EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Marko Remmelgas

TERMOTÖÖDELDUD LEPAPUIDU LIIMÜHENDUSE TUGEVUS

ADHESIVE BOND PERFORMANCE OF HEAT-TREATED ALDER WOOD

Magistritöö
Metsatööstuse õppekava

Juhendaja: nooremprofessor
Regino Kask, *PhD*

Tartu 2023

www.emu.ee

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Marko Remmelgas		Õppekava: Metsatööstus	
Pealkiri: Termotöödeldud lepapuidu liimühenduse tugevus			
Lehekülgi: 72	Jooniseid: 24	Tabeleid: 24	Lisasid: 0
Õppetool: Metsa- ja maakorralduse ning metsatööstuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Metsakasvatus, metsandus, metsandustehnoloogia (B430) Juhendaja(d): Regino Kask, *PhD* Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2023			

Järjest kasvava nõudluse tõttu jätkusuutlike ehitusmaterjalide järele, seda eelkõige CO_2 emissiooni ja energiatarbimise vähendamiseks, on puit kogu maailmas muutumas järjest tähtsamaks materjaliks. Puit on üks enim kasutatavaid materjale ehitustöödeks, mida kasutatakse erinevates rakendustes. Puiduliikide tohutu mitmekesisus tagab selle, et alati on olemas mingi liik, mille omadused sobivad konkreetsele kasutamise otstarbele. Seega on puittoodete majanduslik mõju märkimisväärne. Viimastel aastakümnetel on katsetatud puidu mõõtmete vastupidavuse ja stabiilsuse parandamiseks mitmeid meetodeid, mis väldivad kemikaalide kasutamist. Üheks neist meetoditest on puidu termiline töötlemine. Puitdetailide liimimisel on tähtis roll metsatööstuse arengus ning ka puiduressursi tõhusal kasutamisel. Tänapäeval on rohkem kui kaks kolmandikku puittoodetest täielikult või vähemalt osalisel määral liimitud. Põhjuseks on see, et liimimine pakub palju eeliseid võrreldes teiste puitdetailide ühendamismeetoditega. Liimid võimaldavad peaaegu kõiki puiduliike muuta funktsionaalseteks toodeteks, olenemata materjali mõõtudest. Samuti on liimimine kasulik, kuna võimaldab kasutada täispuidutöötlemise kõrvalsaadusi.

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on uurida termiliselt töödeldud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevust. Uurimusest selgus, et üldiselt oli termiliselt töödeldud halli lepa liimimise tulemuslikkus väiksem kui sanglepal. Termiline töötlemine vähendas halli lepa liimühenduste keskmist nihketugevust kõikide liimide puhul. Sanglepa puhul selgus, et termiline töötlemine vähendas liimühenduste nihketugevuse väärtust osaliselt. Töötlusastmetel 1, 2, 6, 9 ja 10 oli sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus kõikide liimide puhul suurem halli lepa väärtustest. Töötlusastmetel 5-10 näitas sanglepa puhul head tulemust liim Soudal Pro 45P, moodustades kõikidest PVA liimidest tugevamad ühendused. Hallil lepal moodustusid kõige tugevamad ühendused töötlusastmetel 4-10 samuti Soudal Pro 45P liimiga, mis oli lisaks PVA liimidele ka töös kasutatud teisest PUR liimist Soudal Pro 40P efektiivsem.

Märksõnad: liimühenduse tugevus, termiline töötlus, hall lepp, sanglepp

www.emu.ee

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Marko Remmelgas		Curriculum: Forest Industry	
Title: Adhesive bond performance of heat-treated alder wood			
Pages: 72	Figures: 24	Tables: 24	Appendixes: 0
Chair: Chair of Forest Management Planning and Wood Processing Technologies Field of research and (CERC S) code: Silviculture, forestry, forestry technology (B430) Supervisors: Regino Kask, *PhD* Place and date: Tartu 2023			

Due to the growing demand for sustainable building materials, in particular to reduce CO_2 emissions and energy consumption, wood is becoming an increasingly important material worldwide. Wood is one of the most widely used materials in construction and in a wide range of applications. The huge diversity of wood species ensures that there is always a species with the right characteristics for a particular application. Therefore, the economic impact of wood products is significant. During recent decades, several methods have been tested to improve the dimensional stability and durability of wood, avoiding the use of chemicals. One of such methods is the thermal treatment of wood.

The gluing of wood components plays an important role in the development of forest-based industries as well as in the efficient use of our wood resources. Today, more than two-thirds of wood products are fully or at least partially glued. This is because gluing offers many advantages compared to other methods of joining wood components. Adhesives make it possible to transform almost all types of wood into functional products regardless of the dimensions of the material. Gluing also allows the use of by-products from solid wood processing.

The purpose of this master's thesis is to investigate the strength of the adhesive bond between thermally treated grey alder and black alder.

The study showed that, in general, the bonding performance of heat-treated grey alder was lower than that of black alder. Heat treatment reduced the average shear strength of grey alder adhesive joints for all adhesives. In the case of black alder, the heat treatment was found to partially reduce the value of the shear strength of the adhesive joints. At treatment levels 1, 2, 6, 9 and 10, the average shear strength of the black alder adhesive joints was higher than grey alder values for all adhesives. In treatment levels 5 to 10, Soudal Pro 45P adhesive performed well for black alder, forming stronger joints than any of the PVA adhesives. For grey alder, the same results occurred at treatment levels 4-10 with Soudal Pro 45P adhesive, which in addition to PVA adhesives was also more effective than the other PUR adhesive used in the work, Soudal Pro 40P.

Keywords: adhesive bond strength, thermal treatment, grey alder, black alder

SISUKORD

SISSEJUHATUS 5
1. TERMOTÖÖDELDUD PUIT 7
1.1. Termotöötlust mõjutavad tegurid 7
1.1.1. Temperatuur ja töötluse kestvus 8
1.1.2. Atmosfäär 8
1.1.3. Puuliik 8
1.1.4. Puidu mõõtmed 9
1.1.5. Suletud ja avatud süsteem 9
1.1.6. Katalüsaatorite kasutamine 10
1.2. Puidu termilise töötlemise meetodid 10
1.2.1. Termilise töötlemise meetod ThermoWood 11
2. PUIDULIIMID 14
2.1. Looduslikud liimid 15
2.1.1. Tanniinid 16
2.1.2. Ligniinid 17
2.1.3. Süsivesikud 17
2.1.4. Küllastumata õlid 18
2.2. Sünteetilised liimid 18
2.2.1. Polüvinüülatsetaat 19
2.2.2. Polüuretaan 20
2.2.3. Kuumliimid 21
2.2.4. Karbamiidliimid 21
3. MATERJAL JA METOODIKA 23
3.1. Uurimustööks kasutatav materjal 23
3.1.1. Sanglepp (*Alnus glutinosa L.*) 23
3.1.2. Hall lepp (*Alnus incana L.*) 23
3.2. Töö metoodika 24
3.2.1. Katsematerjali esmane töötlemine 24
3.2.2. Nihketugevuse määramine 28
3.2.3. Andmeanalüüs 30
4. UURIMISTULEMUSED JA ARUTELU 32
4.1. Liimühenduse nihketugevuse sõltumine liimist 32
4.2. Liimühenduse nihketugevuse sõltumine töötlusastmest 46
KOKKUVÕTE 67
KASUTATUD KIRJANDUS 69

SISSEJUHATUS

Järjest suureneva rahvastiku kasvu juures on üha enam vaja arendada tehnoloogiaid, kus taastuvaid materjale kasutatakse taastumatute materjalide otsese asendajana. Meie praegune taastumatute energiaallikate tarbimise määr on juba täna kõrge, kuid varud, millest nad pärinevad, piiratud. Seega pole meie praegused tarbimisharjumused pikaajaliselt jätkusuutlikud. (Hill 2006: 1) Järjest kasvava nõudluse tõttu jätkusuutlike ehitusmaterjalide järele, seda eelkõige CO_2 emissiooni ja energiatarbimise vähendamiseks, on puit kogu maailmas muutumas järjest tähtsamaks materjaliks. Puit on üks enim ehitustöödeks kasutatavaid materjale, mida kasutatakse mitmesugusteks rakendusteks. Puiduliikide tohutu mitmekesisus tagab, et alati on olemas mingi liik, mille omadused sobivad konkreetsele kasutamise otstarbele. Seega on puittoodete majanduslik mõju märkimisväärne. (Boonstra 2008: 41) Viimastel aastakümnetel on katsetatud puidu mõõtmete vastupidavuse ja stabiilsuse parandamiseks mitmeid meetodeid, mis väldivad kemikaalide kasutamist. Üheks neist meetoditest on puidu termiline töötlemine. (Shi *et al.* 2007: 1)

Puitdetailide liimimisel on tähtis roll metsatööstuse arengus ja kasvus (Frihart, Hunt 2010: 228) ning ka puiduressursi tõhusal kasutamisel (Frihart 2015: 4). Tänapäeval on rohkem kui kaks kolmandikku puittoodetest täielikult või vähemalt osalisel määral liimitud. Põhjuseks on see, et liimimine pakub palju eeliseid võrreldes teiste puitdetailide ühendamismeetoditega. (Pizzi, Mittal 2010: 1) Liimid võimaldavad peaaegu kõiki puiduliike muuta funktsionaalseteks toodeteks olenemata materjali mõõtudest (Frihart 2015: 4). Samuti on liimimine kasulik, kuna võimaldab kasutada täispuidutöötlemise kõrvalsaadusi (Wood adhesion… 2023).

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on uurida termiliselt töödeldud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevust.

Töö eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgmised uurimisülesanded:

1) Kirjeldada puidu termotöötlemise protsesse ja mõjutavaid tegureid.
2) Anda ülevaade erinevatest puiduliimidest.

3) Valmistada ette materjal ja teostada katsekehade liimühendusete nihketugevuse katsed.

Magistritöö teoreetiline osa on kirjanduse ülevaade. Selle tegemisel on kasutatud nii varasemalt välja antud teaduspõhiseid artikleid kui ka teisi asjakohaseid trükiseid ning varasemalt tehtud uurimistöid. Töö empiiriline osa toetub eelkõige esmastele allikatele. Andmete kogumiseks töödeldi uuritav materjal sobivasse mõõtu, teostati liimimine ning lõigati välja katsekehad. Seejärel ühtlustati katsekehad kliimakambris ning teostati liimühenduse nihketugevuse katsed.

Käesolev magistritöö koosneb kolmest peatükist. Töö teoreetilises osas kirjeldatakse puidu termotöötlemise protsesse ja mõjutavaid tegureid. Ühtlasi antakse ülevaade erinevatest puiduliimidest. Magistritöö empiirilises osas kirjeldatakse esmalt materjale ning metoodikat, mille alusel tulemusi koguti ning analüüsiks ette valmistati. Seejärel tuuakse välja saadud tulemused ning nende analüüs.

Töö autor tänab oma juhendajat, kes aitas töö valmimisele oma märkuste ning ettepanekutega igakülgselt kaasa.

1. TERMOTÖÖDELDUD PUIT

Puidu termiline modifitseerimine on kõigist erinevatest puidu modifitseerimisprotsessidest enim arenenud suund. Termiliselt indutseeritud makromolekulaarsete koostisosade keemiliste muutuste tulemusena muutuvad puidus nii selle füüsikalised kui bioloogilised omadused. (Hill 2006: 99-100) Termiliselt töödeldud puit on oma eriliste omaduste tõttu puidutööstuses väga tähtsal kohal (Xie *et al.* 2002: 229). Termiline modifitseerimine või kuumtöötlemine on tehnoloogia, mis võimaldab madalama vastupidavusega okas- ja lehtpuuliikide töötlemist püsiva kvaliteediga puittoodeteks. Selliseid tooteid kasutatakse mitmesuguste rakenduste puhul – näiteks aiapiirded, fassaadid ja terrassid. Peamine puidu termilisel töötlemisel saavutatav mõju on selle hügroskoopsuse vähenemine. Sellisel viisil töödeldud puidu peamised eelised on suurem vastupidavus erinevat tüüpi biolagunemisele ja parem mõõtmete stabiilsus. (Boonstra 2008: 17) Samuti väheneb puidus kulumiskindlus, toimub materjali tumenemine ja tekib kalduvus pragude ja lõhede tekkeks (Hill 2006: 100).

Puidu termiline modifitseerimine toimub temperatuurivahemikus 180°C kuni 260°C. Temperatuurid alla 140°C põhjustavad vaid väheseid muutuseid materjali omadustes, seevastu uurimused temperatuuril üle 300°C on piiratud väärtusega tingituna substraadi lagunemisest. Seetõttu on kaasaegsed termilise modifitseerimise protsessid piiratud temperatuuridega, mis ei ületa 260°C. (Hill 2006: 99)

1.1. Termotöötlust mõjutavad tegurid

Puitu saab termiliselt töödelda mitmesugustel erinevatel meetoditel (Hill 2006: 100), kusjuures valitud töötlemisviis võib oluliselt mõjutada puidu omadusi (Sandberg, Kutnar 2016: 31). Puidu omaduste muutumine termilise töötlemise käigus sõltub töötlemisparameetritest: puidu liigist ja omadustest, puidu algniiskusest, kuumutamise kestusest ja temperatuurist ning isegi töödeldud puidu mõõtmetest. Samuti on olulisteks teguriteks suletud või avatud süsteemi rakendamine, katalüsaatorite kasutamine ja niiske või kuiva süsteemi eelistamine. (Hill 2006: 100)

1.1.1. Temperatuur ja töötluse kestvus

Enamikku termilise töötlemise omadusi mõjutab lisaks tooraine omadustele ka termilise töötlemise temperatuur ja protsessi kestus (Sandberg, Kutnar 2016: 33). Puidu kuumutamisel toimub algselt materjali kaalu vähenemine, mis on tingitud seotud vee ja lenduvate ekstraktide eraldumisega, sealhulgas vähem lenduvad ekstraktid liiguvad puidu pinnale. Temperatuuri tõustes toimub edasine materjali kaalulangus ja värvimuutused, mis on tingitud rakuseina makromolekulaarsetes komponentides toimuvatest keemilistest muutustest. (Hill 2006: 100)

1.1.2. Atmosfäär

Termilise lagunemise kiirust mõjutab ka ümbritsev atmosfäär, eriti hapniku olemasolu või selle puudumine. On tõestatud, et hapniku olemasolu juures on termiline lagunemine kiirem kui hapnikuvabas atmosfääris. (Mitchell 1987: 321) Hapnikus töötlemine põhjustab oksüdatiivsete protsesside toimumist ning lagunemisel tekkivad keemiliste elementide ühendid ja saadud materjaliomadused erinevad oluliselt. Varasemalt on tehtud mõningaid uurimusi, kus puitu kuumutatakse õlis, mis toimib soojusülekande vahendina ja eemaldab puidu seest hapnikku. Selle tulemusena on Saksamaal välja töötatud Menzholz'i protsess. Vesi, kui seda on piisavas koguses, võib toimida katteainena, mis vastavalt takistab või vähendab oksüdatsiooniprotsesside kiirust. (Hill 2006: 101)

1.1.3. Puuliik

On täheldatud erinevusi, kuidas erinevad puiduliigid reageerivad termilisele töötlusele, seda eelkõige leht- ja okaspuidu vahel. Termiline, hüdrotermiline või hügrotermiline töötlemine toob kaasa materjali kaalu vähenemise, mis on üldiselt lehtpuuliikide puhul kõrgem kui okaspuuliikide puhul. (Hill 2006: 101) Kitsaste aastarõngastega ja järsu üleminekuga kevad- ja sügispuidu vahel on okaspuu liigid tundlikud sügispuidu tangentsiaalse pragunemise suhtes. Harilikul kuusel tekivad radiaalsed praod, mis on põhjustatud töötlemise ajal

tekkivatest pingetest puidu struktuuris. Lehtpuuliigid nagu pöök ja pappel on valdavalt tundlikud pooride kokkuvarisemise ja nende läheduses asuvate libriformsete kiudude mõningase deformatsiooni suhtes. Nii okas- kui ka lehtpuude puhul on täheldatud kiudude suunas risti olevate rakuseinte purunemist, mille tulemuseks on ristsuunalised rebenemised. See aitab kaasa töödeldud puidu järskudele murdumistele, mida on täheldatud paindumiskatsetes. (Boonstra 2008: 18)

1.1.4. Puidu mõõtmed

Materjali heterogeensus mõjutab seda, kuidas puit reageerib termilisele töötlusele. Et tagada ühtlane temperatuur kogu materjali ulatuses, mängib olulist rolli soojuse ülekandumise kiirus puidu sisemusse. Kuna kuiva puidu soojusjuhtivus on madal, on kuiva materjali töödeldes tähtis valida õige kuumutusmeetod, et saavutada võimalikult ühtlane tulemus. Ka suurte mõõtmetega materjalide töötlemisel on soojusülekanne väga oluline tegur. (Hill 2006: 102)

Termilise töötluse praktiline tagajärg on puidu mõõtmete vähenemine, mis on tingitud puidu kahanemisest. Paksemate mõõtmetega puidu kuivatamisel on mõju protsessitingimustele, kuna see töötlemisetapp põhineb ainult soojusjuhtivusel ja kuumutatav mass on suurem. Selle tulemuseks on kuumutamise ja jahutamise kiiruse vähenemine, mis omakorda pikendab protsessi aega. (Boonstra 2008: 240)

1.1.5. Suletud ja avatud süsteem

Puidu kuumutamine suletud reaktoris toob kaasa erinevate laguproduktide kogunemise, mis omakorda võib mõjutada puidus toimuvaid keemilisi muutusi. Atsetüülrühmadest toodetud hapete olemasolu tõttu hemitselluloosis toimub rakuseina polüsahhariidkomponentide kiirem lagunemine. Avatud süsteemi kasutamine termotöötluses võimaldab neid aineid kõrvaldada. Kui suletud reaktoris töödeldakse toorest puitu kõrgsurveauru kaasmõjul, siis avatud süsteemis vesi väljutatakse. Mõnes protsessis kasutatakse ka tsirkulatsioonisüsteemi, kus kondenseeruvad saadused nagu lenduvad ekstraktiivained ja vesi ning

lagunemissaadused nagu äädikhape eemaldatakse enne töötlemiskeskkonda tagasi jõudmist. (Hill 2006: 102)

1.1.6. Katalüsaatorite kasutamine

Uurimusi, kus kasutatakse puidu kuumutamisel lagunemisprotsesside kiirendamiseks kemikaale, ei ole palju tehtud. See hõlmab tavaliselt katalüsaatorite kasutamist, mis omakorda tekitavad happeid ja seeläbi kiirendab polüsahhariidsete koostisosade lagunemist. Katalüsaatoreid ei kasutata kaubanduslikult. Aastal 1959 uuris Stamm materjali mõõtmete stabiilsuse parandamist, kasutades mitmesuguseid katalüsaatoreid. Uuring näitas, et mõõtmete stabiilsuse suurendamiseks katalüsaatorite mõjul vähenes kuumutamisaeg. Samuti selgus, et katalüsaatorid ei mõjutanud seost mehaaniliste omaduste ning kuumutamisest tingitud kaalukaotuse ja mõõtmete stabiilsuse vahel. (Hill 2006: 102)

1.2. Puidu termilise töötlemise meetodid

Puidu termilise modifitseerimise uuringud hakati tegema 20. sajandi alguses (Xi et al. 2002: 224). Esimesed andmed sellest pärinevad 1920ndatest aastatest (Wikberg 2004: 1). Stamm ja Hansen (1937) uurisid kuumtöödeldud puidu paisumist ja kahanemist. Andmed näitasid, et kuivatatava puidu hügroskoopsus vähenes oluliselt, kuid mitte märja puidu puhul. Tugevuse kadu oli õhu käes töödeldud puidul suurem kui gaasilises keskkonnas. Stamm et al. (1946) teatasid esimesest süstemaatilisest katsest suurendada puidu vastupidavust puidumädaniku seentele kuumas metallvannis. Aruandes märgiti, et paranenud vastupidavuse ja mõõtmete stabiilsusega kaasnes tugevuse vähenemine. (Xi et al. 2002: 224) Vahepealsetel aastatel on vastavateemalised meetodid palju paranenud ja puidu kasutusviisid on selle tulemusena oluliselt mitmekesistunud (Wikberg 2004: 1).

