine kuumas pressis (paremal) [2]

Komposiitmaterjalide puhul on täheldatud nende mehaaniliste omaduste varieeruvust, välja arvatud juhul, kui neid on toodetud kõige rangemini kontrollitud tingimustes.

Käsitsi paigaldamise meetodil toodetud materjali varieeruvus on märgatavam kui mehhaniseeritud protsessidega valmistatud komposiitide puhul [37].

2 MATERJALID JA KATSEMEETODID

2.1 Materjalid

Komposiitmaterjalid valmistati polüpropüleenist ja polüpiimhappe baasil biolagunevast polümeerisegust ning jahvatatud pilliroost. Pilliroo osakeste suurus oli umbes 0,3 mm. PP ja pilliroo segu valmistati kahes värvitoonis – sinine ja must ning plaadid koosnesid 50 massi % maatriksist ja 50 massi % täiteainest.

2.1.1 Polümeerid

Antud töös kasutati polümeeridena sünteetilist polüpropüleen (PP) ja polüpiimhappe baasil biolagunevast polümeerisegu BIO-FLEX S 7514.

Polüpropüleen PP, seeria tüübiga PPH 11012, pärineb firmalt Total Petrochemicals.

PPH 11012 omadused:

- Antistaatiline homopolümeerpolüpropüleen;
- Lõhnatu;
- Kõrge sulamisvooluindeks on 55 g/10 min;
- Antistaatilise iseloomuga, mis võimaldab lühemat tsükliaga ja hõlpsat vormimist.

Polüpropüleenist PPH 11012 peamisteks kasutatavateks valdkondadeks on õhukese seinaga pakendid, jogurtitopsid, salatialused, korgid ja sulgurid. Polümeeri töödeldakse tavalistes survevalumasinaates.

Polüpiimhappe baasil biolagunev polümeerisegu, seeria tüübiga BIO-FLEX S 7514, pärineb firmalt nimega FKUR.

BIO FLEX S 7514 omadused:

- Biopõhine süsiniku sisaldus 75 %;
- Sisaldab endas kopolüestrit ja lisandeid;
- Põhineb PLA-l ning teistel biopolümeeridel.

BIO-FLEX S 7514 eelised võrreldes tava polümeeri ees

- Kõrge kuumakindlus ehk hea töödeldavus kõrgematel temperatuuridel;
- Hea voolavus;
- Sobib kasutamiseks mitmemõõtmelistes vormides ja pikemate vooluteedega osade tootmiseks;
- Biolagunev ja tööstuslikult kompostitav.

Mehaanilised omadused on välja toodud lisa 1-1. Antud biolagunev polümeer sobib survevaluks, kile ektstrusiooniks ja termovormimiseks. Tabelis 2.1.1 on välja toodud soovituslikud parameetrid survevaluks

Tabel 2.1.1 PLA soovituslikud omadused survevalus [38].

Vormi temperatuur (°C)-	30-60
Materjali sulamise temperatuur (°C)	>155
Rõhu taseme hoidmine (%)	40-60
Jahtumise aeg (s)	10

2.2 Pilliroopulbri valmistamine

Pilliroog saadi ettevõttelt Sutu OÜ ja see oli korjatud Oktoobris ja Novembris 2019, Saaremaalt. Pilliroog jahvatati desintegraatoriga 0,3 mm suuruseks pulbriks. Materjalide ettevalmistus protsessi alustuseks oli vaja teada ja teha arvutusi kui palju komposiitplaate peab valmistama. Ettevalmistusprotsess koosnes erinevatest etappidest. Esialgu tuli pilliroost pulber kuivatusahju panna, mille tulemusena liigne niiskus eemalduks. Materjali kuivatuse parameetrid olid 80 °C ja 24 h ventileeritavas ahjus. Järgnevalt värviti pilliroo segu pigmentidega: ultramariinsinise (kunstlik mineraalpigment, $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\text{S}_4$) ja must raudoksiidiga (Fe_2O_3 , kunstlik raudoksiid). Pigmendiga kokku segatud kuivainele lisandus vesi. Vee ja pigmendi osakaal sõltus pilliroo pulbri massist. Ainete suhted massi järgi olid järgnevad: 5/2 pigmendi värvi segati 1 kg suhtes ja 6/1,75 lisati vett. Järgnevalt segati kõik komponendid omavahel ühtlaselt ära, et pilliroopulber seguneks pigmendiga täielikult. Segu asetati ahju 60 °C juures 48 tunniks. Kuivatatud värviline pilliroog peenestati käsitsi uhmris ja sõeluti läbi sõela (joonis 2.2.1).



Joonis 2.2.1 Pilliroojahu värvitud pigmentidega

2.2.1 Kopaundimine ja granuleerimine

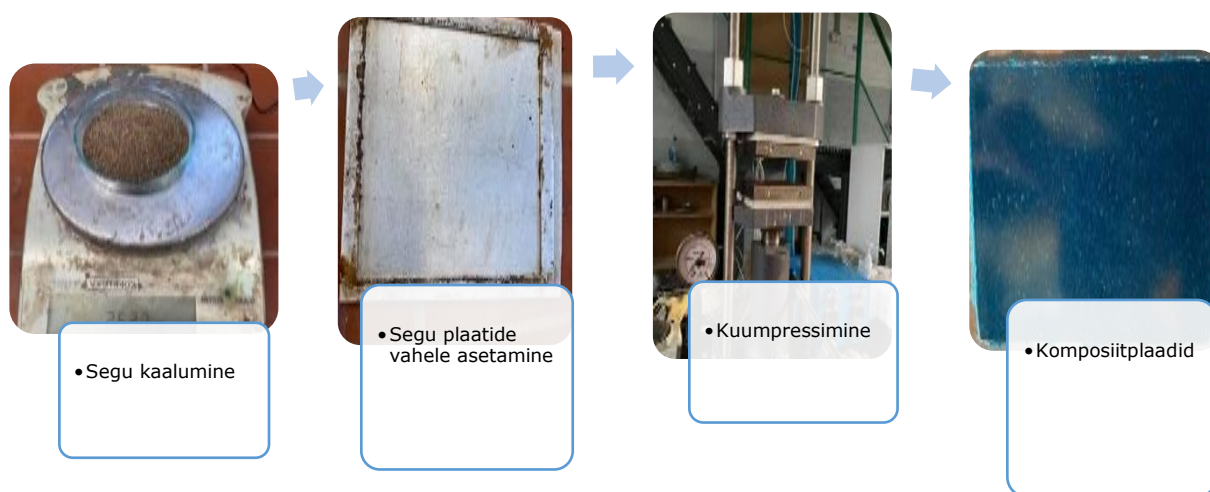
TalTech polümeeride ja tekstiili laboris valmistati ette ja segati omavahel umbes 1000 g pilliroo pulbrit polümeeri (PP ja PLA) graanulitega. Seejärel asetati segu kompaundersisse Brabender Plast-Corder PLE-651 (joonis 2.2.2), mille eesmärgiks on segada sulatatud olekus kahte materjali, et saavutada soovitud omadusi. Kompaunderi parameetrid olid järgmised: tsoonide temperatuurid 1. 170 °C 2. 180 °C 3. 180 °C 4. 175 °C 5. 170 °C. Tigude pöörlemisekiirus: 60 min⁻¹. Edasi suunati tahke komposiidi mass jahutamise lindile. Viimasena purustati tahke massi jahvatamisele masinaga Retsch SM100 (joonis 2.2.2), kus valmis komposiidi pulber.



Joonis 2.2.2 Kompaundier Brabender Plast-Corder PLE-651 ja jahvataja Retsch SM100

2.3 Komposiitplaatide valmistamine

Komposiitplaatide valmistamise protsess sai alguse komposiitsegu kaalumise ja segu ahjust välja võtmisega (joonis 2.3.1). Pulber asetati katseklaasi. Järgmiseks asetati segu vormi raami vahele. Segu alla pressplaatidele lisati veel polüesterkile (Mylar polyester film), mille paksus oli $250\ \mu\text{m}$, et oleks lihtsam materjali raamist eemaldada. Seejärel suunati pressvorm $130\ \text{mm} \times 130\ \text{mm}$ koos seguga kuumpressi *CARVER* mõõtudega $150\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$. Valmistati pilliroost ja polüpropüleeniga segust pressitud plaadid mõõtudega $130\ \text{mm} \times 130\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$. Pressimiseks sulatati $35\ \text{g}$ segu 5 minutit temperatuuril $180^\circ\ \text{C}$, seejärel rakendati 10 minutit rõhku $1,32\ \text{MPa}$ ja lõpuks jahutati komposiitplaate 10 - 15 min. PLA ja pilliroo segust plaatide valmistamisel kasutati sarnast süsteemi, kuid parameetrid olid erinevad võrreldes polüpropüleeniga komposiidiga: pressimiseks sulatati $46,5\ \text{g}$ segu 10 minutit temperatuuril $180^\circ\ \text{C}$, seejärel rakendati 10 minutit rõhku $1,32\ \text{MPa}$.



Joonis 2.3.1 Komposiit plaatide valmistamise protsess

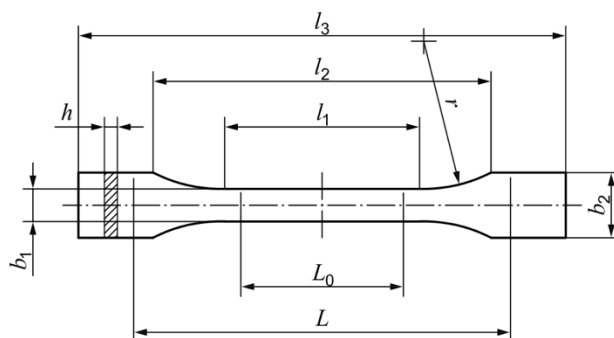
2.4 Katsematerjalide välja lõikamine

Katsematerjalide välja lõikamine käib läbi EN ISO standardite. Antud projekti raames viidi töös läbi painde- ja tõmbe katseid. Paindekatsel järgitakse EN ISO 178, mille katsekehade mõõtudeks on: pikkus 75 ± 2 , paksus $2 \pm 0,2$ ning laius $25 \pm 0,2$ [39].

Tõmbekatsel järgitakse EN ISO 527-2. Antud plaadid on väiksemate mõõtudega, kui tüüp 1B ja 1A, seega tuleb võtta kasutusele 1 BA või 1 BB mõõtudega katsekehad. Mõõtude sobivuse poolest valiti 1 BA, kus tabel 2.4.1 toob välja katsekehade täpsed mõõdud ja joonis 2.4.1 näitab visuaalselt milline peaks katsekeha välja nägema [40].

Tabel 2.4.1 Tõmbekatsekeha 1 BA mõõdud [40].

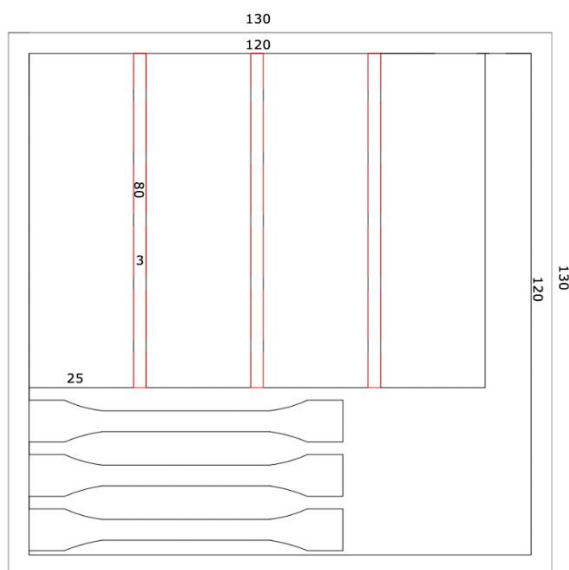
	Kondi karakteristikud	1 BA
l_3	Üldpikkus	≥ 75
l_1	Kitsa paralleelse osa pikkus	$30,0 \pm 0,5$
r	Raadius	≥ 30
l_2	Kaugus laiade paralleelsete osade vahel	$58,0 \pm 2$
b_2	Otste laius	$10,0 \pm 0,5$
b_1	Laius kitsastes punktides	$5,0 \pm 0,5$
h	Paksus	≥ 2
L_0	Gabariidi mõõtmed	$25,0 \pm 0,5$
L	Algne kaugus haaratsite vahel	$l_2^{+2}_0$



Joonis 2.4.1 Tõmbekatsekeha 1BA [40].

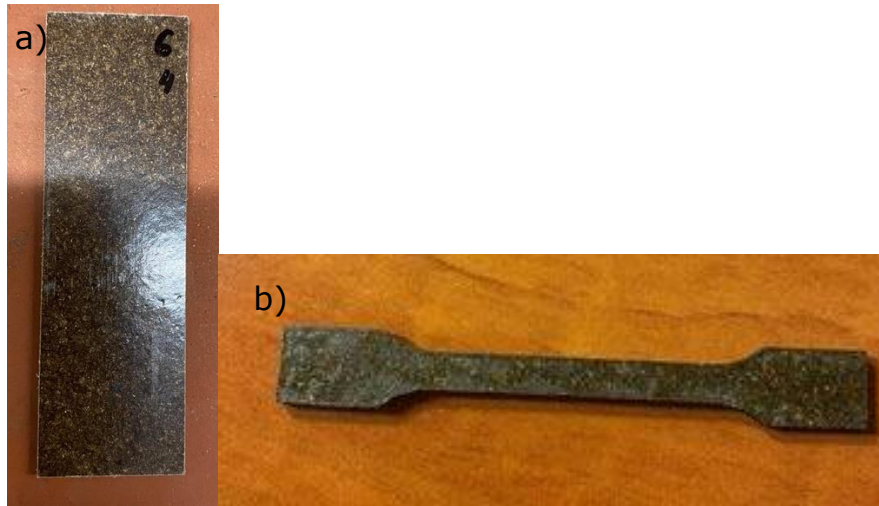
Järgnevalt joonestati spetsiaalses programmis nimega Autodesk AutoCAD konkreetsete mõõtmetega katsematerjalide paigutuse (joonis 2.4.2) komposiitplaadis, eesmärgiga lihtsustada katsekehade väljalõikamist. Lõikamise tehnoloogia valiku otsustamisel oli tähtis arvesse võtta materjali suuruse ja katsekehade kujud. Antud projektis kasutati laserlõikust kui ka saega materjalist katsekehade välja lõikamist. Täpsemalt lõigati

paindekatsesehad saega välja ning tõmbekatsesehad laserlõikusega. Katsesehad on välja toodud joonisel 2.4.3.



Joonis 2.4.2 AutoCAD-is tehtud painde- ja tõmbekatsesehadde paigutus

Tõmbekatsesehad lõigati välja CO₂ laserlõikuriga Laser Engraving Cutting Machine CL-1309XU (joonis 2.4.4). Tööala suuruseks oli 900 x 1300 mm. Laserlõikurit kasutatakse peale komposiitide veel mitme teise materjali lõikamiseks: täispuidu ja puitvineeri lõikamiseks, mille paksus on kuni 6 mm. Lisaks lõigatakse paberit, pappi, erinevat plastiku materjali ja tekstiilmaterjale. Antud tehnoloogias sõltub lõikamise tulemus lõikamise kiirusest (m/s) ja võimsusest (W). Laserlõikuriga prooviti esmased katsed ja tulemus oli positiivne. Testmaterjaliks kasutati puhast polüpropüleen plaati ja pilliroog + polüpropüleen plaati. Välja lõikamist katsetati vahelduvate parameetritega nägemaks kõige optimaalsemat tulemust. Katsetuse käigus selgusid järgmised optimaalsed parameetrid: PP ja pilliroost komposiidil 25 W ja 10 m/s ning puhta polüpropüleen puhul oli sobilik 30 W ja 10 m/s. PLA ja pilliroost komposiidi parameetrid olid järgnevad: 25 W ja 10 m/s.



Joonis 2.4.3 a) Paindekatsekeha ning b) tõmbekatsekeha



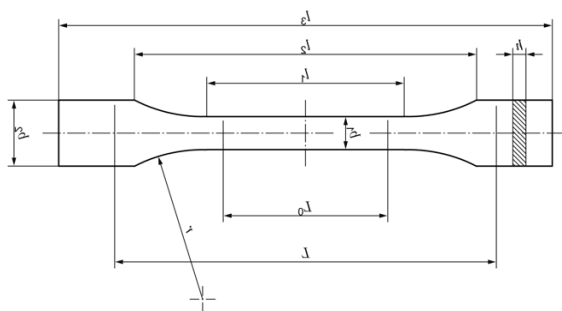
Joonis 2.4.4 CO₂ laserlõikur (Laser Engraving Cutting Machine CL-1309XU)

2.4.1 Survevaluga katsekehade valmistamine

Katsekehad valmistati survevalumasinaga Battenfeld BA 230 E. Survevalu parameetrid olid järgnevad. Tsoonid: 2. 180 °C ja 3. 175 °C. Pressimise surve oli 80 Bar. Survevalu vormi mõõtudeks vastas standard 1 A [40]. Tabelis 2.4.2 on välja toodud tõmbekatsekeha 1A mõõdud ja joonisel 2.4.5 on välja toodud tõmbekatsekeha 1 A PLA.

Tabel 2.4.2 Tõmbekatsekeha 1 A mõõdud [40].

	Kondi karakteristikud	1 A
l_3	Üldpikkus	1 A
l_1	Kitsa paralleelse osa pikkus	170
r	Raadius	$80,0 \pm 2$
l_2	Kaugus laiade paralleelsete osade vahel	$24,0 \pm 1$
b_2	Otste laius	$109,3 \pm 3,2$
b_1	Laius kitsastes punktides	$20,0 \pm 0,2$
h	Paksus	$10,0 \pm 0,2$
L_0	Gabariidi mõõtmed	$4,0 \pm 0,2$
L	Algne kaugus haaratsite vahel	$75,0 \pm 0,5$ $50,0 \pm 0,5$



Joonis 2.4.5 Tõmbekatsekeha 1 A PLA [40].

2.5 Katsekehade ettevalmistamine katseteks

Enne mehaanilisi katsetusi tuli mõõta üle kõikide katsekehade mõõdud, selleks kasutati nihikut (mõõtetäpsus $\pm 0,05$) (joonis 2.5.1). Mõõtmistulemused jäid kõik lubatud piiri. Järgnevalt oli valida, kas asetada katsekehad konditsioneeruuri või ruumi, kus katseid tehakse. Konditsioneeruuri kasutatakse katsekehade ettevalmistamisel katsetusteks, kus on kindel temperatuur ja õhuniiskus. Katsekehad konditsioneeriti testimis ruumis 24 tundi enne katsetamist. Katsetamis ruumi keskkonnatingimused valiti: $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $22,7\%$.



Joonis 2.5.1 Nihikuga katsekehade mõõtmine

2.6 Katsetused

Pilliroo polümeerkomposiitide omaduste määramiseks viidi läbi erinevaid mehaanilisi katseid, mis vastavad EN ISO standarditele (tabel 2.6.1). Lisaks mehaanilistele katsetustele viidi läbi ka füüsikalised katsed (UV katsed).

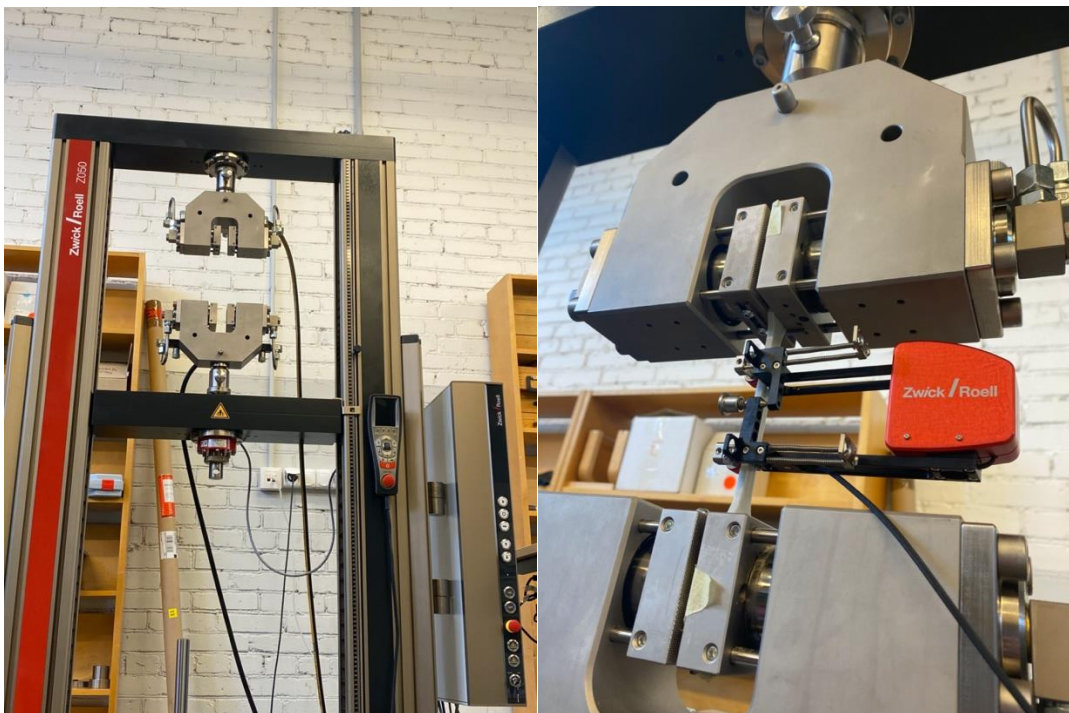
Tabel 2.6.1 Katsetele vastavad ISO standardid

Katse	ISO standard
Paindekatse	ISO 178-201
Tõmbekatse	ISO 527-2
Tiheduse määramine	ISO 1183-1
UV katse- värvi määramine	ISO 11664-4
UV katse- läike määramine	ISO 2813

2.6.1 Tõmbekatse

Esmalt katsetati tõmbekatseid. Tõmbekatsed toimusid seadmega ZwickRoell Z050 (joonis 2.6.1) standardi ISO 527-2 järgi. Katsekehad asetati tõmbehaaratsite vahele, mida tõmbas tõmbemasin kiirusega 1 mm/min kuni katsekeha purunemiseni. Tõmbehaaratsite distantsiks määrati 42 mm. Järgnevalt sisestati arvutisse juba

eelnevalt mõõdetud katsekehade mõõtmed, mille järgi tõmbemasina programm testXpert III arvutab automaatselt vajalikud näitajad. Katse käigus suurendades masina abil pidevalt proovikehale mõjuvat tõmbejõudu F , proovikeha pikeneb ja lõpuks katkeb. Katse kestel on proovikehal märgata mitmesuguseid muutusi. Sõltuvust tõmbejõu ja proovikeha pikenedes vahel iseloomustavad tõmbediagrammid. Iga komposiit materjali kohta kasutati vähemalt 5-10 katsekeha. Lisaks kasutati tõmbekatsete juures ekstensomeetrit (mõõtepiikkusega 50 mm), mis aitab jäädvustada katsekehade pikkuse muutust (pikenedes) elastsusmoodulu määramiseks. Ekstensomeetrit kasutati ainult tüüp 1 A katsekehade puhul, mille üldpikkus oli 170mm.



Joonis 2.6.1 Tõbekatseteseadet ZwickRoell Z050

Arvutamine toimub vastavalt valemile:

Tõmbetugevus (*Tensile stress*) [40]:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2.1)$$

Kus σ on tõmbetugevus (Mpa),

F on tõmbejõud (N)

A on katsekehade ristlõikepindala (mm²)

Youngi moodul (*Young's module*) [40]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2.2)$$

Kus E on Youngi moodul (MPa),

σ on tõmbetugevus (MPa)

ε on tõmbedeformatsioon.

2.6.2 Paindekatsed

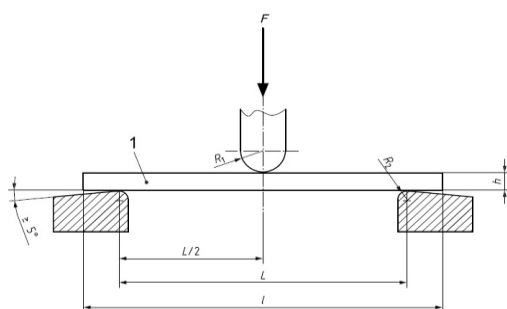
Järgnevalt katsetati paindekatseid. Paindekatsed toimus (joonis 2.6.2) seadmega ZwickRoell Z050 standardi ISO 178 järgi. Sarnaselt tõmbekatsedega asetati kuumpressiga valmistatud katsekehad painderakise peale. Rakendades katsekehale masina jõudu, katsekeha purunes. Rakise tugevuste distantsiks määrati 32 mm vastavalt valemile 2.3.

Rakise tugevuste vaheline kaugus arvutati järgneva valemiga [39]:

$$L = (16 \pm 1)h, \quad (2.3)$$

Kus h on materjali paksus. Katsekiiruseks määrati 1 mm/min ja eel jõuks 1 N.

Antud katse puhul sarnaselt tõmbekatsedele sisestati arvutisse eelnevalt mõõdetud katsekehade mõõtmed, mille järgi tõmbemasina programm testXpert III arvutab automaatselt vajalikud näitajad. Katseseade mõõdab katsekehale avalduvat jõudu ja sellega kaasnevat nihet, mille järgi saab arvutada paindemooduli ja paindetugevuse. Iga komposiitmaterjali kohta kasutati vähemalt 5-10 katsekeha.



Joonis 2.6.2 Paindekatsed seadmega ZwickRoell Z050 [39].

Arvutamine toimub vastavalt valemitele:

Paindetugevus (*Flexural stress*) [39]:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad (2.4)$$

Kus σ on paindetugevus,

F on survejõud (N)

L on rakise tugede vahekaugus (mm)

b on katsekeha laius (mm)

h on katsekeha paksus (mm)

Paindedeformatsioon (*Flexural strain*) [39]:

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2}, \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_f = \frac{600sh}{L^2} \%, \quad (2.6)$$

Kus ε_f on deformatsiooni iseloomustav suurus dimensioonita ühikutes või protsentides,

S on deformatsioon millimeetrites,

h on katsekeha paksus millimeetrites,

L on tugipunktide vahekaugus.