Peamised erinevused termilise töötlemise meetodite vahel tulenevad protsessitingimustest: etapid, hapniku või lämmastiku kasutamine, aurutamine, märg- või kuivprotsess, õlide kasutamine ja juhtimisskeemid (Militz, 2002: 1). Enamkasutatavad puidu termilise töötlemise meetodid on soomlaste ThermoWood, hollandlaste Platowood, sakslaste OHT

(*oil-heat treatment*) ja prantslaste New Option Wood (Gérardin 2016: 564). Antud töös kasutatud katsematerjal on töödeldud kasutades ThermoWood meetodit, sellest tulenevalt käsitletakse protsessi pikemalt.

1.2.1. Termilise töötlemise meetod ThermoWood

Alates 1990ndatest on Soomes tehtud põhjalikke uuringuid puidu termilise töötlemise kohta, mis on aidanud viia protsessi tööstuslikule tasandile. Soome teaduskeskuses VTT on välja töötatud puidu termilise töötlemise protsess, mis kannab nime ThermoWood. (Militz 2002: 3) ThermoWood'i toodete müük on Soomes olnud edukas ning müügikogused suurenevad ka mujal Euroopas, kus peamisteks tarbijateks on Prantsusmaa, Holland, Belgia ja Saksamaa. Kuigi ThermoWood materjali tootmine toimub peamiselt Soomes, toodetakse seda piiratud mahus ka Austrias ja Eestis. (Hill 2006: 176)

ThermoWood'i tootmise puhul on tegemist hügrotermilise töötlemisega, kus kuumtöötlemine toimub auru juuresolekul. Aur toimib puidu oksüdatiivset lagunemist piirava katteainena, lisaks toimuvad niiskuse tõttu täiendavad reaktsioonid. Õhusisaldus ahjus on kuumtöötlemise ajal piiratud 3–5 protsendini.

ThermoWood'i tootmisprotsess jaguneb kolmeks etapiks: (Hill 2006: 177–178)

1) Temperatuuri tõstmine ja puidu kuivatamine. Puidu temperatuuri tõstmiseks 100°C-ni kasutatakse soojuse ja auru kombinatsiooni. Seejärel tõstetakse temperatuur 130°C-ni, mis vähendab puidu niiskusesisalduse ligikaudu 0 protsendini.

2) Termiline töötlemine. Kui kõrge temperatuuriline kuivatamine on lõppenud, tõstetakse ahju temperatuur 185-230°C-ni ja hoitakse antud vahemikus 2-3 tundi. Selle etapi temperatuur ja aeg sõltub soovitavast termilise töötlemise klassist.

3) Jahutamine ja niiskusesisalduse konditsioneerimine. Antud protsessi etapis alandatakse temperatuuri järk-järgult veepihustussüsteemide abil kuni temperatuur on vahemikus 80-90°C. Seejärel konditsioneeritakse puitu niiskusesisalduseni 4–7%.

Kuigi algselt määratleti ThermoWood toodete jaoks kolm töötlemisklassi, on tööstus nüüdseks otsustanud kahe standardse klassi kasuks: Thermo-S ja Thermo-D. Thermo-S on helepruuni värvi ja sobib siseruumides kasutamiseks. Lisaks sobib antud toode ka muude rakenduste puhul, kus kokkupuude veega ei ole pikaajaline ja parem mõõtmete stabiilsus on

kasulik. Thermo-S klassi tooted toodetakse suhteliselt leebe kuumtöötluse teel. Thermo-D on intensiivsema termilise töötlemise tulemus ja on mõõtmete poolest stabiilsem, tumedam ja teatud määral vastupidavam bioloogilise rünnaku suhtes. (Hill 2006: 178)

Antud töötlemise meetodi rakendamisel kasutatakse okaspuuliikidest mändi ja kuuske ning lehtpuudest enamasti kaske ja haaba. Enim kasutatakse termilisel töötlemisel okaspuuliike, mida kasutatakse vastavalt terrasside, aiatarvikute ning välis- ja sisekattematerjalide valmistamiseks. Lehtpuidust tooteid kasutatakse saunapinkide, paneelide ja põrandakatete valmistamiseks. (Hill 2006: 178)

ThermoWood meetodi kasutamisel on eelistatud puuliigiks mänd vaatamata sellele, et vaigu eritumine võib põhjustada mõningaid probleeme. Kuuske peetakse termilisel töötlemisel vähem rahuldavaks, seda peamiselt okste pragunemise ja lahtikukkumise tõttu. Sellest hoolimata töödeldakse kuuske suuremates kogustes kui mändi. Termiliselt töödeldud kaske kasutatakse siseruumides, kus mädanemiskindlus ei ole oluline. Peamiselt soovitud omaduseks on töötlemisest tingitud värvimuutus. Seevastu kase puhul võib olla probleemiks puidu väändumine. Haaba kasutatakse samuti siseruumides, kuid selle värvus võib töötlemise järgselt olla ebaühtlane ja tõenäolisem on ka puidu lõhenemine, eriti kui see sisaldab nii lüli- kui maltspuitu. (Hill 2006: 178)

Tabelis 1 on välja toodud ThermoWood töötlemise klasside temperatuurid okas- ja lehtpuude puhul.

Tabel 1. *ThermoWood* standardklasside töötlemise temperatuurid (Hill 2006: 178)

Töötlemise klass	Okaspuud	Lehtpuud
Thermo-S	190 ± 3 °C	185 ± 3 °C
Thermo-D	212 ± 3 °C	200 ± 3 °C

Tänu intensiivsematele töötlemistingimustele on Thermo-D töötluse läbinud materjalil suurem mõõtmete stabiilsus ja bioloogiline vastupidavus võrreldes Thermo-S materjaliga. Kõige suuremates kogustes toodetakse Thermo-D materjali, seda peamiselt fassaadirakenduste jaoks. ThermoWood on väiksema tiheduse ja paindetugevusega võrreldes modifitseerimata puiduga. Puidu termiline töötlemine ei muuda elastsuse moodulit. ThermoWood'i ei soovitata kasutada koormust kandvate rakenduste puhul, kuna

materjali vastupidavus ja kulumiskindlus väheneb ning puit kipub rohkem lõhenema. (Hill 2006: 179)

ThermoWood materjali võrdlus modifitseerimata puiduga: (Hill 2006: 179)

1) Tasakaaluniiskus on suhtelise õhuniiskuse juures 40-50% madalam.
2) Niiskuse läbilaskvus on suurem.
3) Mõõtmete stabiilsus on parem.
4) Soojusjuhtivus on vähenenud umbes 20-25%.
5) Tulekindlus on halvem.
6) Laboritingimustes on vastupidavus parem.
7) Vastupidavus on väiksem olles kontaktis maapinnaga.
8) Vähem vastuvõtlik putukate rünnaku suhtes.

2. PUIDULIIMID

Puiduliimid liigitatakse laias laastus kas sünteetilisteks või looduslikeks (Conner 2001: 9583). Nad omavad olulist rolli nii mööbli- kui ka metsatööstuses toodete arendamisel ja puidu tõhusal kasutamisel. Seejuures on just liim puittoodete valmistamisel üheks sagedamini kasutatavaks materjaliks. Liimid on olulised erinevate toodete nagu uste, akende, aga ka vineeride ja puitlaastplaatide struktuuri säilitamisel. Märkimisväärset kogust liimi kasutatakse ka põrandakatete, köögi tasapindade ning lae- ja seinapaneelide valmistamisel. (Ülker 2016: 272)

Kasutatavad liimid ja liimimistehnoloogia valik mõjutavad oluliselt liimitud toodete tehnilisi ja keskkonnaalaseid omadusi, toimivust ja kulusid. Tänapäeval kasutatakse toodete valmistamisel peamiselt sünteetilisi, õlipõhiseid ja kahekomponentseid liime. Keskkonnaalastel põhjustel on taastuvatel ressurssidel põhinevaid liime nagu tanniinid, ligniinid, süsivesikud ja valgud viimasel ajal laboris rohkelt uuritud, kuid praktikas kasutatakse neid harva. Puidu ja liimi vahelise sideme loomine toimub peamiselt sekundaarsete vesiniksidemete ja liimi mehaanilise kinnistumise kaudu poorses puidukoes. Puidu liimühenduse moodustamiseks on oluline, et liim oleks korralikult puidupindadele jaotatud. Samuti on puidu liimimisel tähtsad materjali enda pinnaomadused. Kasutatavad liimid liigitatakse keemilise koostise või lõppkasutuse alusel. Näiteks välis- või ilmastikukindlad liimid ja kandvate konstruktsioonide liimid. (Wood adhesion… 2023)

Puidu termiline ja keemiline töötlemine põhjustavad puidus halbu pinnaomadusi (Podgorski *et al.* 2000: 104). Ekstraktiivsed ained on tavalised puidupinna saasteallikad, mis kahjustavad puidu adhesiooni (Sernek 2002: 12). Puidu termilise töötlemise käigus ekstraheeruvate ühendite tõttu kahaneb ka märguvus (Podgorski *et al.* 2000: 104). Ekstraktiivsete ainete sadestumine puidupinnale võib vähendada liimi tugevust mitmel viisil (Sernek 2002: 12). Ekstraheeruvad ühendid liiguvad puidu pinnale, kus nad moodustavad nõrga kihi, mis omakorda takistab liimi penetreerumist puidu pooridesse (Podgorski *et al.* 2000: 104). Kõrge ekstrahentide kontsentratsioon pinnal suurendab liimi saastumise ja sidumistugevuse vähenemise võimalust (Sernek 2002:12).

Teadmised puidu liimimistehnoloogiast on tänapäeval veel puudulikud. Tehtud on üsna vähe alusuuringuid erinevate liimitüüpide ja puitmaterjalide vahelise liimimise mehhanismide ja liimimist mõjutavate tegurite kohta. Turule on toodud uusi liimitüüpe, kuid metsatööstuses puuduvad sageli vajalikud teadmised liimide optimaalsest valikust vastavalt tootenõuetele. Liimimise kulud on üsna kõrged ja liimimisprotsess võib endast kujutada pudelikaela, mis piirab omakorda tootmise kiirust ja võimsust. Vead liimimisel põhjustavad tootmises jäätmeid ja praktikas nõrgestab see usaldust puittoodete vastu. Mõned liimid võivad olla seotud ka terviseriskidega ja probleemidega jäätmete töötlemisel. (Wood adhesion… 2023)

2.1. Looduslikud liimid

Mõiste „looduslik liim“ hõlmab mistahes polümeerset ja eelpolümeerset monomeeri või oligomeeri, mis on saadud loodusest ning moodustab kõvenemisel püsiva sideme. Looduslikel ja taastuvatel ressurssidel põhinevate liimide kasutamiseks tööstuses on vajalik rakendada uudseid tehnoloogiaid ja meetodeid. Vaatamata sünteetiliste liimide kasutamise kasvavale suundumusele pakuvad looduslike toodete keemilisel modifitseerimisel põhinevad protsessid võimalusi uue põlvkonna kõrgekvaliteediliste materjalide loomiseks. Looduslike materjalide kasutamise selgeid eeliseid – väiksem toksilisus, biolagunevus ja kättesaadavus – tuleb täiendada tõhusamate ja odavamate tootmismeetoditega. Optimaalse lähteaine valikul tuleb silmas pidada nii regionaalset kui ka liigilist erinevust ning selle kaudu arendada kulutõhusaid tootmistehnoloogiaid, mis võimaldaksid nendel materjalidel saavutada suuremat osakaalu maailmaturul. (EUR 20609… 2002: 59)

Taimsed liimid jagunevad üldjoontes nelja kategooriasse: tanniinid, ligniin, süsivesikud ja küllastumata õlid. Tänapäeval on nendest puidutööstuses kasutusel ainult tanniin ja ligniin ning needki ainult vähesel määral. Tanniini kasutatakse peamiselt Lõuna-Aafrikas, Austraalias ja Lõuna-Ameerikas, kus selle põhiliseks kasutusalaks on paneelide tootmine. Ligniini kasutatakse reageeriva ainena koos kaubandusliku fenool-formaldehüüdiga, et lisada kaubanduslikule vaigule konkreetne omadus, milleks on tavaliselt paindlikkus. Lisaks kasutatakse nii tanniini kui ka ligniini sünteetilistes fenool- ja resortsiinipõhistes vaikudes. (EUR 20609… 2002: 59)

Liimid, mis põhinevad loomsetel saadustel, on želatiini tüüpi liimid. Neid saadakse loomakasvatuse jäätmetest ja kõrvalsaadustest. Loomsete liimide tooraine on veiste ja muude loomade nahad ning luud. Samuti kasutatakse nahatööstuse jäätmeid pargitud nahkade näol. (Ülker 2016: 280)

2.1.1. Tanniinid

Tanniinid ekstraheeritakse agrometsanduse biomaterjalidest nagu puit, koor, lehed ja viljad. Tanniinid võib üldiselt jagada kahte suurde kategooriasse: hüdrolüüsitavad tanniinid ning kondenseeritud polüflavonoidtanniinid. Viimane on üks puiduliimi uuringute peamine uurimisobjekt, moodustades 90% kogu maailma tanniini toodangust. Tanniini aastane tööstuslik toodang ulatub kuni 200 000 tonnini. (Zhou, Du 2020: 2)

Hüdrolüüsitavad tanniinid koosnevad paljudest üksikkomponentidest ja oligomeeridest, kuid kõik põhinevad gallikhappe ja suhkrute kombinatsioonidel ning lihtsate fenoolide segudel nagu näiteks pürogallool ja ellagiinhape. Hüdrolüüsimisel lahjendatud väävelhappega saadakse gallikhapete ja suhkrukomponendi segu, millest tuleneb ka nimetus „hüdrolüüsitud“. Tanniinipõhiseid liime sünteesitakse peamiselt polükondensatsioonimehhanismi abil formaldehüüdi või selle derivaadi eelkondensaatidega. (EUR 20609… 2002: 60)

Tanniini on aastaid kasutatud puiduliimina kohtades, kus see on kergesti kättesaadav ja kus fenoolide pakkumine on piiratum ning kulukam (Frihart 2015: 4). Seda kasutatakse näiteks vineeri valmistamiseks. Tavapärase koostise ja tehnoloogiaga valmistatud liimid ei vasta siiski väliskeskkonnas kasutatava vineeri liimile esitatavatele nõuetele. Seega tuleb seda modifitseerida, segades seda teiste sünteetiliste vaikudega või orgaaniliste ning anorgaaniliste teisendajatega. (Zhou, Du 2020: 10)

2.1.2. Ligniinid

Ligniinid on suured kolmemõõtmelised polümeerid, mida toodavad kõik vaskulaarsed maismaataimed (EUR 20609… 2023). See on tselluloosi järel maailmas suuruselt teine taastuv biopolümeer, moodustades 30% kogu mittefossiilsest orgaanilisest süsinikust ja kuni kolmandiku puidu kuivmassist (Pizzi, Mittal 2010: 3).