Painde elastsusmoodul (*Flexural modulus*) [39]:

$$S_f = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h}, \quad (2.7)$$

Kus (i=1 või 2) s_i on paine millimeetrites;

ε_{fi} on vastav paindedeformatsioon, mille väärtused on antud üleval;

L on tugipunktide vahekaugus millimeetrites;

h on katsekeha paksus millimeetrites.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}, \quad (2.8)$$

σ_{f1} on paindetugevus megapaskalites mõõdetuna painde s_1 juures,

σ_{f2} on paindetugevus megapaskalites mõõdetuna painde s_2 juures.

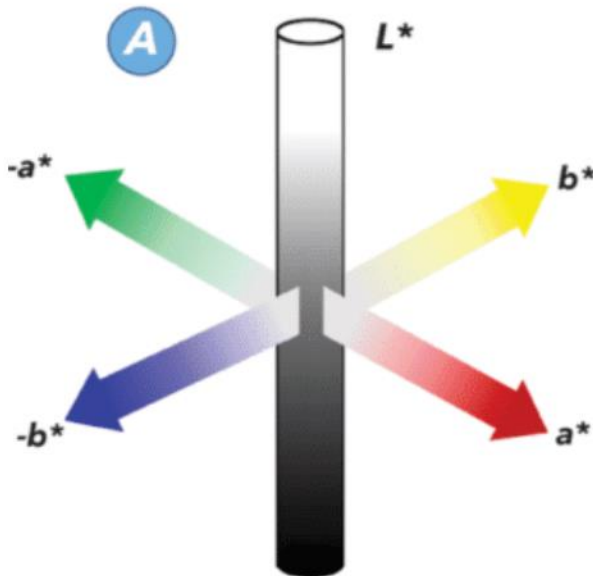
2.6.3 UV katse

Lisaks tõmbe-ja paindekastele kasutati UV kiirguskatset ehk vananemiskatset. Vananemiskatse ehk UV kiirguse katse eesmärk on vaadata kuidas UV kiirgus mõjutab materjali värvi, läiget ning mehaanilisi omadusi. Materjali värvuse ja läike määramisel kasutati järgmiseid standardeid: täpsemalt värvi määramisel EN ISO 11664-4 ja läike puhul ISO 2813. Enne katset mõõdeti katsekehade pinna värvus ja läige (joonis 2.6.3). Katsekehade pinna värvi ja läiget mõõdeti pärast 24-tunnist kokkupuudet UV-ga ja seejärel iga nädal.

Katsekehad jäeti UV kappi fluorestsentslampidega UV-A 351 kokku 83 päevaks ehk umbes 2000h. Kokku kasutati umbes 80 kastekeha (40 katsekeha mõõtmetega 25 x 80

ja 40 tõmbekatsekeha). Värv katsel võeti arvesse koordinaadid $L \times a \times b$ ning läige 60° juures. Pärast UV katset korraldati mehaanilist katset vaatamiseks kuidas UV kiirgus mõjutab komposiidi mehaanilisi omadusi. Joonis 2.6.3.1 toob välja katsekehad enne UV kappi panemist ja katsekehad pärast UV katset.

Heledus jääb vahemikku 0–100 (mida suurem on väärtus, seda heledam on proov), samal ajal kui parameetri positiivne väärtus näitab punast tooni, negatiivne - rohelist ja parameetri b positiivne väärtus näitab kollast tooni, negatiivne sinist (joonis 2.6.3)



Joonis 2.6.3 CIELAB meetod [52].

Katsete lõpus arvutati värvi erinevus ΔE , igale katsekehale.

Kus ΔE on värvi erinevus,

L_1 on valgus enne UV kokkupuudet,

L_2 on valgus pärast UV kokkupuudet,

a_1 on a koordinaat enne UV kokkupuudet,

a_2 on a koordinaat pärast UV kokkupuudet,

b_1 on b koordinaat enne UV kokkupuudet,

b_2 on b koordinaat pärast UV kokkupuudet,

ΔL^* on L koordinaatide erinevus,

Δa^* on a koordinaatide erinevus,

Δb^* on b koordinaatide erinevus,

Värvi erinevus, ΔE , arvutati järgneva valemiga [41]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}, \quad (2.9)$$



Joonis 2.6.3.1 a) läike mõõtja (3NH HG268) ; b) värvuse mõõtjad (3NH NR60CP)

2.6.4 Tiheduse katse

Viimase katsena teostati tiheduse määramist. Mõõtmist teostati seadmega METLLER TOLEDO AB204-S/FACT balance (joonis 2.6.5) ning järgiti standardit ISO 1183-1. Enne testimist tuli välja lõigata kõigist materjalidest 5 katsekeha mõõtudega 25 mm x 25 mm. Enne katse alustamist asetati katsekehad konditsioneeruuri 4 päevaks. Keskkond: : 24 °C ja 22,7 %. Katsetamine viidi läbi Taltech polümeeride laboris. Katseid alustati masina töökorda seadmisega, seejärel destilleeritud vee katseklaasi valamise ja kaalu seadistamisega 0 olekusse. Järgnevalt teostati katsekehade algmassi kaalumist ning seejärel vees oleva massi kaalumist. Kindlasti tuleb tähele panna, et masin on väga tundlik ja see võib põhjustada tulemuste erinevust. Katsetused tehti 23 °C juures ning destilleeritud vee tiheduseks antud temperatuuri juures võeti 0,997 g/mL. Katsete lõpus arvutati välja materjalide tihedused, määrati keskmised ja standardhälbed. Tiheduse määramine cm-des, 23 °C juures [42] :

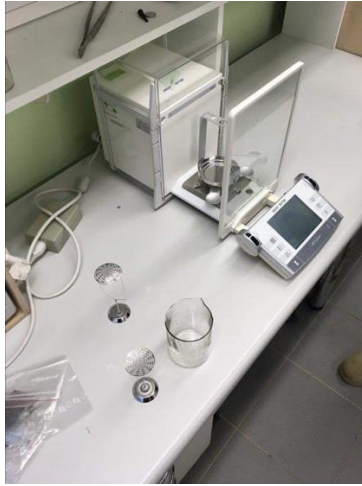
$$\rho = \frac{m_{\text{ohus}} \times \rho_{\text{vedelik}}}{m_{\text{vees}} - m_{\text{raskusvees}}}, \quad (2.9)$$

Kus ρ_S on materjali tihedus,

$m_{S,A}$ on materjali algkaal, õhust võetud (g)

$m_{S,IL}$ on materjali lõppkaal,

destilleeritud veest (g) ρ_{IL} on destilleeritud vee tihedus 23 °C juures (g/mL)

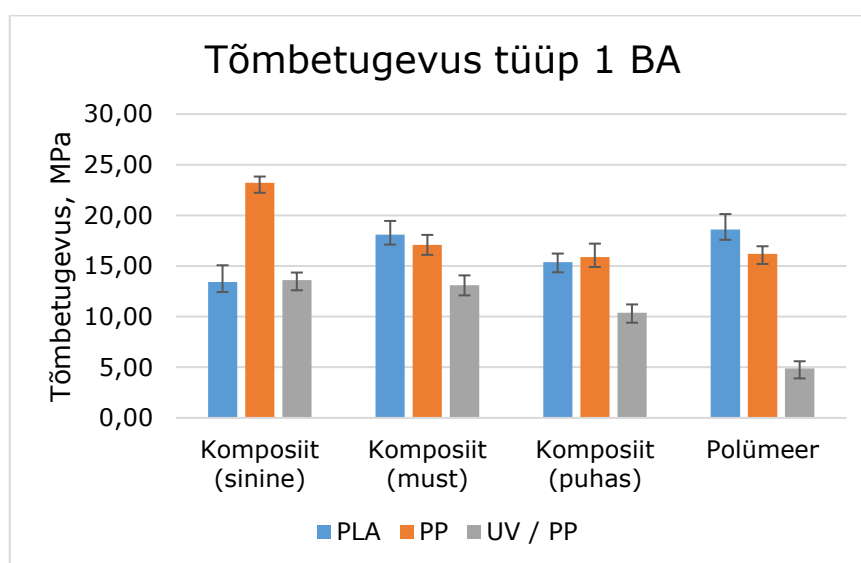


Joonis 2.6.5 METLLER TOLEDO AX balance

3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Tõmbeomadused

Tõmbekatse annab ülevaate tõmbetugevusest. Komposiitmaterjali tõmbetunnused sõltuvad peamiselt kiu tugevusest, moodulist, täiteainetest, kiu pikkusest ja orientatsioonist, kiu/matriksi vahelisest sidemest ja kiudainesisaldusest [43]. Tõmbetugevuse joonisel 3.1.1 on toodud võrdluseks komposiitmaterjalile puhta polüpropüleeni ja polüpiimhappe näitajad. Võrreldakse komposiit materjali puhta polümeeriga, et aru saada kuidas mõjutab täiteaine komposiidi mehaanilisi omadusi.



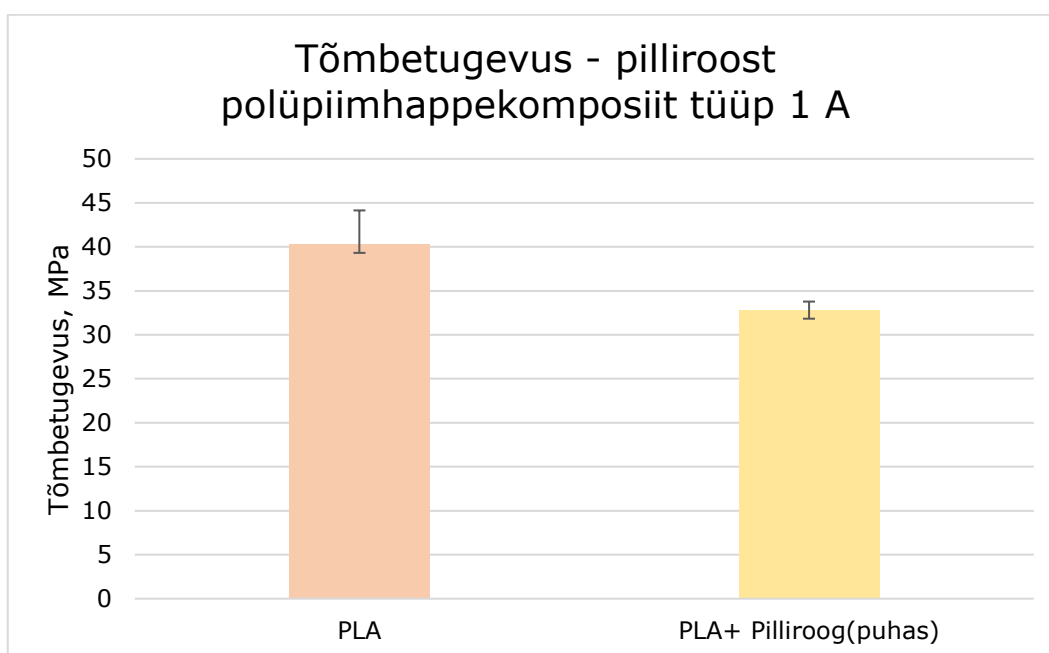
Joonis 3.1.1 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi tõmbetugevus katsekehad 1 BA

Jooniselt 3.1.1 on näha, et puhta polüpropüleeni tõmbetugevus on suurem võrreldes pilliroopolümeerkomposiitidega. Ligikaudselt 26 % on komposiidi tõmbetugevus väiksem võrreldes puhta polüpropüleeniga. Antud jooniselt saab järeldada, et pilliroo jahu lisamisel väheneb materjali tõmbetugevus. Samuti tuleb selgelt välja UV kiirguse mõju polümeerile ja komposiidile. UV kiirguse tulemusel on katsekehade tõmbetugevus vastupidine algsete tulemustega. Komposiidi tugevus on langenud esialgsete tulemustega ligikaudu 24% ning puhta polüpropüleeni tulemused umbes 79%. Kokkuvõtvalt võib öelda, et UV kiirgus mõjutab kõige rohkem puhta polüpropüleeni tõmbetugevust. Polümeersete pindade UV-kiirguse degradatsioon sõltub tugevalt UV-lainepikkusest, intensiivsusest ja kokkupuuteajast [43].

Graafikult joonistub välja, et puhta polüpropüleeni tõmbetugevus on suurem võrreldes polüpiimhappega. Väidetavalt on uusimistöodes täheldatud, et PLA tugevus on

tunduvalt suurem kui PP. Antud lõputöös võib erinevus põhjendatud olla sellest, et kasutati biolagunevat PLAd, mis koosneb kopolüestrist ja lisanditest ja mille tulemusel võib PLA tõmbetugevus olla madalam võrreldes puhta PLAgaga [44].

Komposiitide tulemused jäid suuremas plaanis samaks. Suurimaks erinevuseks võib pidada materjali ultramariinsinise pilliroo polüpropüleeni ja polüpiimhappe komposiidi tugevust, täpsemalt on pilliroost polüpropüleenkomposiit 21,5% tugevam. Komposiitide tugevuse erinevus võib olla põhjendatud ka materjali valmistamise parameetritest.



Joonis 3.1.2 Pilliroost polüpiimhappe komposiidi tõmbetugevus 1A katsekehad

Joonis 3.1.2 iseloomustab puhta polüpiimhappe ja pilliroostpolüpiimhappe komposiidi tõmbetugevust. Välja võib tuua, et puhta PLA tugevus on umbkaudselt 19% suurem võrreldes komposiidiga. Kui polümeerile lisati täiteaine (pilliroog) oli PLA maatriksi deformeeruvus ja liikuvus piiratud, põhjustades purunemise pikenedamist võrreldes puhta PLA polümeeriga [44]. Antud jooniselt saab järeldada, et pilliroo jahu lisamisel väheneb materjali tõmbetugevus.

Pilliroost polümeerikomposiidi ja puhta polümeeri tõmbetugevuse tulemuste vahet saab selgitada järgnevate põhjustega. Üheks languse põhjuseks on hüdrofoobsete termoplastiliste polümeeride ja hüdrofiilsete pilliroost kiudude kokkusobimatus. Antud keemiline kokku sobimatus põhjustab termoplastilise kihi ja kiu vahelist vähest liimainet. Tselluloosi kõrge kristallilisus ja suur molekulmass aitavad tõenäoliselt kaasa kahe faasi nõrgale keemilisele vastasmõjule. Tõmbetugevus sõltub faaside vahelisest

liidese adhesioonist. Kui haardumine pole täiuslik, tekib tühimik ja materjal puruneb liidese piirkonnas. Haardumise puudumine muudab selle piirkonna nõrgemaks [5].

Tulemusi saab võrrelda ka joonise 3.1.1 ja joonise 3.1.2 vahel. Tüüp 1 BA valmistamisel kasutati pressvormimise tehnoloogiat ning tüüp 1 A materjalil survevalu. Mõlemast graafikust saab järeldada, et biolaguneva PLA tõmbetugevus on suurem võrreldes komposiidiga. Survevalu meetodil valmistatud katsekehade väärtused on tunduvalt kõrgemad võrreldes pressvormimise meetodil, mida võib seletada polümeerahelate suurema joonduvusega, kuna survevalu ajal on rõhk suurem võrreldes pressvormimisega. Survevalu protsess põhjustab spetsiifilist voolusuunda ja seetõttu pole ka polümeerahelate eelistatavat orientatsiooni [44].

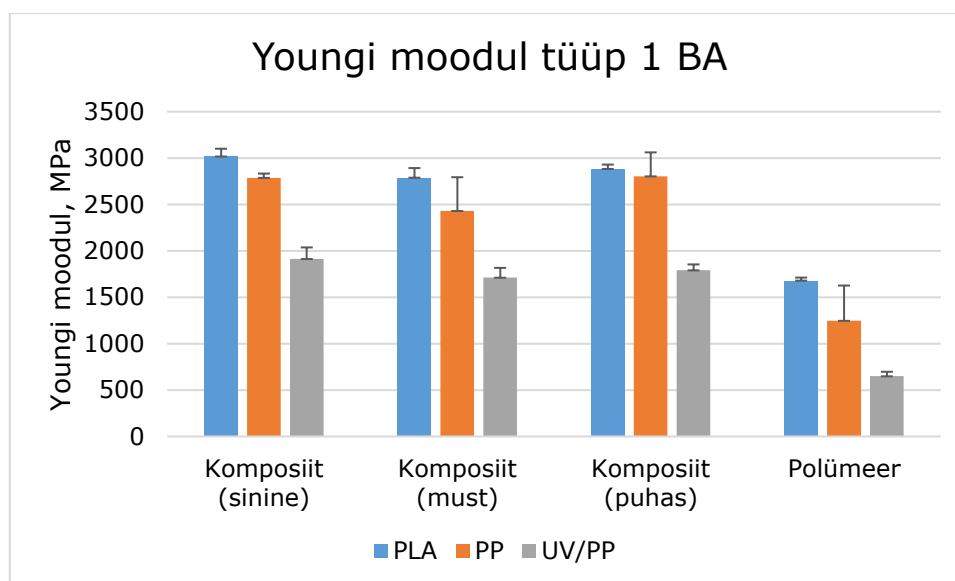
Võrreldes antud töös sooritatud tõmbekatseid looduslikke komposiitidega, mille täiteaineteks olid päevalillesemne jahu, pistaatsiakoore ja sarapuupähkli jahu, võib välja tuua, et puhta PP tõmbetugevuse väärtus sarnaselt antud töös läbi viidud katsetega on tunduvalt suurem võrreldes komposiidiga [45]. Eelnevas teadusuuringus täheldati ka, et komposiitide väärtused jäid samasse kategooriasse [45]., mida saab väita ka antud töös sooritatud kastetes. Komposiidi ja polümeeri tugevuse erinevusena võib ühe põhjusena välja tuua polümeersest maatriksist kantava pinge madala toetamise võime looduslikke täiteainete puhul [45].

Eelnevad teadusuuringud on näidanud, et pärast UV-termilist vananemist täheldati jäätmetega täidetud PP komposiitide tõmbetugevuse kasvu vähenemist [45]. Ehkki termilise vananemise käigus kuumuse tõttu nõrgenenud sidemed PP molekulide vahel, hoiti tõmbetugevuse väärtust PP kristallilisuse kasvu tõttu peaaegu konstantsena [45]. Antud lõputöös täheldati vastupidi, et UV kiirguse toimele jäid komposiitide tulemused konstantsena ning puhta polümeeri tugevus langes drastiliselt.

Tulemuste võrdlusena võib veel ära märkida, et puhta PLA-l on väiksem tõmbetugevus kui PLA-põhistel komposiitidel. Varasemad teadustööd on tõestanud, et näiteks tõmbetugevuse ja jäikuse suurenemine koos ramjee kiudude lisamisega PLA maatriksile viitab paremale ramjee kiudude ja polümeeri pinna ühilduvusele [22]. Kiudainete töötlemine leelise ja silaaniga võib komposiitide tõmbetugevust veelgi parandada [22]. Võrreldes antud töös läbiviidud katsetega võib täheldada, et puhta PLA tõmbetugevus oli tunduvalt suurem võrreldes PLA põhiste komposiitidega .

Lisaks arvutati töös välja ka normaalelastsusmooduli ehk Youngi mooduli. Antud moodul näitab kui palju materjal pinge all pikeneb. Eelnev teadusuuring näitab, et tõmbe moodul suureneb koos kiudaine sisalduse suurenemisega. Näiteks kanepi Youngi

moodul oli 50% kanepikiudude koormusel 2 korda suurem võrreldes 0% kiudainesisaldusel [51].



Joonis 3.1.3 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi Youngi moodul

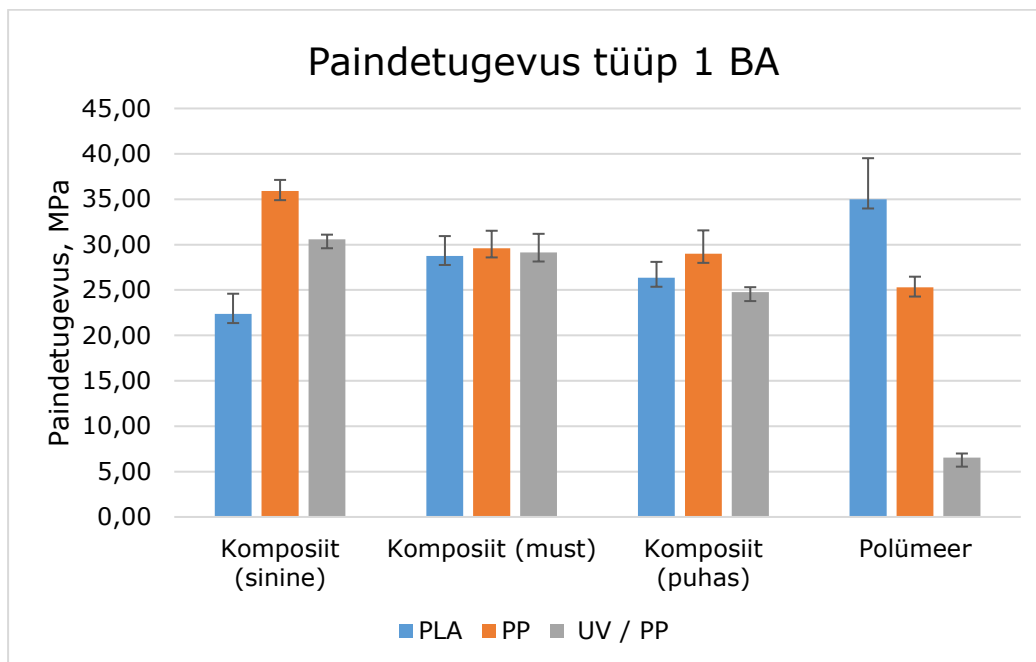
Joonis 3.1.3 iseloomustab komposiidi ja polümeer Youngi moodulit. Antud jooniselt saab järeldada, et naturaalne kiud suurendab komposiidi Youngi moodulit sarnaselt välja toodud uuringuga. Suurim erinevus komposiidi ja polümeeriga on umbes 46%. Lisaks on näha, et polüpiimhappel põhineva komposiidi väärtused on mõne võrra suuremad võrreldes polüpropüleeni komposiidiga.

3.2 Paindeomadused

Vastavalt sooritatud katsetele toodi välja paindekatse tulemused. Paindekatse tulemused on toodud välja joonisel 3.2.1 Paindekatseid sooritati pilliroostpolüpropüleeni komposiidiga, pilliroostpolüpiimhappe komposiidiga ning pärast füüsilist katsetust (UV katse) olnud pilliroostpolüpropüleeni katsekehadega.

Paindekatsetel mõõdetakse paindetugevust ehk materjali sisemist pinget vahetult enne deformatsiooni algust. Painduvusomadused tähistavad materjalide paindlikkust ja hea paindetugevus näitab, et materjalidel on habras omadus ja kõrge kõvadus [43].

Sarnaselt tõmbetugevuse joonisele on töö autor võrdluseks välja toonud komposiitkehadele puhta polümeeri näitajad. PP-polümeeri segamine lignotselluloosse täiteainega andis paindetugevuse väikese languse võrreldes puhta PP-polümeeriga.



Joonis 3.2.1 Pilliroost polümeerkomposiidi paindetugevus tüüp 1 BA

Jooniselt 3.2.1 on näha, et puhta polüpropüleenile paindetugevus on suurem võrreldes pilliroo polümeerkomposiitidega. Antud jooniselt saab järeldada, et pilliroo jahu lisamisel väheneb materjali paindetugevus. Tulemusi vaadates võib väita, et kõigi kolme pilliroo polümeerkomposiitide segu paindekatses väärtused ühtivad. Naturaalse pilliroo polümeerkomposiidi tulemus on umbes 15 % väiksem. Kui võrrelda omavahel puhta polümeeri ja komposiidi väärtusi, siis erinevus on suur. Sarnaselt tõmbekatses on UV kiirgus suuremat kahju teinud puhtale polüpropüleenile, vahe algse tulemusega on ligikaudu 81 %. UV-kiirgus põhjustab fotoooksüdatiivset lagunemist, mille tulemuseks on polümeeri ahelate purunemine, radikaalide tootmine ja molekulmasside vähenemine, mehaaniliste omaduste halvenemine ja kasutatute materjalide tekitamine ettearvamatu aja möödudes [43].

Komposiitide tulemused pärast UV katset pole muutunud, antud eripära saab selgitada naturaalse kiu omadustest lähtuvalt. Suurem ligniinisaldus täheldab nii paremat UV- ja termostabiilsust.

Puhta polümeeri (PLA) paindetugevus on suurem võrreldes pilliroost komposiidiga. Komposiitide väärtused jäävad enamasti ühte vahemikku, erinevus on ligikaudu 22 %. Polümeeri ja pilliroo suurim vahe on 36,1 %, mis sarnaselt joonisele 3.2.1 tähendab, seda, et pilliroo jahu lisamisel tugevus väheneb. Samuti võib tugevuse langus seotud olla materjalide halva ühilduvusega ja materjali valmistamise parameetritega.

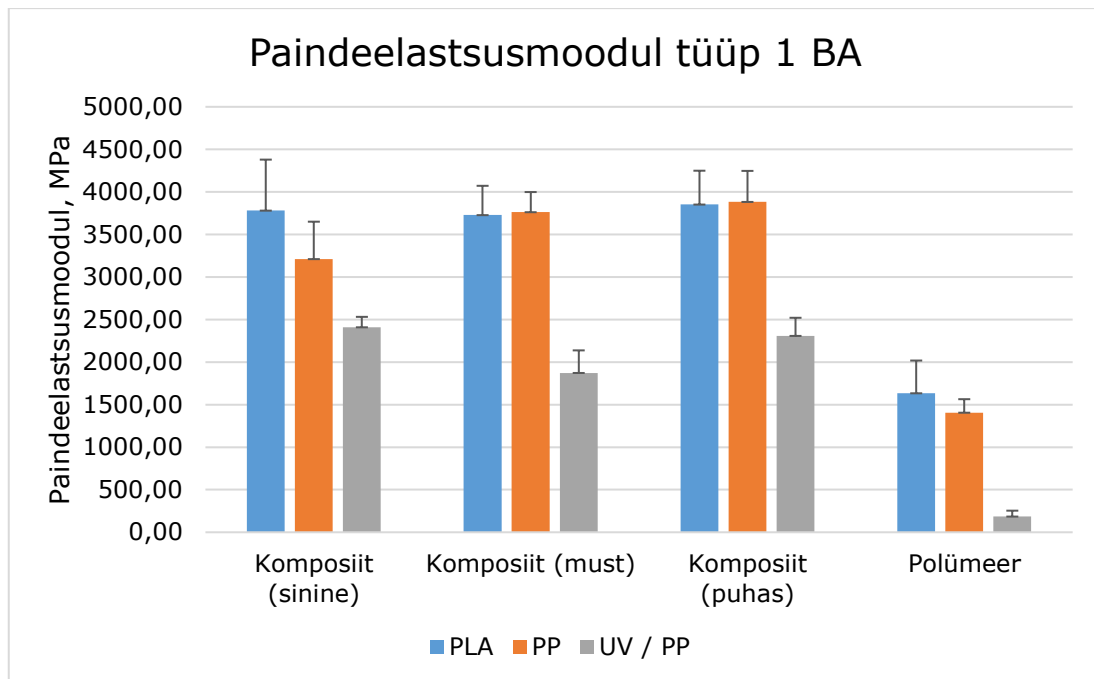
Töötlemata pilliroost kiudude kombineerimisel kõigi polümeeridega väheneb paindetugevus võrreldes puhta polümeeri omaga lignotselluloosmaterjalide (polaarsed) ja termoplastilise matriksi (mittepolaarsed) polaarsuse erinevuste tõttu. Samuti termoplastide väga hüdrofoobne olemus põhjustab ühilduvusprobleeme hüdrofiilsete tugevdavate materjalidega, näiteks lignotselluloosiga. See toob kaasa tühimikke materjalis või poorsuse olemasolu ja üldised halvad mehaanilised omadused [5].