Ligniine saadakse peamiselt puidutselluloosi tootmise kõrvalsaadusena, mille hinnanguline kogus on üle 75 miljoni tonni aastas. Ligniini keemiline struktuur on väga keerukas, kusjuures täiendavaks probleemiks on see, et erinevalt tanniinist ei ole üksikud molekulid seotud ühegi kindla struktuuriga. Seetõttu ei eksisteeri ühtegi üldmolekuli, mis hõlmaks nii okas- kui lehtpuidust ja teraviljast saadud ligniini. Selle väga keeruka olemuse tõttu on ligniini keemilised rakendused üpriski piiratud ja hetkel ei toodeta puiduliime, mis kasutaksid ainult ligniini. Paljudes liimides kasutatakse siiski ligniini kui kaasreageerivat ainet koos fenooli ja formaldehüüdiga, et saada täiustatud omadustega toode. (EUR 20609… 2002: 52–53)

2.1.3. Süsivesikud

Polüsahhariidide, kummide, oligomeeride ja monomeersete suhkrute kujul esinevaid süsivesikuid on kasutatud liimide koostises juba mitmeid aastaid. Need on kõik kergesti kättesaadavast taastuvast biomassist ja paljud neist, nagu näiteks tärklis, on väga kuluefektiivsed. Sarnaselt ligniinile ei ole aga kaubanduslikku puiduliimi valmistatud ainult süsivesikuid kasutades. Kummid, nagu näiteks araabia, guar, ksantaan, tragant ja teised tekitavad kuumas või külmas vees dispergeerudes viskoosseid võresid, mis kõvenevad veekaotuse kaudu. Kuigi need materjalid on paljudes tööstussektorites ideaalselt kasutatavad, ei kasutata neid siiski puiduliimina. Polüsahhariidid nagu tärklis, hemitselluloos ja tselluloos võivad olla puiduliimina kasutatavad, kuid ainult kaasreageeriva ainena mõne teise ristseostatava liigiga või keemilise modifikatsiooni abil, mis annab neile täiendava ristseostumisvõime. Süsivesinikpolümeeridel on tavaliselt üks primaarne ja kaks sekundaarset hüdroksüülrühma tsüklilise ühiku kohta. Need rühmad pakuvad positsioone, kuhu saab kinnitada reaktiivseid ristseoseühendeid, kuid tselluloosi kasutamisel on vaja teha

täiendav etapp materjali lahustamiseks enne mistahes keemilist modifitseerimist. Tselluloosi on aastaid kasutatud substraadina edasiseks modifitseerimiseks, tselluloosiestrid ja -eetrid on leidnud mitmeid liimimisrakendusi tööstustes alates keraamikast kuni paberini, kuid nende rakendused koos puiduga on piiratud. (EUR 20609… 2002: 56–57)

2.1.4. Küllastumata õlid

Taimede seemnetest ja viljadest saadud küllastunud ja küllastumata õlid on laialdaselt kättesaadavad vahesaadustena ja ka hulgimüügis. Nende üldine kasutusala ulatub toiduvalmistamisest, toiduainete valmistamisest ja klassikalise seebivalmistamise protsessist kuni kosmeetikatoodete, värvide ja viimasel ajal ka biotehnoloogiliste vaikude koostisaineteni.

Peamised taimeõlide allikad on kookos, mais, puuvillaseemned, õlipalm, oliiv, maapähkel, linaseemned, safloor, soja, päevalilleseemned ja rapsiseemned. Kõik senised vaigupõhised uuringud on keskendunud õlidele, mis sisaldavad vähemalt ühte kaksiksidet. Mõnda õliseemne taime kasvatatakse ainult õli saamiseks, samas kui teisi kasvatatakse peamiselt toiduks või tekstiilkiudude saamiseks, mille puhul on õli tootmine kõrvalsaaduseks. Õli saadakse seemnete pressimise läbi. Seejärel õli ekstraheeritakse auru, vee või lahustite, näiteks heksaani abil. Pärast õli ekstraheerimist alles jääv kõrge vaigusisaldusega jääk ehk õlikook on väärtuslik toidukomponent kariloomadele ja soja puhul inimestele. (EUR 20609… 2002: 58)

On võimalik leida vaid üksikuid näiteid, kus kasutatakse seemneõli derivaate puiduliimina. Saksa ettevõte Preform Polymerwerkstoff GmbH kasutas linaseemneõli vaigu loomiseks, mida saab kasutada liimi või pinnakatte materjalina. (EUR 20609… 2002: 59)

2.2. Sünteetilised liimid

1930ndate aastate alguses hakkasid puidutöötlemisse ilmuma sünteetilised vaiguliimid. Nende mitmekülgsuse ja muude eeliste tõttu leidsid need laialdast kasutust. Õigesti

kasutades on mõned sünteetilised vaiguliimid sama tugevad kui puit, seda isegi kokkupuutel ilmastikuga. Suurem osa neist tekitavad sobiva ühenduse sisekasutuse jaoks. (Selbo 1975: 10)

Sünteetilised polümeerid on keemiliselt kavandatud ja formuleeritud liimideks, mis täidavad mitmesuguseid funktsioone. See, kas baaspolümeer on termoplastiline või termokõvastuv, mõjutab oluliselt liimi toimimist kasutamisel. Termoplastid on pika ahelaga polümeerid, mis pehmenevad ja voolavad kuumutamisel ning seejärel kõvenevad uuesti jahutamisel. Nende vastupidavus kuumusele, niiskusele ja pikaajalisele staatilisele koormusele on üldjuhul väiksem kui termokõvastuvatel polümeeridel. (Vick 1999: 187)

Levinud puiduliimid, mis põhinevad termoplastilistel polümeeridel, on polüvinüülatsetaatemulsioonid, elastomeerid, kontaktmaterjalid ja kuumsulamid. Termokõvenevad polümeerid on suurepärased struktuuriliimid, sest nad läbivad pöördumatuid keemilisi muutusi ning ei pehmene uuesti kuumutamisel. Nad moodustavad ristseotud polümeere, millel on suur tugevus, vastupidavus niiskusele ja muudele kemikaalidele ning on piisavalt jäigad, et kanda suuri staatilisi koormusi pikaajaliselt ilma deformeerumata. Fenool-, resortsinool-, melamiin-, isotsüanaat-, karbamiid- ja epoksüliimid on näited termokõvenevatel polümeeridel põhinevatest puiduliimidest. (Vick 1999: 187)

Sünteetiliste puiduliimide peamisteks eelisteks on odavus. Neid on lihtne kasutada ja neil on kõrge temperatuurikindlusega ühendused. Küll ei tule nad toime suure soojuspaisumisteguri erinevusega ning on head ainult madala koormusega rakenduste puhul. Lisaks võib puudustena välja tuua, et ühendused ei ole lekkekindlad ja materjali pinna ettevalmistamine on kriitiline. (Ülker 2016: 282)

2.2.1. Polüvinüülatsetaat

Polüvinüülvaigu emulsioonid on termoplastid, mis pehmenevad, kui temperatuur tõuseb teatud tasemele ja kõvenevad uuesti, kui need jahutatakse (Ülker 2016: 282). Polüvinüülatsetaati (edaspidi PVA) kasutatakse kõige laialdasemalt PVA-polümeeride emulsioonina vees. Emulsioon moodustub vinüülmonomeeride, peamiselt vinüülatsetaadi polümeerumisel vees, mis on tuntud kui emulsioonpolümerisatsioon. Emulsioon on valge

või valkja värvusega, olles tuntud ja kasutusel olevaks liimiks paljudes kodumajapidamistes. Tänu vastupidavusele mikroorganismide rünnakule ja odavusele on see liim asendanud looduslikud liimid näiteks mööbli valmistamisel. Antud liim kõvastub vee difusiooni ja polümeeride liitumisega puitu. Tahkunud vaigud on heledat värvi ja sageli läbipaistvad, mille tulemusel on liimijoon praktiliselt nähtamatu. (Conner 2001: 9589)

PVA pehmeneb, kui selle temperatuur tõuseb üle toatemperatuuri, ning on vähem vastupidav niiskuse suhtes kui termokõvenevad vaigud. Sel põhjusel kasutatakse PVA liimi siseruumides. (Conner 2001: 9589) PVA liimide eelisteks loetakse pikka säilivusaega, puhastamise lihtsust, nähtamatut ühendust, paindlikku vuuki, lühikest kõvenemise aega ja kasutusvalmidust. Antud liimi kasutamist piirab termoplastilisus ja roomavus. (EUR 20609… 2002: 85)

2.2.2. Polüuretaan

Kõige mitmekülgsemad liimid sisaldavad isotsüanaatrühmi olenemata sellest, kas need liigitatakse isotsüanaat- või polüuretaanliimiks (edaspidi PUR-liimid) (Frihart 2015: 6). Ühekomponentsetel PUR- liimidel on väga vastupidavad liimikiled, kuid molekulaarmassi suurenemisel väheneb üldiselt haardumine poorsele puidule ja sidemed muutuvad üha enam paisuvaks ning tekivad kahanemispinged. PUR-liimid eraldavad veega reageerides süsinikdioksiidi. Selle tulemusena liim vahutab ja paksu liimikihi puhul muutuvad polüuretaansidemed staatilise koormuse all deformeeruvamaks. Kahekomponentseid polüuretaane võib formuleerida jäikuse jaoks sõltuvalt nõutavast struktuurilise koormuse tasemest. (Vick 1999: 190)

PUR liim võib vormilt olla madala viskoossusega vedelik kuni kõrge viskoossusega mastiks. Seda tarnitakse ühe- või kahekomponentsete süsteemidega, ta on täielikult reaktiivne ning värvus varieerub läbipaistvast kuni pruunini. Liim kantakse otse pinnale, mis on eelistatavalt veega niisutatud. PUR liim on reaktiivne koos niiskusega pinnal ja õhus ning kõveneb toatemperatuuril. (Frihart, Hunt 2010: 240) Üldisteks kasutusaladeks PUR liimil on põranda- ja seinasüsteemide liimimine ehitusel, üldotstarbeline kasutus kodus ja kipsplaatide paigaldamine (Vick 1999: 193).

2.2.3. Kuumliimid

Puidule mõeldud kuumliimid tarnitakse tahkel kujul – tavaliselt pelletitena, tükkidena ja graanulitena. Need sisaldavad mitmesuguseid termoplastilisi segusid, mis muudetakse kuumuse abil laialikanduvaks ja kantakse materjalile kuuma ja vedelana. Liimühenduse moodustamise ajal rakendatakse ühenduskohale survet. Ühendus moodustub väga kiiresti sõltuvalt liimi ja ühendatavate detailide temperatuurierinevustest. Üks peamisi kasutusalasid kuumliimide puhul on paneeltoodete servade liimimine. Kuumliimi kasutatakse ka töölaudade, mööbliplaatide ja riiulite dekoratiivsete kattekihtide liimimiseks. (Selbo 1975: 31)

Kuumliimide eelisteks on: 1) nad on 100% tahked, 2) lühike kõvenemisaeg, 3) sitkuse ja tugevuse kombineerimine, 4) nakkumine väga erinevatele aluspindadele ja 5) pikk säilivusaeg. Kasutamist piiravad madal kuumakindlus ning värvuse ja viskoossuse kahanemine kõrgel temperatuuril ning teatavate aluspindade tundlikkus nõutava pealekandmistemperatuuri suhtes. (EUR 20609… 2002: 81)

2.2.4. Karbamiidliimid

Karbamiidliimid tulid esmakordselt maailmas müügile 1930ndatel. Kasutades erinevaid katalüsaatoritüüpe ja -koguseid, saab neid formuleerida kas kuumpressimiseks või toatemperatuuril kõvenemiseks. Nad sobivad kokku erinevate odavate täiteainetega, mis võimaldab varieerumist nii kvaliteedi kui ka hinna poolest. Kuna karbamiidliimid on heledat või kergelt pruunikat värvi, moodustavad nad üsna märkamatuid liimijooni. Kuid kokkupuude sooja ja niiske keskkonnaga põhjustab karbamiidliimide riknemist ja lõpptulemusena liimsideme katkemist. (Selbo 1975:23)

Karbamiidformaldehüüdvaigud on termokõvenevad duromeerid ja koosnevad lineaarsetest või hargnenud oligomeersetest ja polümeersetest molekulidest, mis sisaldavad alati ka teatud koguses monomeere. Reageerimata karbamiidi eeliseks on parem ladustamisstabiilsus. Vaba formaldehüüd on aga ambivalentne. Ühelt poolt on see vajalik kõvenemisreaktsiooni esilekutsumiseks, teiselt poolt põhjustab see formaldehüüdi emissiooni pressimisprotsessi ajal. (EUR 20609… 2002:16)

Karbamiidliimid on vormilt pulbrid või vedelikud, mida võib segada melamiini või mõne muu rohkem vastupidava vaiguga. Nad on mõõdukalt vastupidavad niiskes keskkonnas, kusjuures vastupidavus hakkab langema temperatuuridel üle 50°C. Karbamiidliimid leiavad kasutust näiteks lehtpuidust vineerina, mööblina, puitkiudplaadina ja puitlaastplaadina. (Conner 2001: 9598)

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1. Uurimustööks kasutatav materjal

3.1.1. Sanglepp (*Alnus glutinosa L.*)

Sanglepa puit on hajulisooneline ja lülipuiduta. Vanemas eas võib esineda ka pruuni väärlülipuitu. Värvuselt on sanglepp roosakashelepruun, väärsäsikiirtest pruunide kriipsukestega. Puit on pehme ja kerge ning tihedus jääb 480…530 kg/m3 vahele. Samuti on sanglepp kergesti töödeldav ja lõhestatav. (Laas 2019: 180)

Sanglepa puit kuivab hästi ja on keskmise tugevusega. Kuigi ta on kergesti töödeldav, siis kiulise struktuuri tõttu peab korraliku kandi saamiseks kasutatavad tööriistad olema teravad. Sanglepa puit on hästi peitsitav ja lihvitav. (Gibbs 2005: 53) Põhiliselt kasutatakse sangleppa mööbli valmistamisel, siseviimistluslaudadena ja puidusöe tootmisel (Laas 2019: 180).

Termiliselt töödeldud sanglepa puitu kasutatakse põhiliselt saunades nii seina kui lavamaterjalina. Töötluse käigus toimuv värvitooni muutus – punakas-valgest tumepruunini – on sarnane hallile lepale. Lepapuitu töödeldakse enamasti kahes temperatuurivahemikus: 185 ±5 ℃ ja 200 ±5 ℃. (Kööts 2019: 19)

3.1.2. Hall lepp (*Alnus incana L.*)

Halli lepa puit on värvuselt roosakasvalge ja kuivanult roosakalt helepruun. Väärsäsikiiri esineb harvemini kui sanglepal. Lõikepind muutub soojal ajal oranžiks. Puidu tihedus on 430…450 kg/m3. Halli lepa puit on võrreldes sanglepa puiduga raskesti eristatav ja halvemate mehhaaniliste omadustega. Kasutusalad on jämeda ja sirge materjali puhul samad kui sanglepa puidul. (Laas 2019: 180)

Sarnaselt sanglepale kasutatakse termiliselt töödeldud halli lepa puitu saunades. Töötlemisel esineb peamiste probleemidena eelkuivatamise keerukus ja värvitooni mitteühtlustumine töötluse järgselt. (Kööts 2019: 19)

3.2. Töö metoodika

3.2.1. Katsematerjali esmane töötlemine

Antud uurimistöö läbiviimiseks kasutati termiliselt töödeldud ja naturaalse halli lepa (lad k *Alnus incana L.*) ja sanglepa (lad k *Alnus glutinosa L.*) puitu (joonis 1), mis on pärit Risto Kööts'i poolt 2019. aastal läbiviidud magistritööst. Käsitletud uurimismaterjal on termiliselt töödeldud 10 erinevas astmes, mille andmed on välja toodud tabelis 2. Võrdluseks mõlema puuliigi puhul on kasutatud ka naturaalset ehk töötlemata puitu.

Joonis 1. Uurimistöös kasutatud materjal (autori foto).

Tabel 2. Termilisel töötlemisel kasutatud töötlusastmete etteantud ja tegelikud andmed (Kööts 2019: 22)

	Töötlusaste									
Karakteristik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Töötlusastme kood	T5-10	T5	T4-5	T4	D3-7	D3	D2-5	D2	D1-5	D1
Protsessi kestus minutites	60	60	90	90	120	120	150	150	180	180
Etteantud õhu temperatuur (°C)	175,0	185,0	190,0	195,0	203,0	210,0	215,0	220,0	225,0	230,0
Etteantud puidu temperatuur (°C)	165,0	175,0	180,0	185,0	193,0	200,0	205,0	210,0	210,0	210,0
Tegelik temperatuur (°C), aritmeetiline keskmine	160,1	165,6	170,3	173,0	179,1	181,4	186,6	186,4	192,9	196,2
Tegelik temperatuur (°C), miinimum	131,1	131,1	130,8	130,9	131,1	130,7	130,9	130,7	131,0	130,9
Tegelik temperatuur (°C), maksimum	175,0	185,0	190,0	195,0	203,0	210,0	215,0	220,0	225,0	230,0
Tegelik puidu temperatuur (°C), aritmeetiline keskmine	151,6	156,9	162,7	165,3	172,1	174,2	180,9	180,7	188,1	191,7
Tegelik puidu temperatuur (°C), miinimum	127,1	127,9	127,0	126,9	126,9	127,0	126,7	124,4	125,8	126,5
Tegelik puidu temperatuur (°C), maksimum	174,3	184,2	190,6	195,9	204,6	213,6	220,1	227,2	234,6	240,9

Katsematerjali töötlemiseks kasutati Eesti Maaülikooli puidutöökojas olevaid seadmeid. Esmalt sorteeriti olemasolevast materjalist välja võimalikult kvaliteetsed lauad. Materjal markeeriti puuliigi ja töötlusastme numbriga, et järgnevate etappide jooksul oleks võimalik neid üksteisest eristada.

Lauad töödeldi katsetustele ettekirjutatud parameetreid jälgides 40 millimeetri paksuseks kasutades Griggio PSA 630 paksushöövlit. Seejärel toimus materjali liimimiseks ettevalmistamine, mille käigus jaotati lauad töötlusastmete kaupa 6-kihilisteks komplektideks.