Sarnaselt tõmbekatse tulemuste võrdlusele, tuuakse välja ka paindekatse mehaaniliste omaduste võrdlused. Katsetest täheldati paindetugevuse langust komposiidis võrreldes puhta polümeeriga. Eelnevad sarnased teadusuuringu on näidanud, et päevalilleseemne, pistaatsia ja sarapuupähkli koore jahuga täidetud PP komposiidi paindetugevuse väärtused suurenesid UV-kiirguse ja termilise vananemise tõttu. Sarnast aspekti täheldati antud töös teostatud katsetes, kus komposiidi paindetugevuse väärtused kasvasid pärast UV katset ning puhta polümeeri väärtused langesid [45].

Võrdlusena võib veel välja tuua, et tulemuste kohaselt suureneb komposiitide paindetugevus võrreldes puhta PLA matriksiga. Pinnatöötlus võib komposiitide paindetugevust veelgi parandada. Kui ramjee kiudu töödeldakse leeliselega, on komposiitmaterjalide tugevus suurem kui töötlemata või silaaniga töödeldud kiududel [22].

3.2.1 Painde elastsusmoodul

Painde elastsusmoodul määratakse paindekatsega saadud pingedeformatsioonikõvera sirge põhjal. Elastsusmooduli tulemused on toodud välja joonisel 3.3.1. Elastsusmoodul annab katsetustel kasuliku infot paindejäikuse määramiseks. Paindeelastsusmoodulit määrati pilliroostpolüpropüleeni komposiidile, pilliroostpolüpiimhappe komposiidile ning pärast füüsikalist katsetust (UV katse) olnud pilliroostpolüpropüleeni katsekehadele. Katsetulemustest saab järeldada, mida suurem on paindeelastsusmoodul, seda jäigem on materjal.



Joonis 3.3.1 Pilliroost polümeerkomposiidi paindeelasticusmoodul tüüp 1 BA

Jooniselt 3.3.1 saab järeldada, et komposiitmaterjal on tunduvalt jäigem võrreldes puhta polümeeriga, täpsemalt erinevus on umbes 64%. Komposiidi suurem jäikus on põhjustatud eripärast, et lignotselluloosikiududel on suurem jäikus võrreldes polümeermaatriksiga. Kõik komposiit segude näitajad püsisid samades väärtustes 3000 MPa juures. Lisaks toob graafik välja UV kiirguse mõju katsekeha paindemoodulile. PP paindemooduli väärtus langes ligikaudu 86 %, seevastu komposiitide paindemoodulite langus jäi 50 % hulka.

Jooniselt 3.3.1 on näha, et PLA paindemoodul on suurem kui PP, mis tähendab ka, et polüpiimhape on jäigem võrreldes polüpropüleeniga. Üldiselt võrreldes on PLA ja PP komposiitide paindemoodulid ligilähedased, mis tähendab, et looduslik kiud annab mõlemale polümeerile sama jäiga funktsiooni.

Komposiitjäikus sõltub kiu ja maatriksi omadustest, kiudainesisaldusest ja selle hajumisest maatriksi sees. Paindemooduli puhul on polümeeri ja maatriksi vahelise liidese kvaliteedil vähe mõju, nagu seda on varem täheldatud erinevate termoplastiliste tugevdatud komposiitide puhul. Komposiitmaterjali head jäikust saab seletada adhesiooniga ning materjali täitematerjali massiga [47].

Sarnaselt tõmbe- ja paindekatsede tulemuste juures välja toodud looduslike komposiitide mehaaniliste omaduste võrdluse puhul, tuuakse ka painde elasticusmooduli juures välja olulisemad mehaanilise omaduse võrdlused. Eelnevad uuringud on näidanud, et puhas PP paindemoodul suureneb, kui PP segati päevalillesemne pistaatsiakoore ja

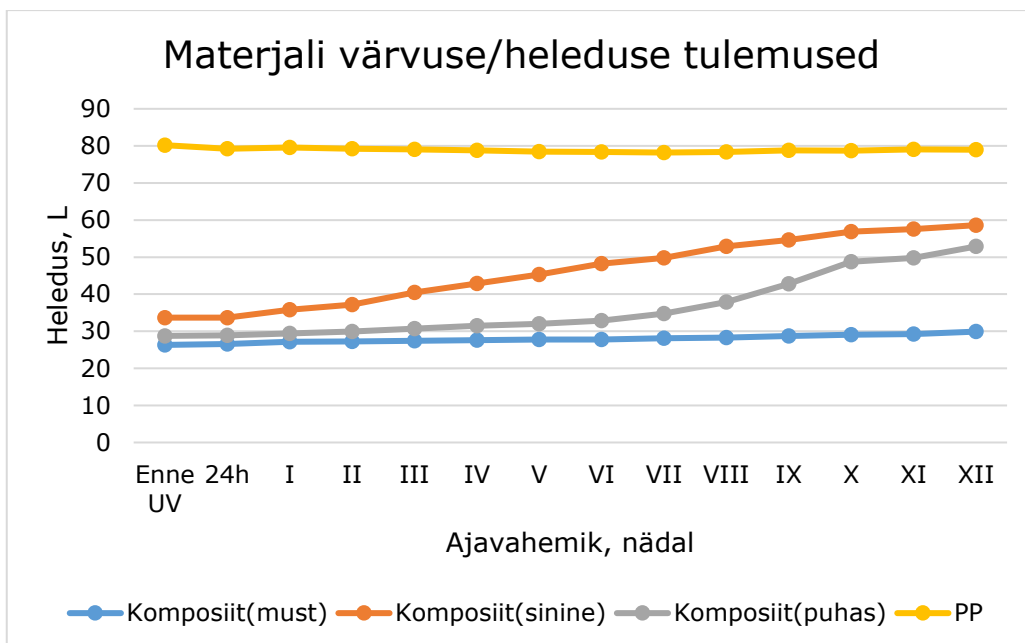
sarapuupähklikoorejahuga. Selle põhjuseks oli lignotsellulooskiudude suurem jäikus võrreldes polümeermaatriksiga [45].

Antud lõputöös täheldati sarnaseid paralleele, pilliroojahuga täidetud komposiidi paindemoodul suurenes võrreldes puhta polümeeriga. Üldiselt toob kiudude mahuosa suurendamine komposiitides kaasa komposiidi jäikuse märkimisväärse suurenemise, kuna looduslike kiudude lisamisel suureneb tõmbetugevus ja löögitugevus [45]. Kokkuvõtvalt saab öelda, et looduslik kiud annab komposiidile jäikuse.

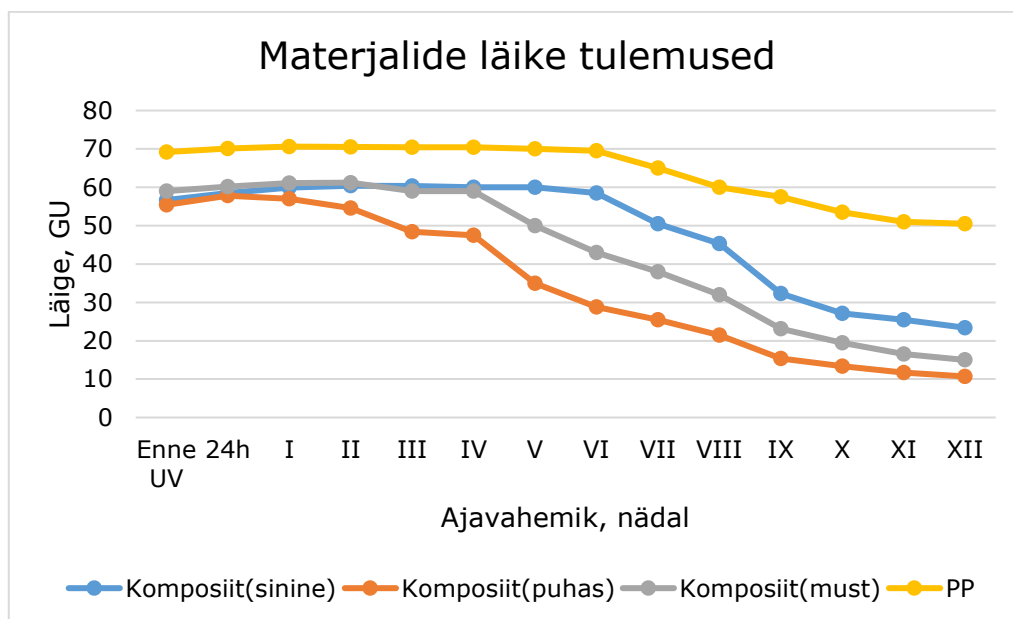
3.3 Värvuse ja läike muutus UV kiirguse toimel

Ultraviolettkiirgus (UV) on üks keskkonnateguritest, mis põhjustab polümeeri lagunemist. Looduslike kiudude lisamine polümeeri maatriksisse suurendab eeldatavasti mitte ainult komposiitmaterjali omadusi, vaid säilitab ka lagunemiskiiruse. Väliskeskkonnas kasutatavad looduslike kiududega tugevdatud polümeerkomposiidid võivad laguneda erinevate tegurite, näiteks niiskuse, temperatuuri, mikroorganismide aktiivsuse ja ultraviolettkiirguse mõjul [48].

Värvuse ja läike katsetuste tulemused toodi välja joonistel: 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3. UV katse teostati tüüp 1 BA pilliroostpolüpropüleeniga komposiidiga ja paindekatsekehadega. Ultraviolettkiirguse testi tulemused koostati kaheteistkümne nädala kohta. Puhta pilliroo ja sinise pillirooga komposiitmaterjalide proovid näitasid aja jooksul materjali heleduse/värvuse suurenemist, samas kui puhas polüpropüleen ja musta värvi pillirooga komposiitmaterjal jäid peaaegu muutumatuks. See võib viidata sellele, et must pigment on sinise pigmendiga võrreldes stabiilsem, samal ajal on UV-kiirguse käes tuhmunud puhas pilliroog ja sinine pilliroog. Materjalide heledus on toodud välja joonisel 3.4.1

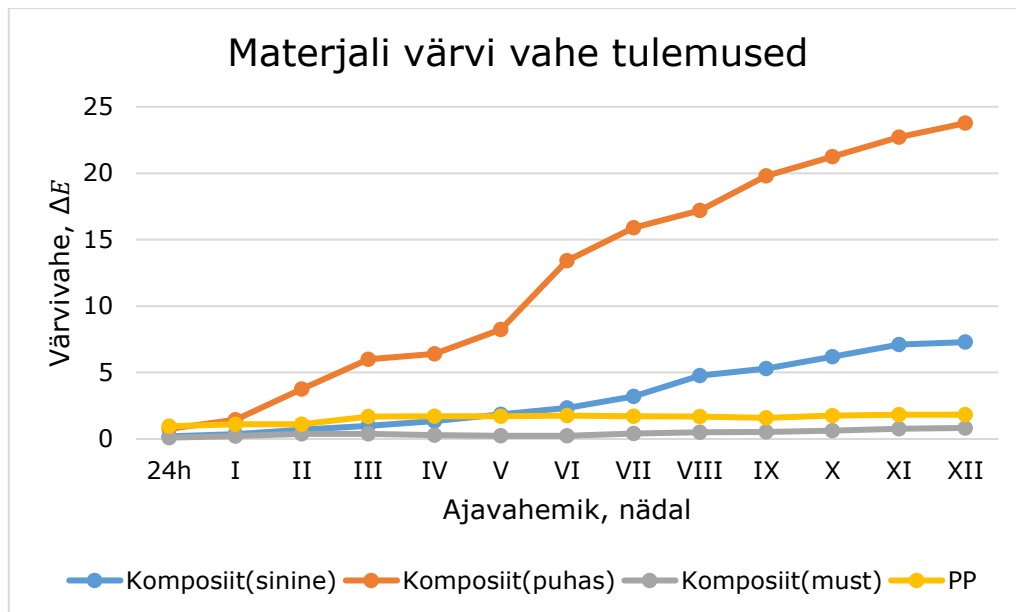


Joonis 3.4.1 Materjalide heleduse tulemused



Joonis 3.4.2. Materjalide läike tulemused

Kõigi proovide läige ei muutunud vananemiskatse alguses palju. Katse ajaskaala keskel hakkas see parameetri väärtus vähenema. Selle nähtuse tõenäolisteks põhjusteks on katsekehade pinnal UV-kiirguse toimel tekkinud mõrad. Materjalide läike tulemusi on näha joonisel 3.4.2.