Uurimistöös kasutati 5 erinevat puiduliimi. Kolm nendest on polüvinüülatsetaadi ehk PVA põhised liimid ja kaks tükki on polüuretaani ehk PUR põhised liimid. Liimid jaotati järjekorda vastavalt kõvenemise ajale ja pealekandmise meetoditele (joonis 2):

1) Titebond III Ultimate wood glue – PVA liim;

2) Titebond Original wood glue – PVA liim;
3) Titebond II Premium wood glue – PVA liim;
4) Soudal Pro 40P – PUR liim;
5) Soudal Pro 45P – PUR liim.

Joonis 2. Töös kasutatud liimid pealekandmise järjekorras vasakult paremale (autori foto).

Liimid kanti igale kihile peale nii, et kogu materjali pind oleks ühtlaselt kaetud. Soudal Pro 40P ja Soudal Pro 45P liimide aktiveerimiseks pritsiti liimikihile vett. Seejärel asetati liimitud komplekt liimpressi alla ning märgiti peale survestamise kellaaeg (joonis 3). Pressimise kestvus ühe komplekti kohta oli 1,5 tundi. Liimipressi kasutamisel rakendati igale komplektile masina maksimaalset pressimisjõudu, milleks on 1,5 tonni survet ühe silindri kohta. Masina suurust arvestades oli samaaegselt võimalik pressida kahte komplekti. Protsessi korrati niikaua kuni kõik komplektid said liimitud.

Joonis 3. Kaks materjalikomplekti liimpressi all (autori foto).

Järgnevalt kasutati formaatsaagi Griggio SC 32, et lõigata liimitud komplektidest välja katsekehad. Katsekeha laiuseks ja kõrguseks oli 40 millimeetrit. Üks katsekeha koosnes kuuest tükist ja viiest erinevast liimkihist (joonis 4). Katsekehad markeeriti katsekeha numbri, töötluse numbri ja otsast ühe joonega, et liimikihte oleks võimalik omavahel eristada.

Joonis 4. Katsekehad (autori foto).

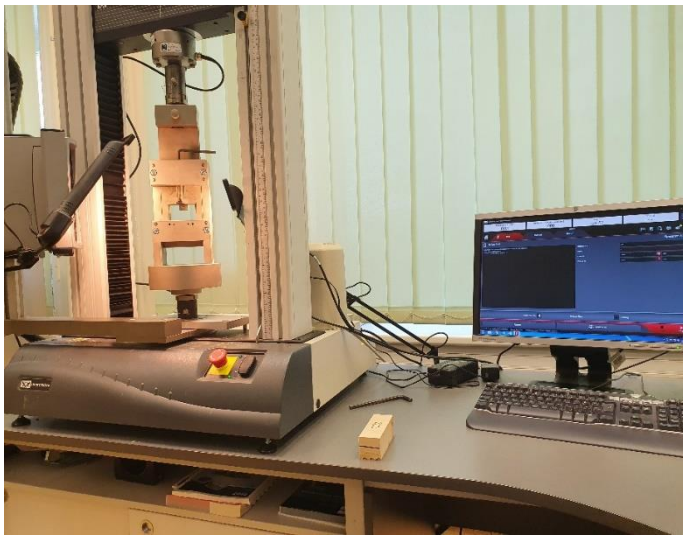
Järgmisteks etappideks transporditi katsekehad Eesti Maaülikooli puidutöökojast metsamaja puiduteaduste laborisse, kus uuritavad objektid paigutati kliimakambritesse. Kasutusel oli

kliimakamber RUMED Type 3401 ning kliimakamber Memmert ICH 260. Kliimakambri temperatuuriks määrati 21°C ning suhteliseks õhuniiskuseks 65% (joonis 5). Katsekehasid ühtlustati kliimakambrites kaks nädalat.

Joonis 5. Kliimakambri seaded (autori foto).

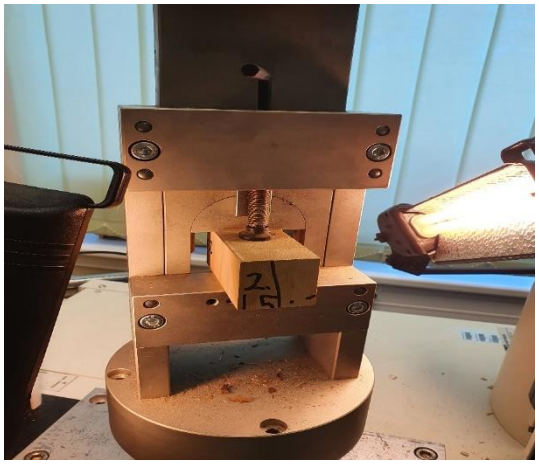
3.2.2. Nihketugevuse määramine

Puidu liimühenduse nihketugevuse määramisel lähtuti standardist EVS-EN 14080:2013. Katsete läbiviimiseks kasutati katsemasinat Instron 3369 (joonis 6). Liimühenduse nihketugevus määrati 296 katsekehal. Igal katsekehal oli 5 liimühendust, seega viidi kokku läbi 1480 katsetust. Iga töötlusastme kohta sooritati katseid vähemalt 12 katsekehal.



Joonis 6. Katsemasin Instron 3369 (autori foto).

Katsete läbiviimiseks mõõdeti iga katsekeha laius ja kõrgus Mitutoyo Absolute nihikuga ning sisestati enne katse läbiviimist programmi Bluehill Universal 4.06. Seejärel paigutati katsekeha masinasse nihkerakise alla, jälgides hoolikalt, et rakis oleks täpselt liimühendusega kohakuti (joonis 7). Katsetused viidi läbi katsekehade tangentsiaalpinna suhtes.



Joonis 7. Katsekeha asetatud nihkerakise alla (autori foto).

Puidu liimühenduse nihketugevus arvutati valemiga (1) (EVS-EN… 2013):

$$F_v = k_v \frac{F_u}{A}, \quad (1)$$

kus F_u – maksimaalne koormus N;

A – nihkepind mm^2;

k_v – tegur $k_v = 0{,}78 + 0{,}0444\ t$;

t – paksus mm.

Katse kestvuse maksimaalseks pikkuseks oli määratud 120 sekundit. Pärast katse läbiviimist uuris autor katsekeha murdumise pinda ning tegi iga katse kohta märkmed (joonis 8).

Joonis 8. Vaade katsekehale pärast liimühenduse nihketugevuskatset (autori pilt).

Katse juhtimine toimus läbi programmi Bluehill Universal 4.06. Samuti koondas antud programm katsetulemused Microsoft Excel 2013 programmi.

3.2.3. Andmeanalüüs

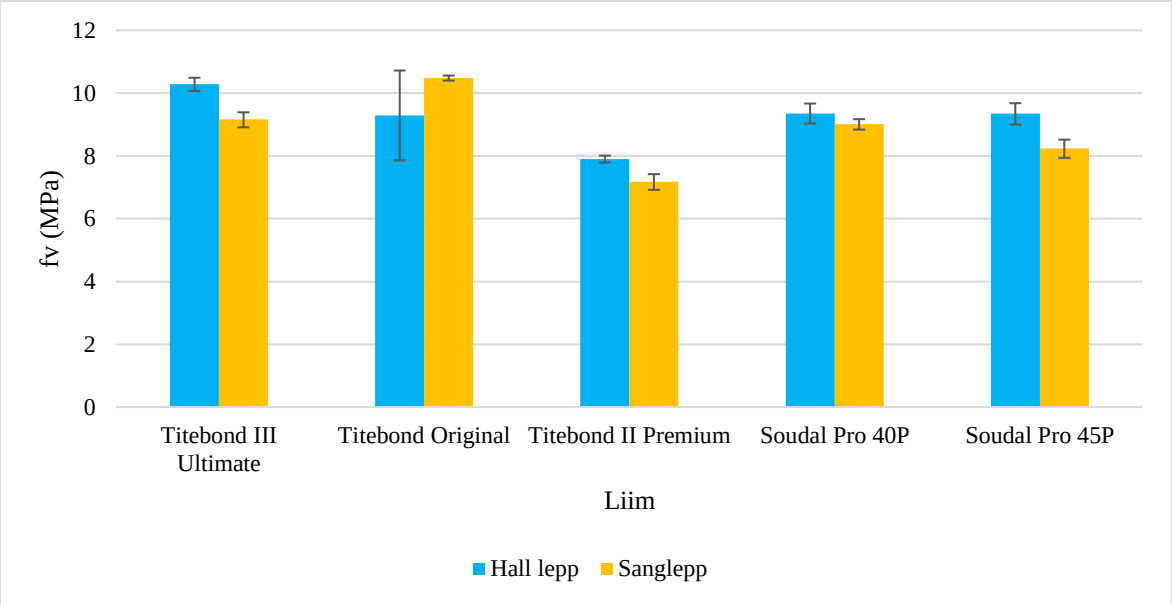
Andmeanalüüsiks kasutati statistikatarkvara R Studio. Antud programmiga leiti alustuseks järgnevad karakteristikud: aritmeetiline keskmine, standardviga, standardhälve, suurim väärtus, väikseim väärtus.

Seejärel kontrolliti Shapiro-Wilk testiga, kas andmed on normaaljaotusega. Normaaljaotuse korral kasutati antud testi tulemusena saadud ülemise ja alumise 95% usalduspiiri väärtuseid töös. Kui andmed ei vastanud normaaljaotusele, leiti ülemine ja alumine 95% usalduspiir T-testiga.

4. UURIMISTULEMUSED JA ARUTELU

4.1. Liimühenduse nihketugevuse sõltumine liimist

Käesolevas alapeatükis on analüüsitud puidu nihketugevuse sõltumist erinevatest liimidest töötlusastmete kaupa. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga naturaalse puidu korral on kujutatud joonisel 9.



Joonis 9. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 0.

Katse tulemused näitasid, et naturaalse puidu korral moodustas kõige tugevama liimühenduse halli lepa puhul Titebond III Ultimate, kus liimühenduse keskmine nihketugevus oli 10,29 MPa. Sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus oli kõige suurem liimi Titebond Original puhul, kus nihketugevus oli vastavalt 10,48 MPa. Mõlema puuliigi puhul oli liimühenduse keskmine nihketugevus liimiga Titebond II Premium kõige väiksema väärtusega. Halli lepa liimühenduse nihketugevuse keskmine väärtus oli nii Soudal Pro 40P kui ka Soudal Pro 45P liimi puhul identne – 9,35 MPa. Kõige suurem erinevus liimühenduse tugevuses oli kasutades Titebond Original liimi, kus halli lepa

keskmine tulemus oli 12,8% väiksem kui sanglepal. Kõige sarnasem tulemus oli kasutades Soudal Pro 40P liimi, kus mõlema puuliigi liimühenduse keskmise tugevuse erinevus oli ainult 3,64%. Kõikide liimide puhul, peale Titebond Original liimi, oli halli lepa puhul keskmine liimühenduse nihketugevus suurem kui sanglepal.

Halli lepa ja sanglepa katsekehade kirjeldus peale liimühenduse nihketugevuse katsete läbiviimist on välja toodud tabelites 3 ja 4.

Tulemused näitasid, et töötlemata puidu puhul toimus katsekehade murdumine suuremas mahus ainult puidust. Titebond II Premium liimi puhul toimus töötlemata halli lepa katsekehade murdumine kõikidel juhtudel ainult puidust. Töötlemata halli lepa puhul toimus katsekeha murdumine liimliitest vaid ühe katse puhul. Antud katse oli viidud läbi liimühenduse suhtes, mis oli liimitud kasutades Soudal PRO 45P liimi.

Sõltumata sellest, et töötlemata halli lepa keskmise liimühenduse nihketugevus oli enamasti sanglepa katsekehadest suurem, toimus halli lepa katsekehadel rohkem murdumisi, kus murdumispinnal oli näha nii puitu kui liimliidet. Sanglepa katsekehade murdumispinnad koosnesid seevastu suuremas osas ainult puidust. Antud tulemustest saab järeldada, et töötlemata puidu puhul on liimühenduse tugevus enamjaolt suurem kui puidu enda tugevus.

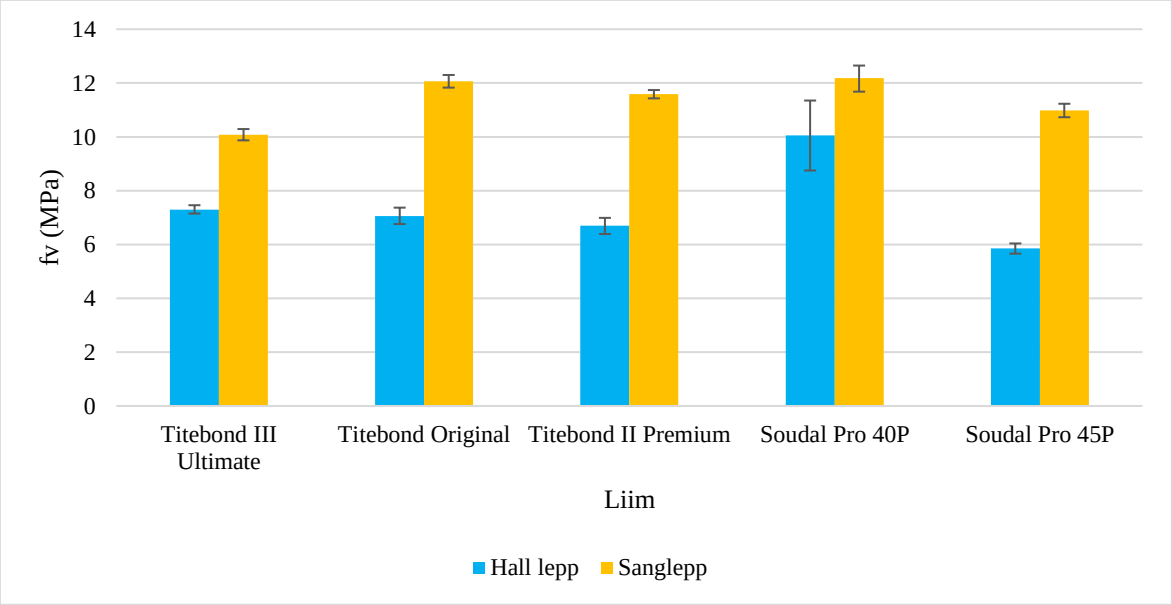
Tabel 3. Halli lepa katsekehade kirjeldus peale liimühenduse nihketugevuse katsete läbiviimist

Liim	Murdumine (%)	Töötlusaste										
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Titebond III Ultimate Wood Glue	Puidust	75	100	100	33,33	61,54	53,85	80	87,5	20	73,33	66,66
	Puidust ja liimliitest	25	0	0	58,33	23,08	46,15	6,66	6,25	53,33	20	16,66
	Liimliitest	0	0	0	8,33	15,38	0	13,33	6,25	26,66	6,66	16,66
Titebond Original Wood Glue	Puidust	66,66	100	75	69,23	84,62	61,54	91,66	73,33	33,33	80	91,66
	Puidust ja liimliitest	33,33	0	25	30,77	15,38	38,46	8,33	6,66	13,33	0	8,33
	Liimliitest	0	0	0	0	0	0	0	20	53,33	20	0
Titebond II Premium Wood Glue	Puidust	100	100	91,66	100	69,23	30,77	93,33	81,25	46,66	66,66	91,66
	Puidust ja liimliitest	0	0	8,33	0	7,69	46,15	6,66	6,25	20	6,66	8,33
	Liimliitest	0	0	0	0	23,08	23,08	0	12,5	33,33	26,66	0
Soudal PRO 40P	Puidust	58,33	58,33	33,33	15,38	15,38	23,08	53,33	50	26,66	20	58,33
	Puidust ja liimliitest	33,33	41,66	66,66	84,62	84,62	69,23	40	50	73,33	60	33,33
	Liimliitest	8,33	0	0	0	0	7,69	6,66	0	0	20	8,33
Soudal PRO 45P	Puidust	58,33	83,33	66,66	76,92	21,43	61,54	26,66	37,5	40	46,66	66,66
	Puidust ja liimliitest	33,33	16,66	33,33	15,38	78,57	38,46	73,33	62,5	60	46,66	25
	Liimliitest	8,33	0	0	7,69	0	0	0	0	0	6,66	8,33

Tabel 4. Sanglepa katsekehade kirjeldus peale liimühenduse nihketugevuse katsete läbiviimist

Liim	Murdumine (%)	Töötlusaste										
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Titebond III Ultimate Wood Glue	Puidust	75	75	100	28,57	84,62	30,77	8,33	17,65	35,71	75	66,66
	Puidust ja liimliitest	25	25	0	50	15,38	61,54	75	58,82	50	25	33,33
	Liimliitest	0	0	0	21,43	0	7,69	16,66	23,53	14,29	0	0
Titebond Original Wood Glue	Puidust	91,66	66,66	66,66	78,57	100	76,93	25	11,76	21,43	50	41,66
	Puidust ja liimliitest	8,33	33,33	33,33	21,43	0	15,38	66,66	47,06	57,14	50	58,33
	Liimliitest	0	0	0	0	0	7,69	8,33	41,18	21,43	0	0
Titebond II Premium Wood Glue	Puidust	100	83,33	58,33	64,29	53,85	69,24	41,66	23,53	7,14	83,33	58,33
	Puidust ja liimliitest	0	16,66	41,66	35,71	46,15	15,38	58,33	35,29	35,71	16,66	33,33
	Liimliitest	0	0	0	0	0	15,38	0	41,18	57,15	0	8,33
Soudal Pro 40P	Puidust	100	8,33	33,33	14,29	23,08	23,08	8,33	11,76	7,14	66,66	41,66
	Puidust ja liimliitest	0	91,66	66,66	50	30,77	38,46	91,66	29,41	78,57	33,33	58,33
	Liimliitest	0	0	0	35,71	46,15	38,46	0	58,82	14,29	0	0
Soudal Pro 45P	Puidust	100	66,66	75	57,14	61,54	76,92	83,33	76,47	57,14	50	25
	Puidust ja liimliitest	0	25	25	42,86	38,46	23,08	16,66	23,53	42,86	50	75
	Liimliitest	0	8,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga esimese töötlusastme korral (joonis 10).



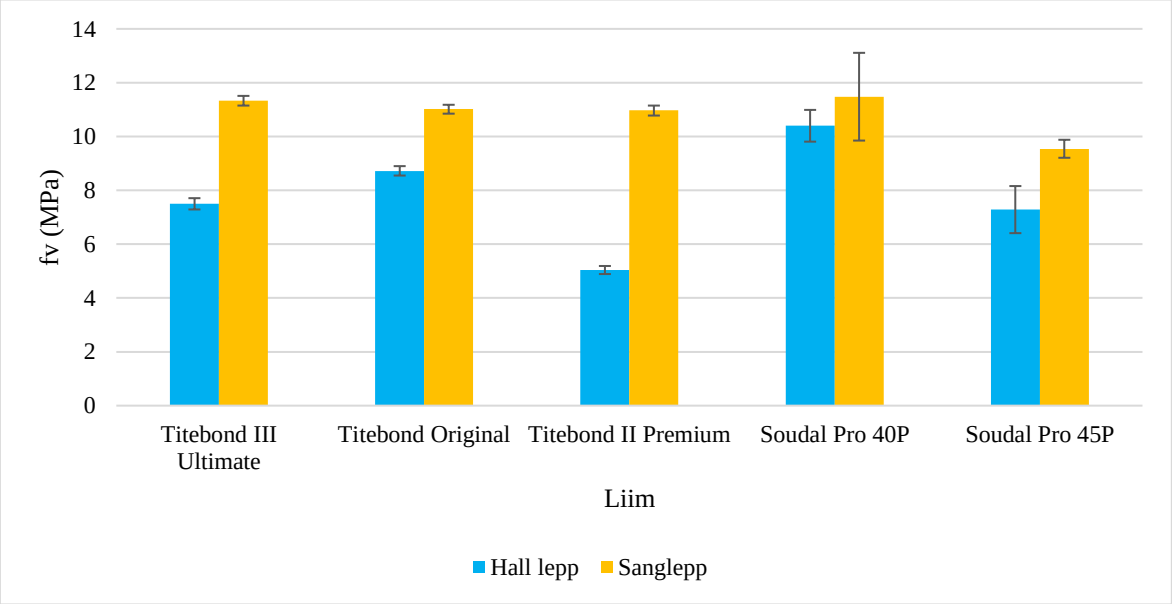
Joonis 10. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 1.

Tulemustest selgus, et kõikide liimide puhul oli liimühenduse keskmine nihketugevus sanglepal suurem kui hallil lepal. Sanglepa kõige tugevam liimühendus 12,18 MPa moodustus liimiga Soudal Pro 40P, kusjuures Titebond Original liimi keskmine näitaja oli ainult 0,98% võrra väiksem. Halli lepa puhul moodustas sarnaselt sanglepale kõige tugevama liimühenduse Soudal Pro 40P näitajaga 10,05 MPa. Kõige nõrgema tulemuse 10,08 MPa andis sanglepa puhul Titebond III Ultimate ja halli lepa puhul 5,85 MPa Soudal Pro 45P. Lisaks saab välja tuua, et halli lepa puhul vähenes liimühenduse nihketugevus võrreldes töötlemata puiduga keskmiselt 19,96%. Kusjuures liimühenduse tugevus langes kõikide liimidega, välja arvatud Soudal PRO 40P, mille korral ühenduse tugevus suurenes 6,96%. Erinevalt hallist lepast suurenes sanglepa liimühenduse tugevus võrreldes töötlemata puiduga keskmiselt 22,53%, tugevuse kasvu näitasid kõik liimid. Samuti võib tähendada, et sanglepa keskmise nihketugevuse muutus oli ühtlasem kui hallil lepal.

Tabeli 3 ja 4 andmetest selgus, et suuremalt jaolt toimus esimese töötlusastme puhul katsekehade murdumine puidust. Erinevate liimide võrdluses oli esimese töötlusastme juures kõige suurem erinevus murdumispindades liimiga Soudal Pro 40P, kus halli lepa puhul

toimus 41,66% ja sanglepa puhul 91,66% murdumistest nii puidust kui ka liimliitest. Esimese töötlusastme katsetel oli ainult üks katsekeha, mis murdus täielikult liimliitest. Antud liimliide oli liimitud tootega Soudal Pro 45P.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga teise töötlusastme korral (joonis 11).



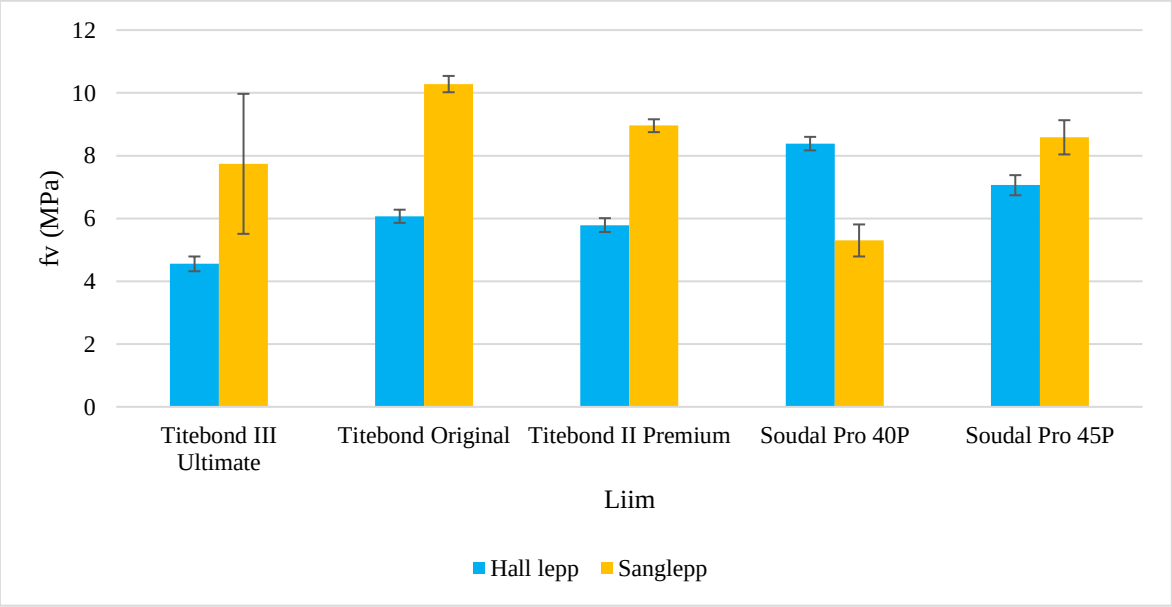
Joonis 11. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 2.

Sarnaselt esimesele töötlusastmele oli sanglepa keskmine liimühenduse tugevus võrreldes halli lepaga suurem kõikide liimide puhul ja kõige parema tulemuse nii halli lepa kui sanglepa puhul andis Soudal Pro 40P. Kõige nõrgemat tulemust näitas halli lepa puhul Titebond II Premium keskmise nihketugevusega 5,04 MPa ja sanglepa puhul Soudal Pro 45P keskmise nihketugevusega 9,54 MPa. Suurim erinevus mõlema puuliigi tulemustes oli liimiga Titebond II Premium, kus halli lepa keskmine liimühenduse tugevus oli 54,05% väiksem kui sanglepal. Võib täheldada, et sanglepa keskmise liimühenduse tugevuse erinevus erinevate liimide puhul oli ühtlasem kui hallil lepal.

Sarnaselt esimesele töötlusastmele oli teises töötlusastmes katsekehade murdumispindade erinevus nii hallil lepal kui ka sanglepal kõige suurem liimiga Soudal Pro 40P (tabel 3 ja 4). Mõlemal juhul murdusid katsekehad 66,66% kordadest nii puidust kui ka liimliitest. Võrreldes esimese töötlusastmega oli halli lepa puhul näha, et murdumispindades oli

nähtaval rohkem liimliidet. Sellegipoolest ei olnud ühtegi katsekeha, mis oleks murdunud ainult liimliitest. Sanglepa puhul võis tähendada, et suurim muutus võrreldes naturaalse puidu ja esimese töötlusastmega oli liimiga Titebond II Premium, mille puhul 58,33% katsekehadest murdus puidust ning 41,66% murdus nii puidust kui ka liimliitest.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kolmanda töötlusastme korral (joonis 12).



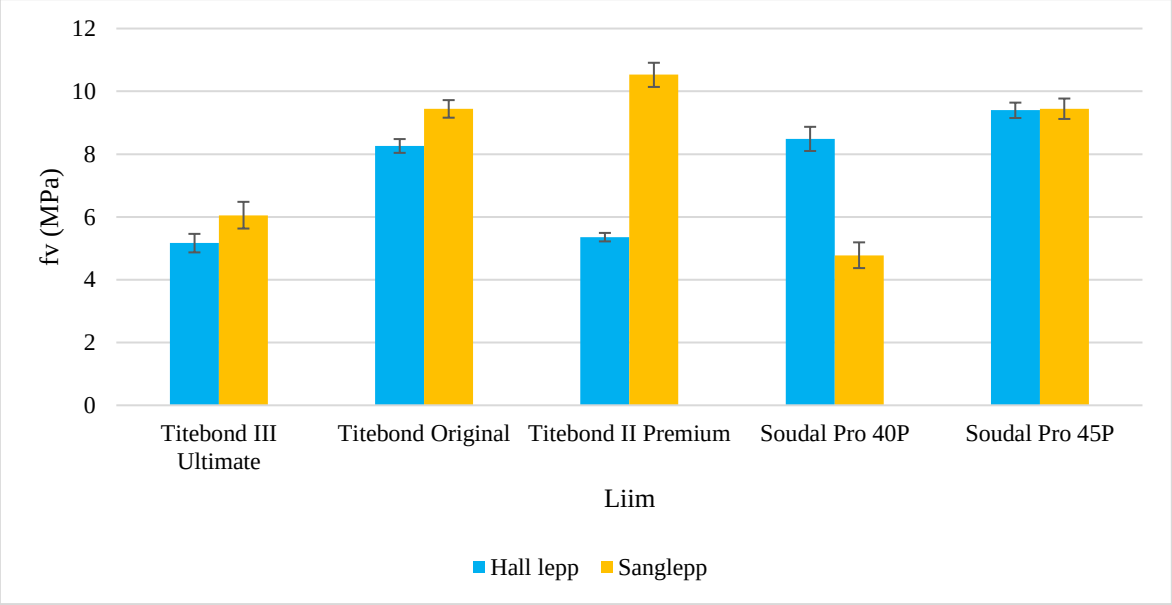
Joonis 12. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 3.

Kõige suurem keskmine liimühenduse nihketugevus oli sanglepal – 10,28 MPa – kasutades Titebond Original liimi. Halli lepa vastav näitaja oli 8,38 MPa liimiga Soudal Pro 40P. Kõige nõrgem tulemus oli hallil lepal Titebond III Ultimate liimiga ja sanglepal Soudal Pro 40P liimiga. Suurim erinevus liimühenduse tugevuses oli Titebond Original liimiga, kus halli lepa keskmine tulemus oli sanglepast 40,95% väiksem. Kõige sarnasema tulemuse andis liim Soudal Pro 45P, kus mõlema puuliigi keskmine nihketugevus erines üksteisest 17,69% võrra. Samuti on graafikult näha, et antud töötlusastme puhul on PUR liimide tugevus halli lepa puhul suurem kui PVA liimide tugevus.

Vastavalt tabelis 3 ja 4 olevatele andmetele selgus, et kolmanda töötlusastme juures suurenes katsekehade murdumine liimliitest. Kui töötlusastmete 0-2 juures oli halli lepa murdumispinnad liimiga Titebond III Ultimate enamasti ainult puidust, siis kolmanda

töötlusastme puhul murdus 58,33% katsekehadest nii puidust kui liimliitest. Ühe katse puhul toimus murdumine ka ainult liimliitest. Sarnaselt varasematele töötlusastmetele toimus halli lepa katsekehade murdumine Titebond II Premium liimühenduste kohalt ainult puidust. Sanglepa puhul murdusid liimiga Titebond III Ultimate ja Soudal Pro 40P vastavalt 21,43% ja 35,71% katsekehadest täielikult liimliitest. Võrreldes eelnevate töötlusastmetega erinesid antud näitajad kõige suuremal määral.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga neljanda töötlusastme korral (joonis 13).



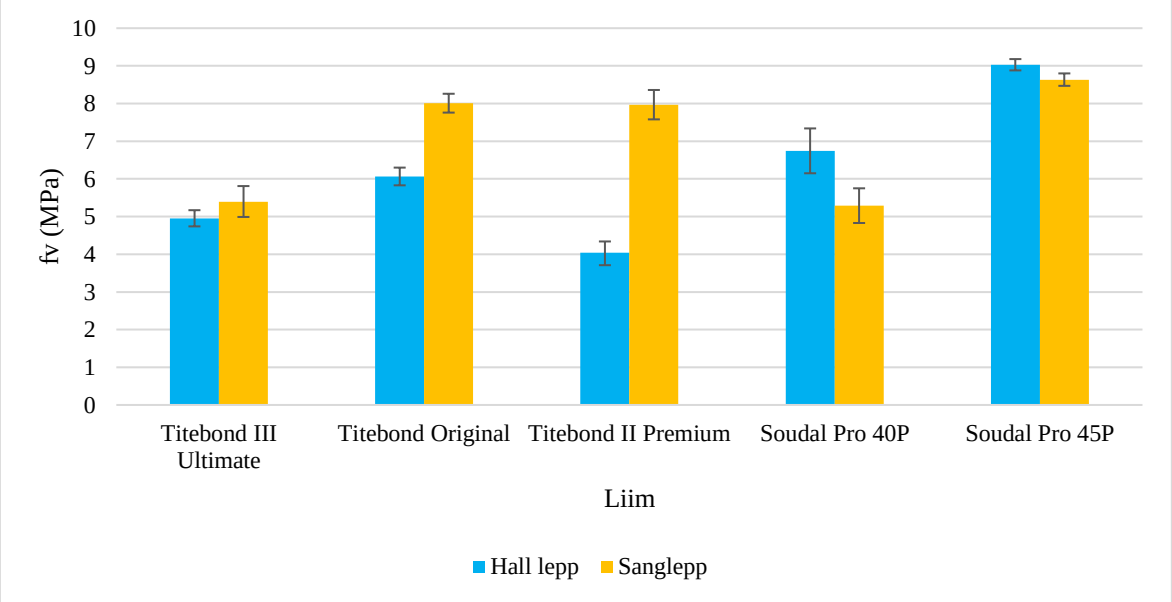
Joonis 13. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 4.

Neljanda töötlusastme juures oli sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus suurim liimiga Titebond II Premium, kus nihketugevus oli 10,53 MPa. Halli lepa vastav näitaja oli 9,4 MPa liimiga Soudal Pro 45P. Halli lepa kõige nõrgem tulemus näitajaga 5,17 MPa saadi liimiga Titebond III Ultimate. Sanglepa nõrgim tulemus näitajaga 4,77 MPa oli aga kasutades Soudal Pro 40P liimi. Kõige sarnasem liimühenduse keskmine nihketugevus saadi liimiga Soudal Pro 45P, kus mõlema puuliigi näitaja erines üksteisest vaid 0,42%. Samas kõige suurem erinevus oli liimiga Titebond II Premium, kus mõlema puuliigi keskmine nihketugevus erines üksteisest 43,75%. Katse tulemustest saab järeldada, et neljanda

töötlusastme juures oli sarnaselt kolmandele töötlusastmele halli lepa puhul PUR liimide liimühenduse keskmine tugevus suurem kui PVA liimidel.

Tabelis 3 ja 4 toodud andmete põhjal saab välja tuua, et neljandal töötlusastmel toimus muutus halli lepa murdumispindade kirjelduses Titebond II Premium liimühenduste juures. Kui varasemad töötlusastmed näitasid põhiliselt murdumist puidust, siis neljanda töötlusastme juures murdus puidust 69,23% katsekehadest, kusjuures 23,08% katsekehadest murdus täielikult liimliitest. Võrreldes mõlemaid puuliike, oli kõige suurem erinevus Soudal Pro 40P liimühenduste katsetel. Kui halli lepa puhul murdusid 84,62% katsetest nii puidust kui liimliitest, siis sanglepa puhul toimus murdumine 46,15% kõigist katsetest liimliitest.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga viienda töötlusastme korral (joonis 14).