Joonis 3.4.3 Materjalide värvivahe tulemused

Värvivahe ΔE tulemused on toodud joonisel 3.4.3. Kõigi komposiitmaterjalide värvimuutus suureneb aja jooksul, samal ajal kui puhtad polüpropüleenist proovid muutsid katse alguses värvi ja käitused seejärel stabiilselt. See näitab, et pilliroog mõjutab värvimuutust, puhta pilliroo katsekehadel on värvus suuremal määral muutunud kui värvilistel pilliroo katsekehadel. Võib öelda, et värvilised pigmendid kaitsevad komposiitmaterjale UV-kiirguse lagunemise eest

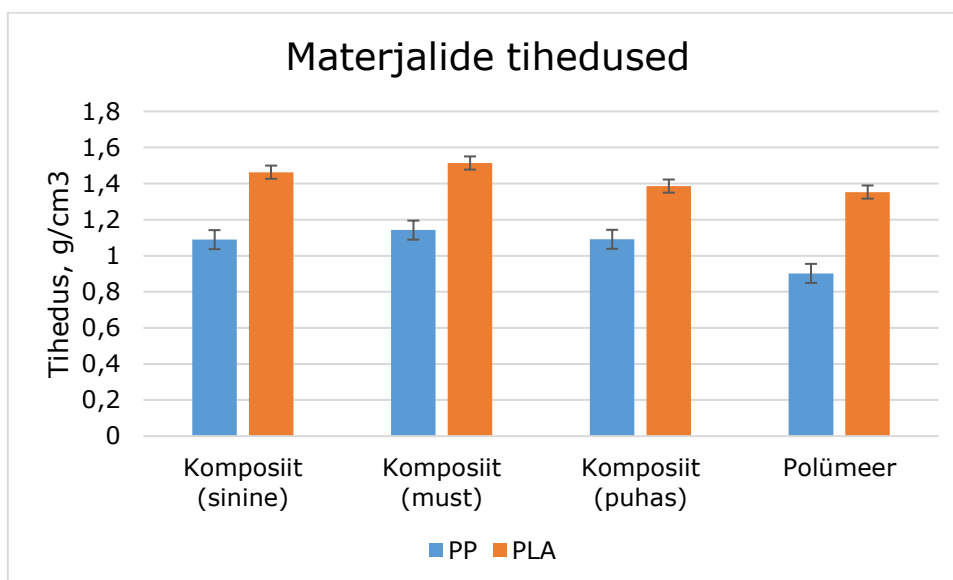
UV katse tulemuste juures toodi välja olulised põhjendused, mis mõjutavad mehaanilisi omadusi. Looduslikud kiudkomposiidid, mida kasutatakse väljas otsese päikesevalguse käes, alluvad kiirgusele ja kovalentsed sidemed orgaanilises polümeeris purunevad, põhjustades värvi tuhmumist, kaalukaotust, pinna karestumist, mehaaniliste omaduste halvenemist ja rabadust [48]. Lisaks on kiudainetöötlus polümeerkomposiitide tootmisel väga oluline tegur, kuna see võib kiudude ja maatriksi vaheliste heade sidemete kaudu oluliselt parandada UV vastupidavust [46].

Biokomposiitide fotolagunemine sõltub tugevalt kiu/täiteaine sisaldusest ja kiudude/täiteainete laadist. Täiteainete liitmine võib põhjustada kiirenenud lagunemist suurema hulga struktuuridefektide tõttu, mis hõlbustavad hapniku läbilaskvust polümeerahelate kaudu. Looduslike kiudude biokomposiidid muutuvad pärast ilmastikutingimusi peamiselt ligniini ja ekstraheerivate ainete lagunemise tõttu. Ligniin neelab 80-95 % kiirgusest a-karbonüül-, bifenüül- ja tsükliga konjugeeritud rühmade kaudu, mis reageerivad hapnikuga, moodustades kromoforsed rühmad. Sel põhjusel vastutab ligniin UV-kiirguse neelamise ja polümeeri lagunemise katalüüsivuse eest. Samuti laguneb ligniin kiiremini kui tselluloos ja muud kiudained. See on oluline tegur, mis

põhjustab materjali üldise lagunemise, mida pandi tähele ka antud töö katsekehade juures [46].

3.4 Tihedus

Materjali tihedust määrati nii pilliroost polüpropüleenkomposiidil kui ka pilliroost polüpiimhappekomposiidil. Tiheduse tulemused on toodud välja joonisel 3.5.1. Tiheduse määramisel mängib olulist rolli enne katse tegemist materjali hoidmine konditsioneeruumis. Tänu sellele saadakse täpsed tulemused, teistes tingimustes olles võib materjal muuta oma tihedust, näiteks mida kõrgem niiskuse sisaldus, seda suuremaks muutub tihedus.



Joonis 3.5.1 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi materjali tihedused

Jooniselt 3.5.1 on näha, et täiteaine ehk pilliroo jahu suurendab komposiidi tihedust. Täpsemalt komposiit on 21 % tihedam ehk raskem kui puhas PP. Katset tehes oli ka näha, kuidas puhas PP tõusis pinnale ehk oli vee tihedusest väiksem, samas komposiit vajus põhja ehk oli vee tihedusest suurem.

Jooniselt 3.5.1 selgub, et komposiitide tihedused on suuremad võrreldes PLAgaga. Kuna komposiidi tihedus sõltub koostisosade tihedusest, siis on näha täiteaine lisamisel materjalide tiheduse suurenemist. Katse tulemusena on näha mõlemast graafikust, et täiteaine suurendab materjali tihedust ning polüpiimhapest komposiidi tihedus on suurem võrreldes polüpropüleeni komposiidiga.

Viimasena võrreldi eelnevalt uurimistöodes analüüsitud looduslike komposiitide mehaanilisi omadusi tiheduse katsel. Näiteks on täheldatud, et puitplastist komposiitmaterjali tihedus suurenes järk-järgult koos modifitseeritud kiudainesisalduse suurenemisega eriti kui modifitseeritud kiu sisaldus komposiitmaterjalis kasvas 10 % -lt 20 % -ni. Kokkuvõtvalt saab öelda, et mida suurem osakaal täitematerjali komposiidis, seda suurema tihedusega on materjal [49].

Uurimistöodele tuginedes toodi välja, et tihedus suureneb proportsionaalselt osakeste suurenemisega ehk mida väiksema fraktsiooni täiteainega on tegu, seda väiksem tihedus komposiidil on. Pilliroo madal tihedus on eelis kogu komposiidi omadustes, kuna võimaldab lisada rohkem osakesi antud plaadi kohta ja pinge efektiivset jaotumist komposiidi sisestruktuuris [50].

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja uurida polüpropüleen (PP) ja polüpiimhappe (PLA) baasil valmistatud pilliroost polümeerkomposiitide mehaanilisi omadusi ning anda hinnang kumb komposiitmaterjal on sobilik korduvkasutatavate või ühekordsete nõude valmistamiseks.

Lõputöö eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised ülesanded:

- Valmistati pilliroost polümeerkomposiitmaterjal, mida oleks võimalik kasutada ühekordsete või korduvkasutatavate nõude ja joogitopside valmistamiseks;
- Uuriti komposiidi vastupidavust mehaanilistele ja füüsikalistele katsetustele;
- Võrreldi sünteetilise ja biopolümeeri mehaanilisi omadusi ja sobivust pilliroost biokomposiidi valmistamiseks.

Esmalt anti ülevaade komposiitmaterjali olemusest, toodi välja looduslikud komposiidid, tutvustati pilliroogu. Järgnevalt kirjeldati looduslikes komposiitides kasutatavaid polümeere. Anti ülevaade biokomposiitide arendamisest, teadlaste poolt läbi viidud katsetest ja arendustest. Tutvustati looduslike komposiitide kasutamist maailmaturul. Kirjeldati komposiitide valmistamise tehnoloogiat. Järgnevalt kirjeldati töös kasutatavaid materjale ja meetodeid. Komposiitplaadid valmistati polüpropüleenist polüpiimhappe baasil biolagunev polümeerisegust ning jahvatatud pilliroost. Töö käigus viidi läbi mehaanilisi ja füüsikalisi katsetusi. Mehaaniliste katsetustena teostati tõmbe- ja paindekatsed, lisaks arvutati paindemoodul. Füüsikalise katsetusena teostati UV katset ja viimasena leiti materjali tihedus.

Katsetustest selgusid järgneva tulemused :

- Tõmbe- ja paindekatsel puhtal polümeeril on tunduvalt tugevam (tõmbe- ja paindetugevus) võrreldes pilliroog polümeerkomposiitidega. Puhta polüpropüleen väärtused olid 24% kõrgemad võrreldes komposiitidega ning puhta polüpiimhappe väärtused ligikaudu 22%.
- Pärast UV katsetust komposiitide mehaanilised tulemused suures plaanis ei muutunud, drastiliselt vähenes polüpropüleen väärtus ligikaudu 80%.
- Värvuse ja läike tulemused kahanesis aja jooksul.
- Katse tulemustest oli näha, et täiteaine suurendab materjali tihedust ning polüpiimhappesest komposiidi tihedus on suurem võrreldes polüpropüleen komposiidiga.

Katsete tulemuste juures võrreldi biokomposiitide mehaanilisi omadusi juba eelnevalt uurimustöodes saadud tulemuste põhjal:

- Tõmbekatse puhul sai välja tuua võrdlustena, et puhta polümeeri tõmbetugevuse väärtus sarnaselt antud töös läbi viidud katsetega oli tunduvalt suurem võrreldes komposiidiga.
- Komposiitide tõmbetugevuse väärtused jäid samasse kategooriasse, mida saab täheldada ka antud töös sooritatud kastetes.
- Paindekatse puhul eelnevad sarnased teadusuuringud näitasid, et komposiidi paindetugevuse väärtused suurenesid UV-kiirguse ja termilise vananemise tõttu.

Kokkuvõtvalt võib töö autor järeldada, et mehaaniliste tulemuste põhjal sobiks antud töö raames kasutada pilliroo polüpropüleenkomposiiti. Oluline on ära märkida, et polüpiimhappe on biolagunev ja tunduvalt lihtsam utiliseerida, jäävad nii tõmbe kui ka paindekatse tulemused alla polüpropüleenile.

SUMMARY

The aim of this bachelor's thesis was to investigate the mechanical properties of reed based polymer composites containing polypropylene (PP) and polylactic acid (PLA) and to evaluate which composite material is suitable for the production of disposable or reusable utensils.

In order to achieve the objective of the thesis, the following tasks were set:

- a polymer composite material from reed was made that could be used to make disposable or reusable utensils and beverage cups;
- the resistance of the composite to mechanical and physical tests was studied;
- the mechanical properties of the synthetic and biopolymers and their suitability for reed biocomposite were compared.

First, an overview of the nature of composite material was given, natural composites were outlined and reed was presented. Thereafter the polymers used in natural composites were presented. An overview of the development of biocomposites, tests and developments carried out by researchers was given. The use of natural composites on the world market was described. The technology for making composites was described. Thereafter the materials and methods used in the work were described. Composite boards were made of polypropylene PPH 11012, polylactic acid-based biodegradable polymer blend t BIO-FLEX S 7514 and ground reed. Mechanical and physical tests were performed during the work. Tensile and flexural tests were performed as mechanical tests, in addition, the flexural modulus was calculated. As a physical test, UV test was performed and as a final step the density of the material was calculated.

The tests showed the following results:

- In tensile and flexural test a pure polymer appeared to be much stronger (tensile and flexural strength) compared to reed based polymer composites. The values of pure polypropylene were 24% higher than the values of composites and the values of pure polylactic acid were approximately 22% higher.
- After the UV test, the mechanical properties of the composites did not change to a large extent, the value of polypropylene decreased drastically by about 80%.
- The colour and gloss properties decreased over time.
- The results of the test showed that the filler increases the density of the material and that the density of the polylactic acid composite is higher compared to the polypropylene composite.

In the test results, the mechanical properties of the biocomposites were compared on the basis of the results obtained from previous research work:

- In the case of the tensile test, it could be pointed out by comparison that the value of the tensile strength of pure polymer, similarly to the tests performed in this work, was considerably higher compared to the composite.
- The values of the composites remained in the same category, which can also be observed in the tests performed in the frame of this work.
- Regarding the flexural test, previous similar researches showed that the bend strength values of the composite increased due to UV radiation and thermal aging.