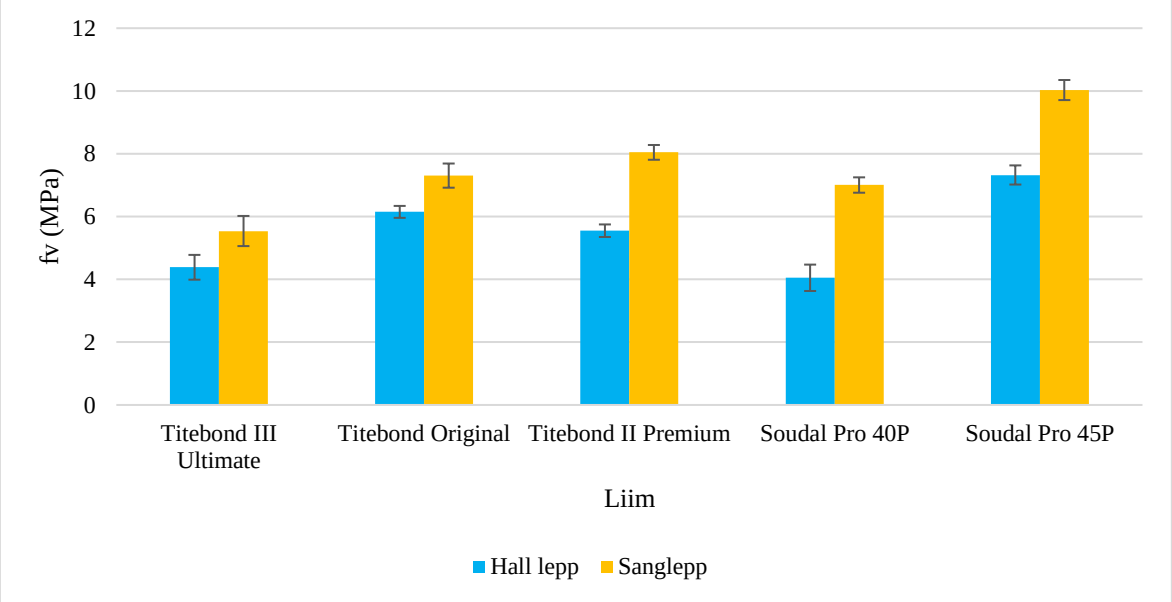
Joonis 14. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 5.

Tulemused näitasid, et keskmine liimühenduse nihketugevus on hallil lepal kõige suurem näitajaga 9,03 MPa ja sanglepal näitajaga 8,63 MPa. Mõlemad tulemused saadi liimiga Soudal Pro 45P, samuti on nihketugevus antud liimiga mõlema puuliigi võrdluses kõige sarnasem, erinedes üksteisest vaid 4,43%. Kõige nõrgem tulemus oli hallil lepal 4,04 MPa liimiga Titebond II Premium ja sanglepal 5,29 MPa liimiga Soudal Pro 40P. Võrreldes halli

lepa liimühenduse keskmiseid nihketugevusi omavahel, saab väita, et antud töötlusastme puhul näitavad PUR liimid võrreldes PVA liimidega paremat tulemust.

Tabeli 3 ja 4 tulemused näitavad, et viienda töötlusastme juures toimus kõige suurem muutus sanglepa Titebond III Ultimate liimühenduste juures, kus 61,54% katsekehadest murdus nii puidust kui ka liimühendusest. Halli lepa murdumispinnad Titebond II Premium liimühenduste juures oli 46,15% juhtudest puidust ja liimliitest ning 23,08% juhtudest ainult liimliitest. Antud töötlusastme juures võib tähendada, et katsekehade murdumispindade jaotus erinevate kategooriate vahel on võrreldes esimeste töötlusastmetega oluliselt mitmekesisem.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kuuenda töötlusastme korral (joonis 15).



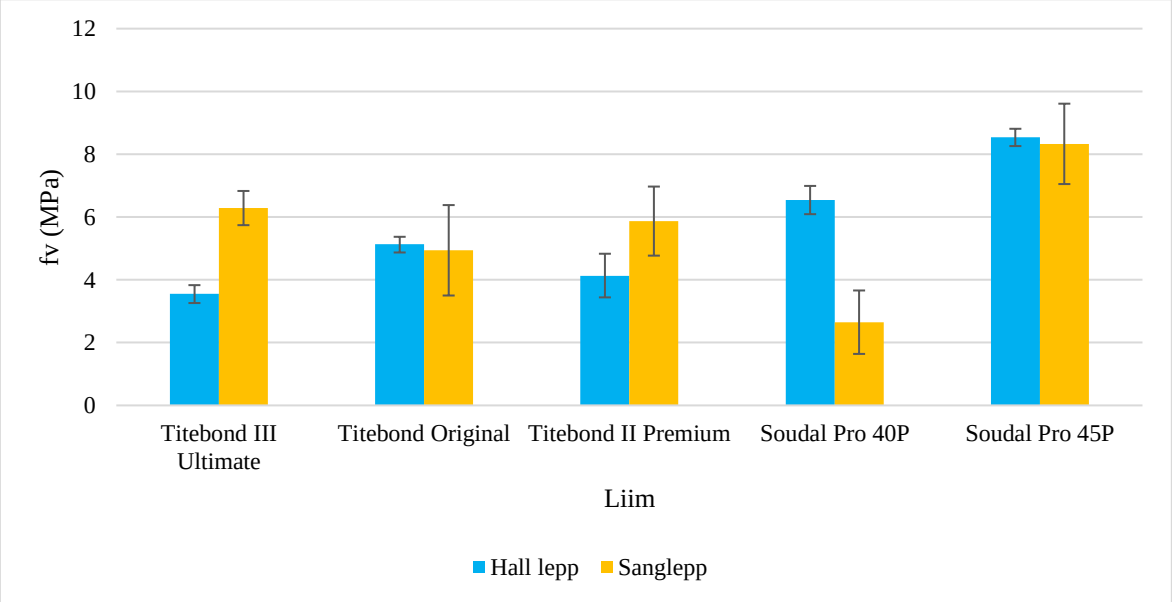
Joonis 15. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 6.

Tulemustest selgus, et kõikide liimide puhul oli liimühenduse keskmine nihketugevus sanglepal suurem kui hallil lepal. Kõige suurem keskmine nihketugevus oli sanglepa puhul 10,03 MPa ja hallil lepal 7,32 MPa. Mõlemad tulemused saadi liimiga Soudal Pro 45P. Hallil lepal oli kõige väiksem keskmine nihketugevus 4,05 MPa liimiga Soudal Pro 40P ja sanglepal 4,39 MPa liimiga Titebond III Ultimate. Kõige väiksem erinevus mõlema puuliigi

vahel saadi liimiga Titebond Original, mille puhul oli halli lepa keskmine nihketugevus 15,87% väiksem kui sanglepal. Kõige suurem erinevus mõlema puuliigi vahel saadi kasutades Soudal Pro 40P liimi, mille tulemused näitasid, et halli lepa keskmine nihketugevus on sanglepast 42,23% väiksem. Antud töötlusastme juures oli sanglepal suurem keskmine nihketugevus hallist lepast kõikide liimidega.

Vaadeldes tabeli 3 ja 4 tulemusi, selgus, et töötlusastmel 6 kasvas kõikide liimidega halli lepa katsekehade hulk, mille murdumispinnad olid ainult puidust, välja arvatud Soudal Pro 45P liimi puhul. Sanglepa katsekehade kirjelduses oli kõige suurem murdumispindade erinevus liimidega Titebond Original ja Soudal Pro 40P. Võrreldes töötlusastmega 5 suurenes antud liimidega liimitud katsekehade hulk, mille murdumispindadel oli näha nii puitu kui ka liimliidet.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga seitsmenda töötlusastme korral (joonis 16).



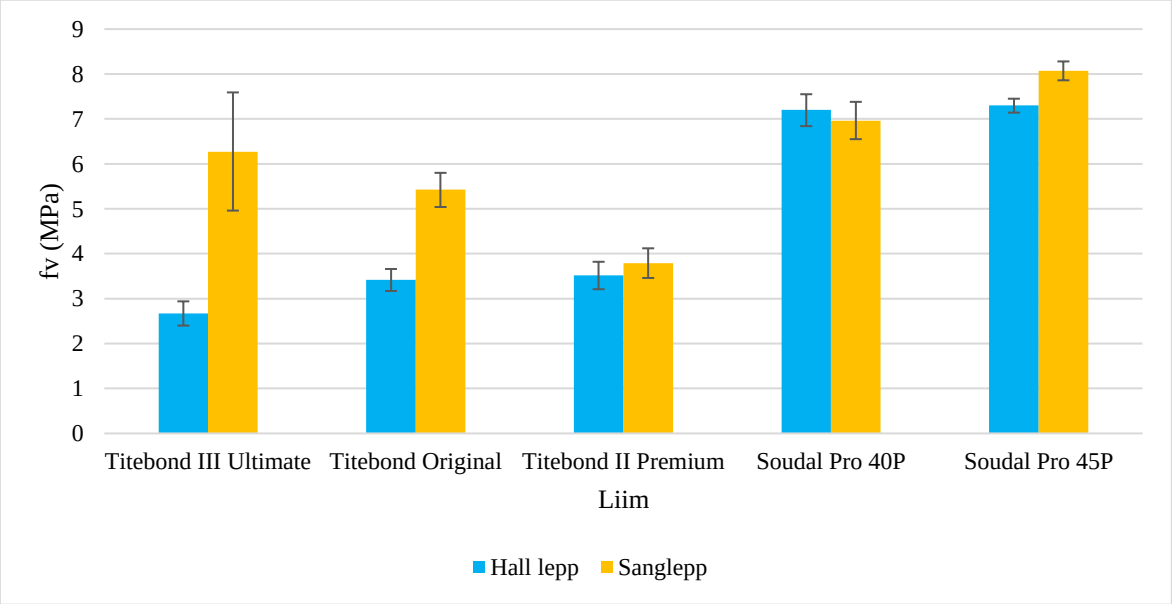
Joonis 16. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 7.

Seitsmendal töötlusastmel oli kõige suurem liimühenduse keskmine nihketugevus mõlema puuliigi puhul liimiga Soudal Pro 45P. Hallil lepa puhul 8,54 MPa ja sanglepa puhul 8,33 MPa. Tulemuste omavaheline erinevus oli 2,46%. Kõige väiksem nihketugevus hallil lepal

oli liimiga Titebond III Ultimate. Sanglepa kõige väiksema tulemuse andis liim Soudal Pro 40P. Tulemused olid vastavalt 3,55 MPa ja 2,65 MPa. Sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus seitsmendal töötlusastmel liimiga Soudal Pro 40P oli ühtlasi antud puuliigi puhul nii erinevate liimide kui töötlusastmete võrdluses kõige madalam tulemus. Tabel 4 andmetest selgus, et antud töötlusastme, puuliigi ja liimi puhul murdus 58,82% katsekehadest liimliitest. Samuti esines seitsmendal töötlusastmel liimiga Soudal Pro 40P mõlema puuliigi nihketugevuste vahel kõige suurem erinevus. Sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus oli 59,48% väiksem kui halli lepa nihketugevus.

Katsekehade murdumispindadel oli puuliikide võrdluses kõige suurem erinevus nendel liimühendustel, mis oli liimitud PVA liimidega (tabel 3 ja 4). Kui halli lepa katsekehade murdumispinnad olid peamiselt ainult puidust, siis sanglepa puhul jagunesid murdumispinnad põhiliselt järgnevate kategooriate vahel: 1) puidust ja liimliitest ning 2) liimliitest.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kaheksanda töötlusastme korral (joonis 17).

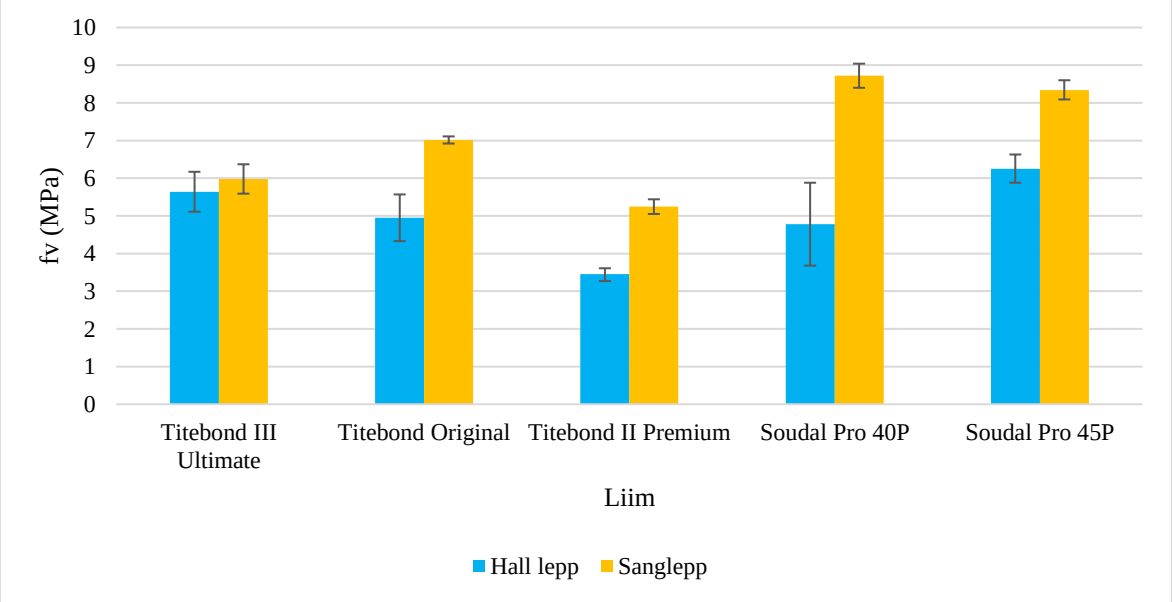


Joonis 17. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 8.

Sarnaselt seitsmendale töötlusastmele oli ka kaheksandal töötlusastmel mõlema puuliigi kõige suurem liimühenduse keskmine nihketugevus liimiga Soudal Pro 45P – hallil lepal 7,3 MPa ja sanglepal 8,07 MPa. Võrreldes liime Soudal Pro 40P ja Soudal Pro 45P erines halli lepa keskmine nihketugevus üksteisest vaid 1,39%. Kaheksandal töötlusastmel oli sanglepa keskmine nihketugevus liimiga Soudal Pro 40P eelnevast töötlusastmest 61,93% suurem. Kui seitsmendal töötlusastmel murdusid katsekehad 58,82% juhtudest liimliitest, siis antud töötlusastme puhul murdus liimliitest vaid 14,29% katsekehadest (tabel 4). Halli lepa väikseim liimühenduse keskmine nihketugevus 2,67 MPa saadi liimiga Titebond III Ultimate. Antud tulemuse juures murdus 26,66% katsekehadest liimliitest (tabel 3). Sanglepa puhul oli keskmine nihketugevus 3,79 MPa kõige väiksem liimiga Titebond II Premium.

Kaheksanda töötlusastme juures oli mõlema puuliigi võrdluses kõige suurem erinevus murdumispindade kirjelduses liimiga Titebond Original (tabel 3 ja 4). Kui enamus halli lepa katsekehadest murdusid liimliitest, siis sanglepa katsekehade murdumispinnad koosnesid põhiliselt nii puidust kui ka liimliitest.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga üheksanda töötlusastme korral (joonis 18).

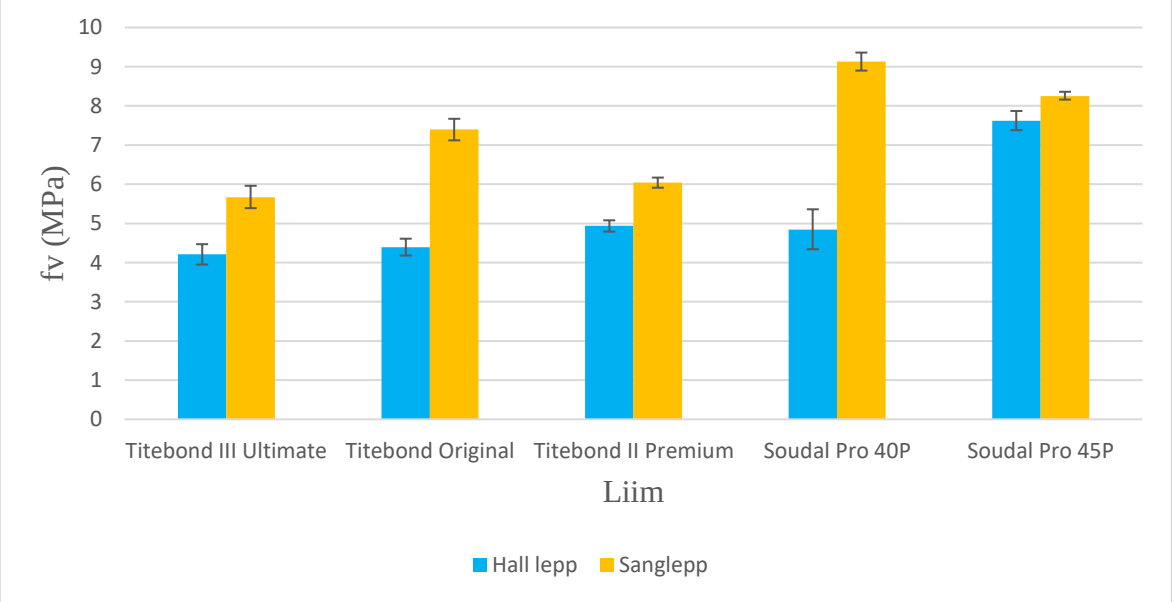


Joonis 18. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 9.

Üheksandal töötlusastmel oli sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus kõige suurem liimiga Soudal Pro 40P. Halli lepa suurim näitaja oli saadud liimiga Soudal Pro 45P. Tulemused olid vastavalt 8,72 MPa ja 6,25 MPa. Kõikide liimide puhul oli sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus halli lepa nihketugevusest suurem. Halli lepa keskmine nihketugevus 3,45 MPa oli saadud liimiga Titebond II Premium. Antud tulemus oli liimide võrdluses ka kõige väiksem. Sanglepa kõige väiksem tulemus 5,25 MPa oli saadud kasutades sama liimi. Sanglepa liimühenduse nihketugevused võrdluses halli lepa näitajatega olid keskmiselt 40,8% suuremad.

Tabeli 4 andmetest selgus, et antud töötlusastmel ei olnud ühtegi sanglepa katsekeha, mis oleks murdunud liimliitest. Liimide Titebond III Ultimate, Titebond II Premium ja Soudal Pro 40P puhul oli enamus katsekehade murdumispindadest puidust. Halli lepa puhul suurenes katsekehade murdumine puidust, mille liimühendused olid liimitud Titebond III Ultimate ja Titebond Original liimidega (tabel 3). Võrreldes kaheksandat ja üheksandat töötlusastet, võib tähendada, et PVA liimide puhul vähenes mõlemal puuliigil katsekehade murdumine liimliitest.

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kümnenda töötlusastme korral (joonis 19).



Joonis 19. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine liimist koos 95% usaldusnivooga töötlusastmes 10.

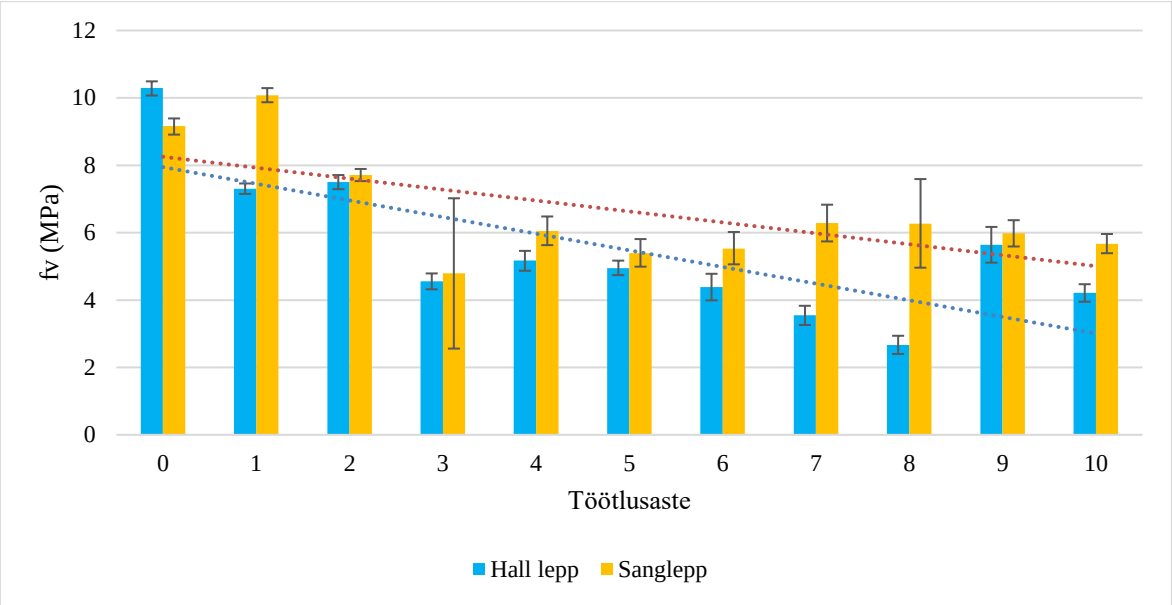
Sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus 9,13 MPa oli kõige suurem liimiga Soudal Pro 40P. Antud liimi kasutades oli 75% katsekehade murdumispinnas näha nii puitu kui ka liimliidet (tabel 4). Halli lepa nihketugevus 7,62 MPa oli kõige suurem liimiga Soudal Pro 45P. Võrreldes liime Soudal Pro 40P ja Soudal Pro 45P selgus, et sanglepa keskmised nihketugevused erinesid üksteisest 9,64%. Kõige madalama tulemuse andis nii halli lepa kui ka sanglepa puhul Titebond III Ultimate liim. Halli lepa nihketugevus oli 4,21 MPa ja sanglepa nihketugevus 5,67 MPa. Sarnaselt üheksandale töötlusastmele oli kõikide liimide võrdluses sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus halli lepa nihketugevusest suurem. Tabeli 3 tulemustest selgus, et kõikide liimide võrdluses murdusid vähemalt pooled halli lepa katsekehadest puidust. Titebond Original ja Titebond II Premium liimi puhul toimus murdumine puidust 91,66% katsekehadel.

Töötlusastmetel 1-3 oli halli lepa liimühenduse keskmine nihketugevus kõige suurem liimiga Soudal Pro 40P. Astmetel 4-10 oli kõige mõjusamaks liimiks Soudal Pro 45P. Kõige väiksem liimühenduse keskmine nihketugevus oli hallil lepal töötlusastmetel 1-2, 5 ja 9 kasutades liimi Titebond II Premium. Töötlusastmetel 3-4, 6-8 ja 10 oli kõige nõrgemad tulemused liimiga Titebond III Ultimate.

Sanglepa puhul oli töötlusastmetel 1-2 ja 9-10 keskmine nihketugevus kõige suurem liimiga Soudal Pro 40P. Töötlusastmetel 5-8 näitas kõige paremat tulemust liim Soudal Pro 45P. Sanglepa kõige väiksemad nihketugevused töötlusastmetel 3-5 ja 7 saadi liimiga Soudal Pro 40P. Astmetel 8-9 oli kõige nõrgem tulemus liimil Titebond II Premium. Töötlusastmetel 1, 6 ja 10 oli kõige väiksem liimühenduse keskmine nihketugevus liimiga Titebond III Ultimate.

4.2. Liimühenduse nihketugevuse sõltumine töötlusastmest

Selles alapeatükis on analüüsitud puidu nihketugevuse sõltumist erinevatest töötlusastmetest liimide kaupa. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Titebond III Ultimate on kujutatud joonisel 20.



Joonis 20. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine töötlusastmest koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Titebond III Ultimate.

Tulemused näitavad mõlema puuliigi puhul liimühenduse keskmise nihketugevuse langevat trendi. Halli lepa puhul moodustus kolm grupeeringut: 1-3, 4-8 ja 9-10. Grupi 4-8 liimühenduse keskmise nihketugevuse vähenemine oli teistest halli lepa gruppidest ühtlasem. Sanglepa puhul moodustus samuti kolm grupeeringut: 1-3, 4-6 ja 7-10. Kõige ühtlasem liimühenduse keskmise nihketugevuse vähenemine oli sanglepa puhul grupil 7-10.

Kõige suurem liimühenduse keskmine nihketugevus oli halli lepa puhul naturaalse puidu korral, olles 10,29 MPa. Töödeldud puidust oli halli lepa kõige suurem nihketugevus 7,5 MPa teise töötlusastme juures. Sanglepa puhul oli kõige suurem keskmine nihketugevus 10,08 MPa esimesel töötlusastmel. Antud tulemus oli ka naturaalse puidu nihketugevusest suurem. Kõige madalam liimühenduse keskmine nihketugevus oli halli lepa puhul 2,67 MPa kaheksanda töötlusastme juures ja sanglepal 4,79 MPa kolmanda töötlusastme juures. Kõige suurem keskmise nihketugevuse erinevus oli kaheksanda töötlusastme juures, kus halli lepa nihketugevus oli sanglepast 57,4% väiksem. Kõikide töötlusastmete üleselt oli sanglepa nihketugevus keskmiselt 21,68% võrra suurem kui hallil lepal.

Liimühenduse nihketugevuse katsete alusel koostatud kirjeldav statistika on välja toodud tabelites 5 ja 7.

Et selgitada välja töötlusastmete vaheline erinevus, teostati statistiline analüüs liimühenduse keskmistele väärtustele (tabel 6 ja 8). Sanglepa esimesel töötlusastmel oli liimühenduse

keskmine nihketugevus suurem kui töötlemata puidul. Statistiline analüüs näitab, et antud andmed ei oma statistilist erinevust. Halli lepa kõige suurem nihketugevus oli teise töötlusastme juures. Antud tulemus on statistiliselt erinev 3-10 töötlusastmest, statistiline erinevus puudub esimese töötlusastmega. Halli lepa kõige madalam liimühenduse keskmine nihketugevus oli töötlusastmel 8. Statistiline erinevus puudub 7. ja 10. töötlusastme juures. Sanglepa kõige madalam keskmine nihketugevus oli töötlusastmel 3. Antud tulemus on statistiliselt erinev töötlusastmega 2, teised töötlusastmed statistilist erinevust ei näita. Halli lepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud kõikide töötlusastmete puhul. Sanglepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmetel 4-7 ja 9-10. Töötlusastmetel 1-3 ja 8 ei ole statistiline erinevus tõestatud.

Tulemustest selgus, et halli lepa termiline töötlemine vähendab Titebond III Ultimate liimühenduste keskmist nihketugevust kõikidel töötlusastmetel. Sanglepa puhul vähendab termiline töötlemine keskmist nihketugevust töötlusastmetel 4-7 ja 9-10.

Tabel 5. Halli lepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Titebond III Ultimate Wood Glue

	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	10,29	7,30	7,50	4,56	5,17	4,95	4,39	3,55	2,67	5,64	4,21
Standardviga	1,11	0,81	1,13	1,25	1,58	1,13	2,05	1,50	1,45	0,96	1,40
Standardhälve	0,32	0,24	0,32	0,35	0,44	0,31	0,43	0,37	0,37	0,25	0,40
Suurim väärtus	11,94	8,41	8,99	6,55	7,40	6,82	7,51	6,26	4,52	7,25	5,87
Väikseim väärtus	7,85	5,93	5,53	2,77	2,18	2,62	1,29	0,95	0,16	2,86	1,85
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	10,07	7,46	7,71	4,79	5,46	5,17	4,78	3,83	2,94	6,17	4,47
Alumine 95% usalduspiir	10,49	7,15	7,29	4,32	4,87	4,74	3,99	3,26	2,40	5,11	3,95

Tabel 6. Halli lepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Titebond III Ultimate Wood Glue

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	<0,001									
LV 2	<0,001	1								
LV 3	<0,001	<0,001	<0,001							
LV 4	<0,001	0,0068	0,0017	0,9872						
LV 5	<0,001	0,0016	<0,001	1	1					
LV 6	<0,001	<0,001	<0,001	1	0,9145	1				
LV 7	<0,001	<0,001	<0,001	0,6646	0,0655	0,1877	0,8279			
LV 8	<0,001	<0,001	<0,001	0,0160	<0,001	<0,001	0,0303	0,7852		
LV 9	<0,001	0.0732	0,0238	0,5839	1	0,9621	0,3072	0,0018	<0,001	
LV 10	<0,001	<0,001	<0,001	1	0,8081	0,9573	1	0,9715	0,1289	0,2119

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Tabel 7. Sanglepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Titebond III Ultimate Wood Glue

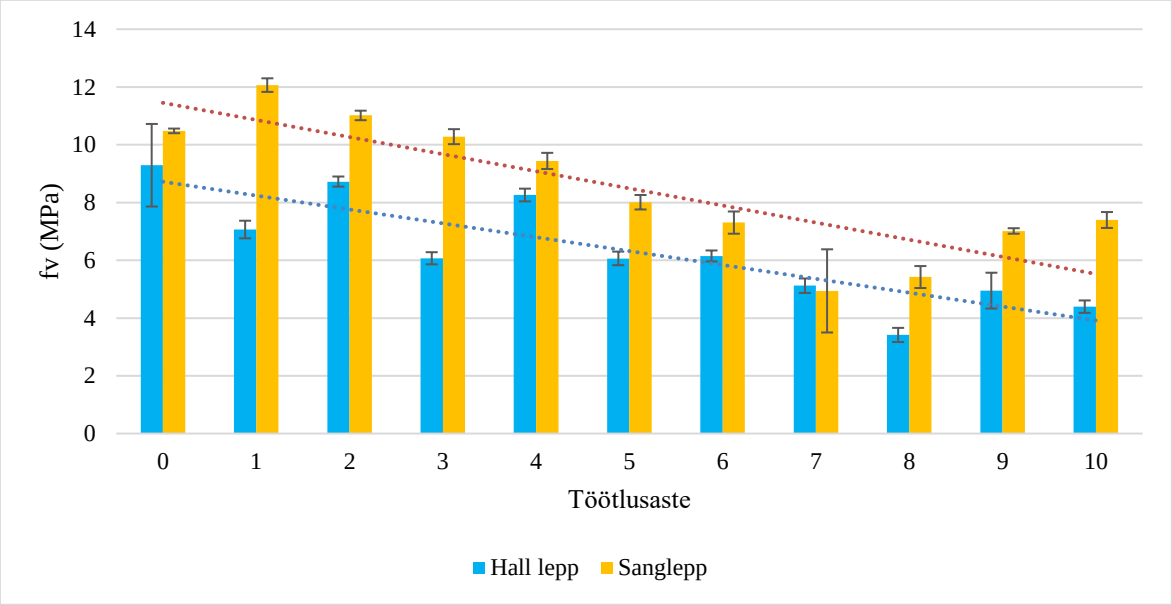
	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	9,16	10,08	11,33	7,74	6,05	5,39	5,53	6,29	6,27	5,98	5,67
Standardviga	1,29	1,14	0,96	3,86	2,21	2,18	2,53	2,89	2,28	2,07	1,51
Standardhälve	0,37	0,33	0,28	1,03	0,61	0,60	0,73	0,70	0,61	0,60	0,44
Suurim väärtus	10,73	11,99	12,60	12,42	9,97	10,59	10,81	10,30	8,03	9,16	8,58
Väikseim väärtus	6,54	7,99	9,60	2,20	2,86	2,23	1,86	0,84	1,28	3,28	4,10
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	9,39	10,29	11,51	9,97	6,48	5,81	6,02	6,83	7,59	6,37	5,96
Alumine 95% usalduspiir	8,91	9,87	11,15	5,51	5,63	4,99	5,06	5,74	4,96	5,59	5,39

Tabel 8. Sanglepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Titebond III Ultimate Wood Glue

	LM 0	LM 1	LM 2	LM 3	LM 4	LM 5	LM 6	LM 7	LM 8	LM 9
LM 1	0,9959									
LM 2	0,4272	0,9613								
LM 3	0,8929	0,2641	0,0053							
LM 4	0,0375	0,0012	<0,001	0,7121						
LM 5	0,0034	<0,001	<0,001	0,2310	1					
LM 6	0,0077	<0,001	<0,001	0,3473	1	1				
LM 7	0,0459	0,0012	<0,001	0,8095	1	0,9922	0,9984			
LM 8	0,0636	0,0022	<0,001	0,8387	1	0,9954	1	1		
LM 9	0,0362	0,0012	<0,001	0,6852	1	1	1	1	1	
LM10	0,0127	<0,001	<0,001	0,4459	1	1	1	1	1	1

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Titebond Original (joonis 21).



Joonis 21. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine töötlusastmest koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Titebond Original.

Tulemustest selgus, et mõlema puuliigi puhul on näha liimühenduse keskmise nihketugevuse langevat trendi. Halli lepa töötlemata puidu liimühenduse keskmine nihketugevus oli 9,29 MPa ja sanglepal 10,48 MPa. Halli lepa puhul ei olnud ühegi töötlusastme keskmine nihketugevus töötlemata puidust suurem. Sanglepa puhul oli seevastu liimühenduse keskmine nihketugevus võrreldes töötlemata puiduga suurem töötlusastmetel 1-3.

Töödeldud puidu puhul oli halli lepa kõige suurem nihketugevus 8,72 MPa teise töötlusastme juures. Sanglepa suurim keskmine nihketugevus 12,06 MPa oli esimesel töötlusastmel, mis oli ka töötlemata puidu nihketugevusest suurem. Kõige väiksem liimühenduse keskmine nihketugevus oli halli lepa puhul 3,42 MPa kaheksandal töötlusastmel ja sanglepal 4,94 MPa seitsmendal töötlusastmel. Mõlema puuliigi keskmise nihketugevuse kõige suurem erinevus oli esimesel töötlusastmel, kus halli lepa nihketugevus oli võrreldes sanglepaga 41,46% väiksem. Kõikide töötlusastmete peale oli sanglepa liimühenduse nihketugevus keskmiselt 27,37% suurem halli lepa nihketugevusest.

Liimühenduse nihketugevuse katsete alusel koostatud kirjeldav statistika on välja toodud tabelites 9 ja 11.

Liimühenduse nihketugevuse keskmistele väärtustele teostati statistiline analüüs, et välja selgitada töötlusastmete vaheline erinevus (tabel 10 ja 12). Sanglepal oli liimühenduse keskmine nihketugevus võrreldes töötlemata puiduga suurem töötlusastmetel 1-3. Statistiline analüüs näitab, et antud andmed ei oma statistilist erinevust võrreldes töötlemata puiduga. Halli lepal oli suurim keskmine nihketugevus teise töötlusastme juures. Antud tulemuse puhul on statistiline erinevus tõestatud töötlusastmetel 3 ja 5-10. Statistiline erinevus puudub esimese ja neljanda töötlusastmega. Sanglepa kõige väiksem keskmine nihketugevus oli töötlusastmel 7. Antud tulemusel puudub statistiline erinevus töötlusastmega 8, teiste töötlusastmete puhul on statistiline erinevus tõestatud. Halli lepa kõige väiksem nihketugevus oli töötlusastmel 8. Statistiline analüüs näitas, et tulemus ei ole statistiliselt erinev töötlusastmetega 9 ja 10, teiste töötlusastmete puhul on statistiline erinevus tõestatud. Halli lepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmetel 1, 3 ja 5-10. Töötlusastmetel 2 ja 4 ei ole statistiline erinevus tõestatud. Sanglepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmetel 5-10. Töötlusastmed 1-4 ei ole antud tulemusest statistiliselt erinevad.

Tulemustest selgub, et halli lepa termiline töötlemine vähendab Titebond Original liimi liimühenduse keskmist nihketugevust töötlusastmetel 1, 3 ja 5-6. Sanglepa puhul vähendab termiline töötlemine keskmist nihketugevust töötlusastmetel 5-10.