As a summary, the author of the thesis can conclude that based on the mechanical results, a reed based polypropylene composite would be suitable for use in the frame of this work. It is important to note that polylactic acid is biodegradable and much easier to dispose of, both tensile and flexural test results being inferior to polypropylene.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. E. Abou-Zeid, N. A. El-Wkil ja Y. Fahmy, „Thermoplastic Composite from Natural Reed Fibers,” Researchgate, 2015.
- [2] E. Keijers, M. v. d. Oever, J. v. Dam, A. Lansbergen, C. Koning ja H. v. d. Akker, „The development of reed composite fiber boards using partially bio-based, foraldehyde- and monomeric isocynate-free resins,” Researchgate, 2019.
- [3] M. Gupta ja A. P. Gupta, Polymer Composites (3rd edition), 2019.
- [4] R. A. Ilyas ja S. Sapuan, „The preperation methods and processing of natural fiber bio-polymer,” Researchgate, 2019.
- [5] T. Pejis, „Materials Technology, natural fiber based composites,” Tandofline, 2000.
- [6] K. Rohit ja S. Dixit, „A Review - Future Aspect of Natural Fiber Reinforced Composite,” Researchgate, 2015.
- [7] J. G. A. K Bledzki, „Composite reinforced with cellulose based fibers- Progress in polymer science,” ScienceDirect, 1999.
- [8] J. Miljan ja Ü. Kask, Pilliroog ja selle kastamise võimalused, 2013.
- [9] J. F. .. Köbbing, N. Thevs ja S. Zerbe, „The utilisation of reed (Phragmites Australis): review,” 2013.
- [10] L. Ryu, Reed composite, manufacturing method thereof and building material using the same, 2012.
- [11] H. G. Karian, „Handbook of polypropylene and polypropylene composites, revised and expanded,” Google Books, 2009.
- [12] D. Tripathi, „Practical guide to polypropylene,” Google Books, 2002.
- [13] C. Maier ja T. Calafut, Polypropylene - The Definitive User's Guide and Databook, 1999.
- [14] A. K. Bledzki, P. Francszczak, Z. Osman ja M.Elbadwi, „Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaka, jute and kenaf fibers,” ScienceDirect, 2015.
- [15] P. o. t. E. A. o. Science, „Proceedings of the Estonian Academy of Science,” 2021. [Vörgumaterjal]. Available: <https://kirj.ee/proceedings/>. [Kasutatud 15 Mai 2021].
- [16] S. J. Kima, J.-B. Moonb, G.-H. Kimc ja C.-S. Ha, „Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composites: Comparison of wood and cotton fiber,” ScienceDirect, 2008.

- [17] H. P. S. A. Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan ja Y. S. Hadi, „Bamboo fiber reinforced biocomposites: A review,“ ScienceDirect, 2012.
- [18] Zhang ja Yachun, „Processing and development of polysaccharide- based biopolymers for packaging applications,“ Knovel, 2020.
- [19] Kutz ja Myer, „Applied plastics engineering handbook- processing materials and applications,“ Knovel, 2017.
- [20] S. Farah, D. G. Anderson ja R. Langer, „Advanced drug delivery reviews - physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread application,“ ScienceDirect, 2016.
- [21] K. Oksman, M. Skrifvars ja J.-F. Selin, Natural fibers as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites, Composites and Technology, 2003.
- [22] T. Yu, J. Ren, S. Li, H. Yuan ja Y. Li, „Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites,“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010.
- [23] J. Adam, B. A. Korneliuz ja M. Agnieljzka, „Dynamic mechanical thermal analysis of biocomposites based on PLA and PHBV—A comparative study to PP counterparts,“ Wiley online library, 2012.
- [24] P.Saini, M.Arora ja R. K. M.N.V, „Poly(lactic acid) blends in biomedical applications,“ National library of Medicine, 2016.
- [25] H. Zhao ja G. Zhao, „Mechanical and thermal properties of conventional and microcellular injection molded poly (lactic acid)/poly (ϵ -caprolactone) blends,“ ScienceDirect, 2016.
- [26] B. Nekhamanurak, P.Patanathaautr ja N. Hongrisphar, „The Influence of Micro-/Nano-CaCO₃ on Thermal Stability and Melt Rheology Behavior of Poly(Lactic Acid),“ ScienceDirect, 2014.
- [27] M.Mayer, „What is PLA+ and how its diferent from regulaar PLA?,“ 3D Solved, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://3dsolved.com/what-is-pla-and-how-is-it-different-from-regular-pla/>. [Kasutatud 20 Mai 2021].
- [28] B.Oudho, „PLA vs PLA+/PLUS filament: The Differences,“ ALL3DP, 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://all3dp.com/2/pla-vs-pla-3d-printer-filament-compared/>. [Kasutatud 22 Mai 2021].
- [29] Composites, „Nova-Institute releases list of European biocomposite producers,“ Composites, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://composites.eu/nova-institute-releases-list-of-european-biocomposite-producers/?lang=en>. [Kasutatud 25 Mai 2021].

- [30] Storaenso. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.storaenso.com/en/products/granules/durasense-applications/product-finder>. [Kasutatud 28 Mai 2021].
- [31] KatrinKabun, KatrinKabun, [Võrgumaterjal]. Available: <https://katrinkabun.com/projektid/mjuk/>. [Kasutatud 29 Mai 2021].
- [32] T.Lehmann, „Recyclable Disposable Tableware Fabricated From Rapidly Renewable Resources“. Ameerika Patent 20180014668, 25 September 2018.
- [33] 余景强, „Melamine composite material for kitchenware“. Hiina Patent CN102660104B, 2012.
- [34] E. Comission, „Food and safety,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://ec.europa.eu/food/safety_en. [Kasutatud 30 Mai 2021].
- [35] Kozłowski ja M. Ryszard, Handbook of Natural Fibres, Volume 2 – Processing and Applications, 2014.
- [36] M. Ramesh, K. Palanikumar ja K. H. Reddy, Plant fibre based bio- composites: Sustainable and renewable green, Elsevier Ltd, 2017.
- [37] B.Harris, Engineering composite materials, 1999.
- [38] FKUR, „Bio-Flex S 7514,“ FKUR, 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://fkur.com/en/brands/bio-flex/bio-flex-s-7514/>. [Kasutatud 30 Mai 2021].
- [39] E. standardikeskus, „Plastics - Determination of flexural properties (ISO 178:2019),“ Eesti standardikeskus, 15 Mai 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-178-2019>. [Kasutatud 30 Mai 2021].
- [40] E. standardikeskus, „Plastid. Tõmbeomaduste määramine. Osa 2: Vormitud ja ekstrusiooni teel saadud plastide teimimise tingimused (ISO 527-2:2012),“ Eesti standardikeskus, 4 Aprill 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-527-2-2012>. [Kasutatud 30 Mai 2021].
- [41] E. standardikeskus, „Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space (ISO/CIE 11664-4:2019),“ Eesti standardikeskus, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=112430&language=EnglishLanguage>. [Kasutatud 30 Mai 2021].
- [42] E. standardikeskus, „Plastics - Methods for determining the density of non-cellular plastics - Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method (ISO 1183-1:2019, Corrected version 2019-05),“ Eesti standardikeskus, Mai 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-1183-1-2019>. [Kasutatud 30 Mai 2021].
- [43] A. Benkhalladi, H. Laouici ja A. BOuchoucha, „Tensile and flexural properties of polymer composites reinforced by flax, jute and sisal fibres,“ Springer Link, 2020.

- [44] J. M. N. Graupner, „Cellulose Fiber-Reinforced PLA versus PP,“ Hindawi, 2017.
- [45] E. Kurami, „UV and thermal weathering of green composites: Comparing the effect of different agricultural waste as fillers,“ Sage Journals, 2020.
- [46] E. Yousif ja R. Haddad, „Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review,“ PMC, 2013.
- [47] H.Oliver-Ortega, M.F.Llopa, F.X.Espinach, Q.Tarrés, M.Ardanuy ja P.Mutjé, „Study of the flexural modulus of lignocellulosic fibers reinforced bio-based polyamide green composites,“ 2018.
- [48] M. Zaleha, M. Fitri ja S. Mahzan, „ UV radiation effect towards mechanical properties of Natural Fibre Reinforced Composite material: A Review.,“ Researchgate, 2017.
- [49] L. Liu, M. Lin, Z. Xu ja M. Lin, „Polylactic acid-based wood-plastic 3D printing composite and its properties,“ BioRes, 2018.
- [50] N. Hlabano, L. N. Ndlovu, N. R. Sibanda ja L. K. Ncube, „ Production and Characterization of Reed and Wood Particles/Phenol Formaldehyde Resin Composite Board,“ 2018.
- [51] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop ja M. Trada, „A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites,“ ScienceDirect, 2011.
- [52] A.Israr, „ResearchGate,“ Juuni 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/figure/A-Three-dimensional-CIELAB-color-space-where-the-L-axis-represents-the-colors_fig2_318751900. [Kasutatud 1 Juuni 2021].

LISA 1. PPH 11012 polüpropüleenini omadused

Tabel 1-1 Polüpropüleenini mehaanilised omadused

Omadus	Tingimused	Tüüpiline suurus	Ühik	Testimismeetod
Tihedus		0,905	g/cm ³	ISO 1183
Tõmbetugevus		34	MPa	ISO 527-2
Tõmbemoodul		1700	MPa	ISO 527-2
Paindemoodul		1600	MPa	ISO 178
Sulamistemperatuur		65	°C	ISO 3146
Sulavoolavusindeks	(230°C/2.16kg)	55	g/10 min	ISO 1133
Kõvadus, Rockwell		100	R-sakaala	ISO 2039-2
Charpy löögitugevus, sälguga	(+23°C)	3	kJ/m ²	ISO 179

LISA 2. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi tõmbetugevus

Tabel 2-1 Polüpropüleeni mehaanilised tugevused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	22,28	1491,13	222,77
Katsekeha 2	24,58	1609,07	245,8
Katsekeha 3	23,88	1440,15	238,83
Katsekeha 4	23,34	976,11	233,43
Katsekeha 5	22,26	726,95	222,57
Keskmine	23,27	1246,88	232,68
Standarthälve	1,01	379,73	10,14

Tabel 2-2 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (sinise) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	16,65	2820,67	166,49
Katsekeha 2	17,06	2770,5	170,6
Katsekeha 3	18,62	2758,93	186,22
Katsekeha 4	14,77	2738,28	147,67
Katsekeha 5	18,75	2849,22	171,69
Keskmine	17,17	2787,56	171,69
Standarthälve	1,63	45,89	16,32

Tabel 2-3 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (must) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	17,44	1806,67	174,42
Katsekeha 2	14,74	2490,95	147,4
Katsekeha 3	14,46	2613,04	144,57
Katsekeha 4	13,87	2503,61	138,71
Katsekeha 5	19,01	2740,36	190,11
Keskmine	15,9	2430,92	159,04
Standarthälve	2,21	363,14	22,14

Tabel 2-4 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (värvimata) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	15,57	2950,83	155,74
Katsekeha 2	14,64	2776,55	146,45
Katsekeha 3	16,38	2837,6	163,77
Katsekeha 4	16,52	2387,35	165,22
Katsekeha 5	18,04	3066,58	180,39
Keskmine	16,23	2803,78	162,31
Standarthälve	1,26	257,87	26,99

LISA 3. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi paindekatsese tulemused

Tabel 3-1 Polüpropüleeni mehaanilised tulemused

	Paindepinge (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	34,36	1150,65	71,59
Katsekeha 2	36,61	1538,32	76,28
Katsekeha 3	37,83	1388,41	78,82
Katsekeha 4	35,73	1741,04	74,43
Katsekeha 5	34,98	1377,62	72,87
Keskmine	35,9	1406	74,8
Standarthälve	1,368	257,87	2,84

Tabel 3-2 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (sinine) mehaanilised tulemused

	Paindepinge (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	32,69	3184,89	68,11
Katsekeha 2	27,9	3325,71	58,12
Katsekeha 3	29,95	3118,55	62,29
Katsekeha 4	27,25	3209,39	56,57
Katsekeha 5	30,13	3198,11	62,77
Keskmine	29,56	3210,97	61,59
Standarthälve	2,17	459,24	4,522

Tabel 3-3 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (rauddioksiid) mehaanilised tulemused

	Paindepinge (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	26,85	3794,59	55,93
Katsekeha 2	33,92	4448,94	70,66
Katsekeha 3	26,97	3286,99	56,18
Katsekeha 4	28,91	3683,51	60,22
Katsekeha 5	28,32	3155,1	59,01
Keskmine	28,99	3762,51	60,4
Standarthälve	2,89	650,52	6,022

Tabel 3-4 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (värvimata) mehaanilised tulemused

	Paindepinge (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	24,67	5179,34	51,4
Katsekeha 2	25,69	4794,42	53,52
Katsekeha 3	25,33	4734,12	52,78
Katsekeha 4	27,16	5212,69	56,58
Katsekeha 5	23,55	4521,45	49,05
Keskmine	25,28	4913,75	52,67
Standarthälve	1,33	260,64	2,77

LISA 4. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi UV katse tõmetugevuse tulemused

Tabel 4-1 Polüpropüleeni mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	4,72	652,15	0,75
Katsekeha 2	5,01	692,15	0,71
Katsekeha 3	4,51	582,12	0,55
Katsekeha 4	4,66	619,15	0,91
Katsekeha 5	4,60	606,90	0,44
Katsekeha 6	6,51	711,60	0,69
Katsekeha 7	4,9	678,71	0,87
Keskmine	4,99	648,98	0,7
Standarthälve	0,69	47,97	0,2

Tabel 4-2 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (sinine) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	13,62	1830,8	1,55
Katsekeha 2	14,14	2009,03	1,41
Katsekeha 3	14,81	2146,23	1,21
Katsekeha 4	14,12	1867,23	1,38
Katsekeha 5	14,07	1855,9	1,56
Katsekeha 6	12,73	1737,94	1,23
Katsekeha 7	12,68	1822,58	1,61

Katsekeha 8	12,76	1946,05	1,56
Katsekeha 9	13,68	2002,66	1,08
Keskmine	13,62	1913,14	1,4
Standarthälve	0,75	124,29	0,18

Tabel 4-3 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (must) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	10,72241	1460,85	2,73
Katsekeha 2	13,79241	1780,52	1,69
Katsekeha 3	13,1471	1727,51	1,43
Katsekeha 4	13,11974	1753,15	1,37
Katsekeha 5	13,83986	1801,04	1,70
Katsekeha 6	13,73266	1793,05	1,61
Katsekeha 7	13,85244	1749,18	1,80
Katsekeha 8	13,85528	1766,76	1,59
Katsekeha 9	12,8202	1667,28	1,61
Keskmine	13,14	1711,64	1,71
Standarthälve	0,97	105,19	0,38

Tabel 4-4 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (värvimata) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	10,05	1743,54	0,96
Katsekeha 2	11,21	1878,28	1,18
Katsekeha 3	9,43	1707,65	0,85

Katsekeha 4	10,41	1846,50	0,89
Katsekeha 5	11,13	1846,42	1,09
Katsekeha 6	10,48	1799,21	1,02
Katsekeha 7	10,98	1830,00	1,00
Katsekeha 8	10,35	1756,90	0,9
Katsekeha 9	9,80	1710,05	0,95
Keskmine	10,43	1790,95	0,09
Standarthälve	0,6	63,51	0,09

LISA 5. Pilliroost polüpropüleenkomposiidi UV katse paindetugevuse tulemused

Tabel 5-1 Polüpropüleeni mehaanilised tulemused

	Paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	7,07	307,78	3,77
Katsekeha 2	6,69	196,95	3,53
Katsekeha 3	6,80	203,11	3,53
Katsekeha 4	6,23	141,66	3,97
Katsekeha 5	5,81	141,08	3,57
Katsekeha 6	6,6	120,03	3,57
Katsekeha 7	6,54	185,10	3,77
Keskmine	6,54	181,1	3,66
Standarthälve	0,45	68,66	0,17

Tabel 5-5 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (sinine) mehaanilised tulemused

	Paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	30,88	2464,64	3,42
Katsekeha 2	30,58	2566,90	3,57
Katsekeha 3	30,85	2373,58	3,28
Katsekeha 4	31,40	2500,94	3,66
Katsekeha 5	30,12	2248,89	3,75
Katsekeha 6	29,87	2304,36	3,54
Katsekeha 7	30,62	2409,88	3,18

Katsekeha 8	30,88	2464,64	3,57
Katsekeha 9	30,58	2566,9	3,42
Keskmine	30,06	2409,88	3,05
Standarthälve	0,5	121,19	0,19

Tabel 5-3 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (must) mehaanilised tulemused

	Paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	30,10	2140,37	3,42
Katsekeha 2	29,60	1697,46	3,57
Katsekeha 3	26,25	1802,27	3,28
Katsekeha 4	30,41	1801,16	3,66
Katsekeha 5	26,95	1681,29	3,75
Katsekeha 6	27,43	2018,27	3,54
Katsekeha 7	32,04	2317,45	3,18
Katsekeha 8	30,38	1525,13	3,57
Katsekeha 9	29,14	1872,92	3,42
Keskmine	29,14	1872,92	3,05
Standarthälve	2,02	264,26	0,19

Tabel 5-4 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (värvimata) mehaanilised tulemused

	Paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	24,73	2348,43	2,88
Katsekeha 2	25,15	2492,07	2,59
Katsekeha 3	24,78	1960,14	2,65

Katsekeha 4	24,87	2485,01	2,50
Katsekeha 5	25,34	2148,2	2,92
Katsekeha 6	23,81	2416,55	2,78
Katsekeha 7	24,78	2308,40	2,88
Keskmine	24,78	2080,04	2,72
Standarthälve	0,53	212,14	0,16

LISA 6. Pilliroost polüpiimhappekomposiidi tõmbetugevus 1 BA

Tabel 6-1 Polüpiimhappe mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	20,76	1704,99	1,5
Katsekeha 2	15,34	1668,27	0,97
Katsekeha 3	19,13	1703,06	1,31
Katsekeha 4	17,89	1647,80	1,22
Katsekeha 5	19,31	1638,73	1,41
Katsekeha 6	19,62	1714,71	1,34
Katsekeha 7	18,12	1647,53	1,2
Katsekeha 8	17,50	1654,54	1,18
Katsekeha 9	18,18	1694,75	1,2
Katsekeha 10	19,99	1726,31	1,36
Keskmine	18,58	1680,07	1,28
Standarthälve	1,53	31,15	0,15

Tabel 6-2 Pilliroost polüpiimhappekomposiidi (sinine) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	13,94	2865,59	0,45
Katsekeha 2	12,24	3046,82	0,37
Katsekeha 3	15,89	2989,52	0,51
Katsekeha 4	15,27	3139,62	0,46

Katsekeha 5	12,61	2938,21	0,40
Katsekeha 6	13,30	3003,73	0,41
Katsekeha 7	11,37	2961,07	0,35
Katsekeha 8	11,28	3044,58	0,34
Katsekeha 9	15,29	3120,68	0,47
Katsekeha 10	13,07	3064,98	0,40
Keskmine	13,43	3017,46	0,42
Standarthälve	1,64	83,16	0,05

Tabel 6-3 Pilliroost polüpiimhappekomposiidi (rauddioksiid) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	17,66	2675,32	0,69
Katsekeha 2	18,15	2721,72	0,69
Katsekeha 3	18,76	2737,75	0,7
Katsekeha 4	16,88	2864,30	0,58
Katsekeha 5	20,12	2865,23	0,73
Katsekeha 6	17,82	2758,31	0,66
Katsekeha 7	19,89	2902,72	0,71
Katsekeha 8	15,68	2611,26	0,61
Katsekeha 9	18,75	2911,77	0,6
Katsekeha 10	17,36	2851,10	0,60
Keskmine	18,11	2789,95	0,64
Standarthälve	1,34	103,24	0,09

Tabel 6-4 Pilliroost polüpiimhappekomposiidi (värvimata) mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	14,47	2922,77	0,47
Katsekeha 2	15,04	2841,53	0,52
Katsekeha 3	14,89	2833,78	0,51
Katsekeha 4	15,17	2892,52	0,52
Katsekeha 5	15,64	2854,36	0,55
Katsekeha 6	15,36	2838,04	0,53
Katsekeha 7	14,70	2963,32	0,47
Katsekeha 8	17,03	2921,24	0,6
Katsekeha 9	14,77	2846,29	0,51
Katsekeha 10	16,68	2920,56	0,58
Keskmine	15,37	2883,45	0,52
Standarthälve	0,85	46,33	0,23

LISA 7. Pilliroost polüpiimhappekomposiidi paindetugevus tüüp 1 BA

Tabel 7-1 Polüpiimhappe mehaanilised tulemused

	Paindetugevus(MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	34,22	1863,56	2,16
Katsekeha 2	37,77	1899,85	2,40
Katsekeha 3	35,90	1806,71	2,38
Katsekeha 4	37,80	1796,07	2,45
Katsekeha 5	42,53	2021,05	2,19
Katsekeha 6	33,09	1006,12	2,88
Katsekeha 7	29,96	1078,58	2,22
Katsekeha 8	28,55	1601,03	1,85
Keskmine	34,98	1634,14	2,32
Standarthälve	4,5	384,14	0,29

tabel 7-2 pilliroost polüpiimhappekomposiidi (must) mehaanilised tulemused

	Paindetugevus(MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	26,75	3661,59	0,79
Katsekeha 2	27,10	3772,89	0,81
Katsekeha 3	29,96	3676,9	0,93
Katsekeha 4	28,73	3816,45	0,83
Katsekeha 5	29,8	3921,63	0,86
Katsekeha 6	32,71	4262,87	0,87

Katsekeha 7	29,63	3022,64	1,04
Katsekeha 8	28,81	3940,20	0,81
Katsekeha 9	25,26	3476,86	0,79
Katsekeha 10	26,75	3661,59	0,58
Keskmine	28,76	3438,88	0,86
Standarthälve	2,18	343,88	0,08

Tabel 7-3 Pilliroost polüpiimhappekomposiidi (värvimata) mehaanilised tulemused

	Paindetugevus(MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	29,41	4290,65	0,73
Katsekeha 2	28,73	4284,63	0,75
Katsekeha 3	26,47	3993,55	0,71
Katsekeha 4	28,01	3410,54	0,84
Katsekeha 5	24,52	3858,08	0,70
Katsekeha 6	25,56	4032,43	0,72
Katsekeha 7	25,13	4185,71	0,68
Katsekeha 8	24,85	3055,02	0,80
Katsekeha 9	25,65	3730,62	0,75
Katsekeha 10	25,21	3685,30	0,75
Keskmine	26,36	3852,55	0,74
Standarthälve	1,76	396,67	0,09

Tabel 7-4 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi (sinine) mehaanilised tulemused

	Paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Paindepinge (%)
Katsekeha 1	20,29	3788,12	0,56
Katsekeha 2	20,8	2437,89	0,66
Katsekeha 3	22,13	4187,27	0,54
Katsekeha 4	20,07	4099,93	0,56
Katsekeha 5	23,57	3601,86	0,62
Katsekeha 6	21,47	4032,49	0,57
Katsekeha 7	25,56	4021,40	0,68
Katsekeha 8	25,84	4669,73	0,59
Katsekeha 9	23,88	3350,38	0,74
Keskmine	22,36	3781,23	0,61
Standarthälve	2,23	598,55	0,06

LISA 8. Pilliroost polüpiimhappekomposiidi tõmbetugevus tüüp 1 A

Tabel 8-1 Polüpiimhappe mehaanilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tõmbepinge (%)
Katsekeha 1	40,68	2853,38	3,25
Katsekeha 2	43,16	2932,48	3,13
Katsekeha 3	42,71	2880,05	2,99
Katsekeha 4	41,77	2794,38	3,08
Katsekeha 5	41,27	2700,11	3,1
Katsekeha 6	42,70	2857,18	3,05
Katsekeha 7	38,13	2458,76	3,0
Katsekeha 8	39,42	2937,49	2,89
Katsekeha 9	30,45	2433,87	1,45
Katsekeha 10	42,82	2873,21	3,0
Keskmine	40,31	2772,09	2,89
Standarthälve	184,7	46,33	0,51

Tabel 8-2 Pilliroost polüpiimhappe (värvimata) mehannilised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Maksimaalne jõud (N)
Katsekeha 1	34,85	4283,14	1,26
Katsekeha 2	34,88	5365,67	1,10
Katsekeha 3	34,65	5953,70	0,94
Katsekeha 4	32,91	5982,59	0,79

Katsekeha 5	26,85	5851,1	0,52
Keskmine	32,83	5487,24	0,92
Standarthälve	0,94	717,16	0,28

LISA 9. Materjalide tihedused

Tabel 9-1 Pilliroost polüpropüleenkomposiidi tihedused

Materjal		Tihedus (g/cm ³)
Polüpropüleen (PP)	Katsekeha 1	0,904
	Katsekeha 2	0,900
	Katsekeha 3	0,899
	Katsekeha 4	0,901
	Katsekeha 5	0,907
	Keskmine	0,902
	Standartväärtus	0,003
Komposiit (sinine)	Katsekeha 1	1,136
	Katsekeha 2	1,147
	Katsekeha 3	1,133
	Katsekeha 4	1,154
	Katsekeha 5	1,142
	Keskmine	1,142
	Standartväärtus	0,008
Komposiit (raudmustoksiid)	Katsekeha 1	1,071
	Katsekeha 2	1,100
	Katsekeha 3	1,066
	Katsekeha 4	1,124
	Katsekeha 5	1,085
	Keskmine	1,089

	Standartväärtus	0,023
Komposiit (värvimata)	Katsekeha 1	1,095
	Katsekeha 2	1,078
	Katsekeha 3	1,092
	Katsekeha 4	1,095
	Katsekeha 5	1,095
	Keskmine	1,091
	Standartväärtus	0,007

Tabel 9-2 Pilliroost polüpiimhappekomposiidi tihedused

Materjal		Tihedus (g/cm ³)
Polüpiimhape (PLA)	Katsekeha 1	1,353
	Katsekeha 2	1,353
	Katsekeha 3	1,353
	Katsekeha 4	1,352
	Katsekeha 5	1,352
	Keskmine	1,353
	Standartväärtus	0,001
Komposiit (sinine)	Katsekeha 1	1,467
	Katsekeha 2	1,467
	Katsekeha 3	1,460
	Katsekeha 4	1,465
	Katsekeha 5	1,457
	Keskmine	1,463

	Standartväärtus	0,005
Komposiit (raudmustoksiid)	Katsekeha 1	1,514
	Katsekeha 2	1,511
	Katsekeha 3	1,511
	Katsekeha 4	1,516
	Katsekeha 5	1,518
	Keskmine	1,514
	Standartväärtus	0,003
Komposiit (värvimata)	Katsekeha 1	1,386
	Katsekeha 2	1,382
	Katsekeha 3	1,389
	Katsekeha 4	1,385
	Katsekeha 5	1,388
	Keskmine	1,386
	Standartväärtus	0,003