Tabel 9. Halli lepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Titebond Original Wood Glue

	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	9,29	7,06	8,72	6,07	8,26	6,06	6,15	5,13	3,42	4,95	4,39
Standardviga	2,25	1,61	0,91	1,11	1,17	1,23	1,00	1,33	1,32	1,11	1,17
Standardhälve	0,65	0,47	0,26	0,31	0,32	0,34	0,26	0,33	0,34	0,29	0,34
Suurim väärtus	11,70	9,18	10,36	7,43	9,92	9,29	7,39	7,10	6,01	7,88	6,34
Väikseim väärtus	5,34	4,69	6,91	4,21	6,28	4,70	4,44	2,43	1,61	3,58	2,61
Shapiro test p–väärtus	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	10,72	7,37	8,90	6,28	8,48	6,30	6,34	5,37	3,17	5,57	4,61
Alumine 95% usalduspiir	7,86	6,76	8,55	5,86	8,04	5,83	5,96	4,87	3,66	4,33	4,18

Tabel 10. Halli lepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Titebond Original Wood Glue

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	0,0029									
LV 2	0,9932	0,0855								
LV 3	<0,001	0,7737	<0,001							
LV 4	0,6805	0,4693	0,9983	0,0021						
LV 5	<0,001	0,7215	<0,001	1	0,0020					
LV 6	<0,001	0,7899	<0,001	1	0,0023	1				
LV 7	<0,001	0,0088	<0,001	0,7141	<0,001	0,7273	0,5471			
LV 8	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0184		
LV 9	<0,001	0,0031	<0,001	0,4860	<0,001	0,5002	0,3241	1	0,0658	
LV 10	<0,001	<0,001	<0,001	0,0680	<0,001	0,0717	0,0319	0,9315	0,7108	0,9913

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Tabel 11. Sanglepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Titebond Original Wood Glue

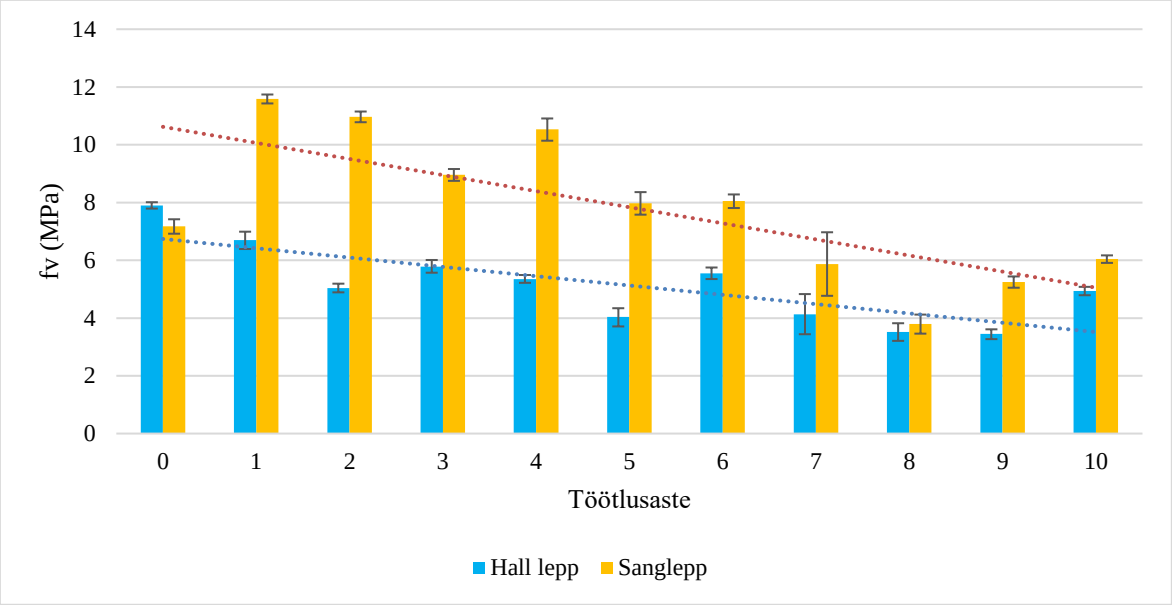
	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	10,48	12,06	11,02	10,28	9,44	8,01	7,31	4,94	5,43	7,01	7,40
Standardviga	0,41	1,23	0,89	1,37	1,45	1,34	2,04	2,81	2,01	0,53	1,47
Standardhälve	0,12	0,36	0,26	0,37	0,40	0,37	0,59	0,68	0,54	0,15	0,42
Suurim väärtus	11,21	13,72	12,82	12,55	11,74	9,92	10,26	10,21	7,82	8,10	9,38
Väikseim väärtus	9,54	9,91	9,49	7,40	7,36	5,30	3,60	1,88	1,27	6,12	4,44
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	10,56	12,30	11,18	10,54	9,72	8,26	7,69	6,38	5,80	7,11	7,67
Alumine 95% usalduspiir	10,40	11,83	10,85	10,02	9,16	7,76	6,92	3,50	5,04	6,92	7,12

Tabel 12. Sanglepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Titebond Original Wood Glue

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	0,3884									
LV 2	1	0,8899								
LV 3	1	0,1751	0,9864							
LV 4	0,8797	0,0044	0,3626	0,9602						
LV 5	0,0101	<0,001	<0,001	0,0181	0,4868					
LV 6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0512	0,9916				
LV 7	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0079			
LV 8	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0032	0,1252	0,9989		
LV 9	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0128	0,9064	1	0,0367	0,3311	
LV 10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0748	0,9971	1	0,0047	0,0879	1

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Titebond II Premium (joonis 22).



Joonis 22. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine töötlusastmest koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Titebond II Premium.

Mõlema puuliigi puhul on tulemustes näha liimühenduse keskmise nihketugevuse langevat trendi. Töötlemata halli lepa liimühenduse keskmine nihketugevus oli 7,9 MPa ja sanglepal 7,18 MPa. Halli lepa puhul ei olnud ühegi töötlusastme keskmine nihketugevus töötlemata puidust suurem. Sanglepal oli keskmine nihketugevus töötlemata puidust suurem töötlusastmetel 1-6.

Töödeldud halli lepa kõige suurem nihketugevus 6,7 MPa oli esimesel töötlusastmel. Sanglepa suurim keskmine nihketugevus 11,59 MPa oli esimesel töötlusastmel, mis oli ka töötlemata puidu nihketugevusest suurem. Kõige väiksem liimühenduse keskmine nihketugevus oli hallil lepal 3,45 MPa üheksandal töötlusastmel ja sanglepal 3,79 MPa kaheksandal töötlusastmel. Suurim erinevus halli lepa ja sanglepa nihketugevuses väljendus töötlusastmel 4, kus halli lepa nihketugevus oli võrreldes sanglepaga 49,19% võrra väiksem. Vaadeldes kõiki töötlusastmeid, oli sanglepa liimühenduse nihketugevus keskmiselt 38,62% suurem halli lepa nihketugevusest.

Liimühenduse nihketugevuse katsete alusel koostatud kirjeldav statistika on välja toodud tabelites 13 ja 15.

Liimühenduse nihketugevuse keskmistele väärtustele teostati statistiline analüüs, et välja selgitada töötlusastmete vaheline erinevus (tabel 14 ja 16). Sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus oli töötlemata puidu nihketugevusest suurem töötlusastmetel 1-6. Statistilisest analüüsist selgus, et töötlusastmetel 1-2 ja 4 on antud tulemuste erinevus tõestatud. Töötlusastmetel 3 ja 5-6 seevastu statistilist erinevust ei esine. Halli lepa suurim keskmine nihketugevus oli töödeldud puidu puhul töötlusastmel 1. Antud tulemus oli statistiliselt erinev töötlusastmetest 2, 5, 7, 8 ja 10. Töötlusastmete 3, 4, 6 ja 9 puhul ei ole statistiline erinevus tõestatud. Halli lepa kõige väiksem keskmine nihketugevus oli töötlusastmel 9. Statistiliselt on tõestatud, et antud tulemus on erinev töötlusastmetest 2-4 ja 6. Statistiline erinevus puudub töötlusastmetega 1, 5, 7, 8 ja 10. Sanglepa kõige väiksem keskmine nihketugevus oli töötlusastmel 8. Antud tulemus ei ole statistiliselt erinev töötlusastmest 8. Ülejäänud töötlusastmete puhul on statistiline erinevus tõestatud.

Halli lepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmetel 2-10. Tulemuste erinevus ei ole tõestatud töötlusastmel 1. Sanglepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmetel 1, 2, 4 ja 8. Töötlusastmed 3, 5-7 ja 9-10 ei ole antud tulemusest statistiliselt erinevad.

Vastavalt tulemustele ilmnes, et halli lepa termiline töötlemine vähendab Titebond II Premium liimi liimühenduse keskmist nihketugevust töötlusastmetel 2-10. Sanglepa puhul oli liimühenduse keskmise nihketugevuse muutumine võrreldes halli lepaga erinev. Selgus, et termiline töötlemine suurendab Titebond II Premium liimühenduse keskmist nihketugevust töötlusastmetel 1, 2 ja 4. Termiline töötlus vähendab sanglepa keskmist nihketugevust töötlusastmel 8.

Tabel 13. Halli lepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Titebond II Premium Wood Glue

	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	7,90	6,70	5,04	5,78	5,35	4,04	5,55	4,13	3,52	3,45	4,94
Standardviga	0,58	1,60	0,78	1,17	0,71	1,70	1,06	1,31	1,62	0,89	0,77
Standardhälve	0,17	0,46	0,23	0,32	0,20	0,47	0,27	0,33	0,42	0,23	0,22
Suurim väärtus	8,69	8,62	6,63	8,41	6,40	5,88	6,80	5,29	5,46	4,91	5,87
Väikseim väärtus	7,11	3,10	4,10	4,19	4,43	0,72	3,62	0,25	0,60	1,79	3,49
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	8,01	6,99	5,19	6,01	5,49	4,34	5,75	4,83	3,82	3,61	5,08
Alumine 95% usalduspiir	7,79	6,39	4,89	5,57	5,22	3,71	5,35	3,44	3,21	3,27	4,79

Tabel 14. Halli lepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Titebond II Premium Wood Glue

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	0,3203									
LV 2	<0,001	0,0310								
LV 3	<0,001	0,6932	0,8926							
LV 4	<0,001	0,1549	1	0,9977						
LV 5	<0,001	<0,001	0,5661	0,0109	0,1540					
LV 6	<0,001	0,3148	0,9887	1	1	0,0360				
LV 7	<0,001	<0,001	0,6448	0,0119	0,1831	1	0,0410			
LV 8	<0,001	<0,001	0,0436	<0,001	0,0034	0,9859	0,0003	0,9339		
LV 9	<0,001	<0,001	0,0275	<0,001	0,0019	0,9650	<0,001	0,8743	1	
LV 10	<0,001	<0,001	1	0,7881	0,9984	0,7134	0,9590	0,7887	0,0809	0,0530

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Tabel 15. Sanglepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Titebond II Premium Wood Glue

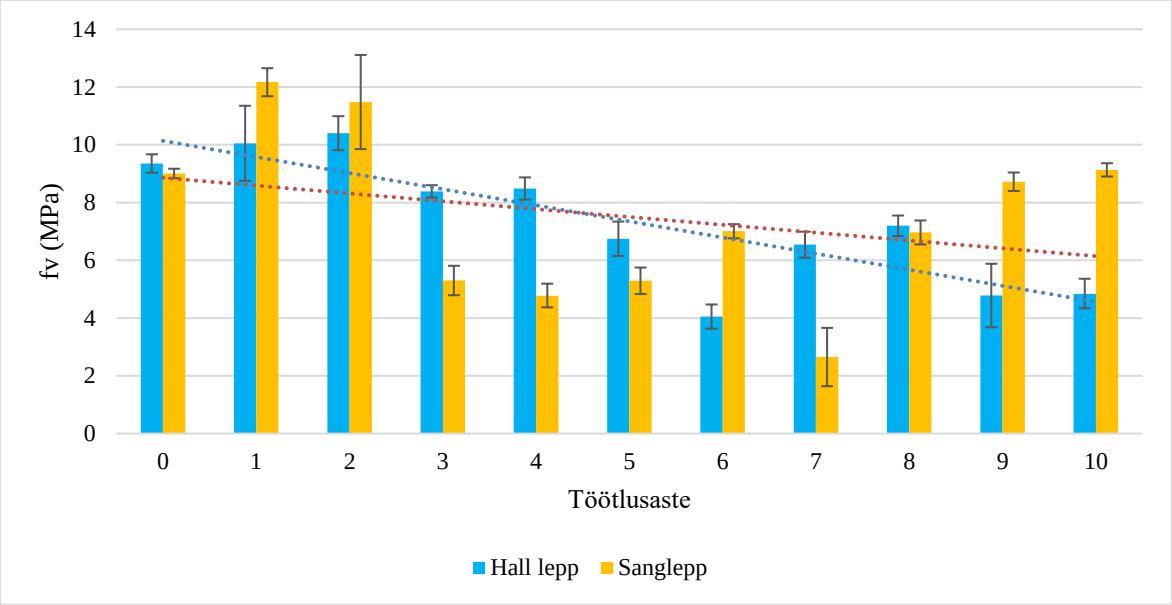
	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	7,18	11,59	10,97	8,96	10,53	7,97	8,05	5,87	3,79	5,25	6,04
Standardviga	1,34	0,83	0,97	1,11	2,08	2,10	1,30	2,13	1,78	1,04	0,70
Standardhälve	0,39	0,24	0,28	0,30	0,58	0,58	0,38	0,52	0,48	0,30	0,20
Suurim väärtus	9,07	12,73	12,06	10,92	13,63	10,98	9,89	8,73	6,83	6,98	7,03
Väikseim väärtus	4,09	9,51	8,45	6,84	6,63	4,79	5,14	2,27	1,15	3,70	5,12
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	7,42	11,74	11,05	9,16	10,91	8,36	8,28	6,97	4,12	5,44	6,17
Alumine 95% usalduspiir	6,92	11,43	10,78	8,75	10,14	7,58	7,81	4,77	3,46	5,05	5,91

Tabel 16. Sanglepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Titebond II Premium Wood Glue

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	<0,001									
LV 2	<0,001	0,9956								
LV 3	0,1160	0,0012	0,0408							
LV 4	<0,001	0,8204	1	0,2196						
LV 5	0,9681	<0,001	<0,001	0,8446	0,0017					
LV 6	0,9473	<0,001	<0,001	0,9136	0,0038	1				
LV 7	0,4651	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0125	0,0105			
LV 8	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0105		
LV 9	0,0833	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,9915	0,3588	
LV 10	0,7674	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0709	0,0594	1	0,0116	0,9719

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Soudal Pro 40P (joonis 23).



Joonis 23. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine töötlusastmest koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Soudal Pro 40P.

Tulemusi analüüsides selgus, et mõlema puuliigi puhul on näha liimühenduse keskmise nihketugevuse langevat trendi. Kusjuures sanglepa keskmise nihketugevuse trend näitab järsumat langust kui halli lepa trend. Töötlemata halli lepa liimühenduse keskmine nihketugevus oli 9,35 MPa ja sanglepal 9,01 MPa. Halli lepa puhul sai täheldada, et töötlemata puidust oli keskmine nihketugevus suurem töötlusastmetel 1 ja 2. Sanglepa puhul oli keskmine nihketugevus suurem töötlusastmetel 1, 2 ja 10.

Töödeldud halli lepa kõige suurem nihketugevus 10,4 MPa oli teisel töötlusastmel. Sanglepa suurim keskmine nihketugevus 12,18 MPa oli esimesel töötlusastmel. Mõlemate puuliikide puhul olid antud tulemused töötlemata puidu omadest suuremad. Kõige väiksem keskmine nihketugevus oli hallil lepal 4,05 MPa töötlusastmel 6 ja sanglepal 2,65 MPa töötlusastmel 7. Suurim erinevus halli lepa ja sanglepa nihketugevuses väljendus töötlusastmel 10, kus halli lepa nihketugevus oli võrreldes sanglepaga 46,99% võrra väiksem. Kõikide töötlusastmete võrdluses oli sanglepa liimühenduse nihketugevus keskmiselt 2,76% halli lepa nihketugevusest suurem. Erinevalt PVA liimidest oli töötlusastmetel 3-5 ja 8 halli lepa keskmine nihketugevus sanglepast suurem.

Liimühenduse nihketugevuse katsete alusel koostatud kirjeldav statistika on välja toodud tabelites 17 ja 19.

Liimühenduse nihketugevuse keskmistele väärtustele teostati statistiline analüüs, et välja selgitada töötlusastmete vaheline erinevus (tabel 18 ja 20). Halli lepa keskmine nihketugevus oli töötlemata puidu nihketugevusest suurem töötlusastmetel 1 ja 2. Statistilisest analüüsist selgus, et antud tulemuste puhul statistilist erinevust ei esine. Sanglepa puhul oli nihketugevus suurem töötlusastmetel 1, 2 ja 10. Töötlusastmel 1 on statistiline erinevus tõestatud, töötlusastmetel 2 ja 10 statistilist erinevust ei esine. Halli lepa väikseim keskmine nihketugevus oli töötlusastmel 6. Statistiliselt on tõestatud, et antud tulemus on erinev töötlusastmetest 1-5 ja 7-8. Sanglepa kõige väiksem keskmine nihketugevus oli töötlusastmel 6. Antud tulemus ei ole statistiliselt erinev töötlusastmetest 4, 8, 9 ja 10. Ülejäänud töötlusastmete puhul on statistiline erinevus tõestatud.

Halli lepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmetel 6, 7, 9 ja 10. Tulemuste erinevus ei ole tõestatud töötlusastmetel 1-5 ja 8. Sanglepa töötlemata katsekehade statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmetel 1, 3-5 ja 7. Töötlusastmed 2, 6 ja 8-10 ei ole antud tulemusest statistiliselt erinevad.

Tulemustest selgub, et halli lepa termiline töötlemine vähendab Soudal Pro 40P liimi liimühenduse keskmist nihketugevust töötlusastmetel 6, 7, 9 ja 10. Sanglepa puhul tõstab termiline töötlemine keskmist nihketugevust töötlusastmel 1. Töötlusastmetel 3-5 ja 7 vähendab termiline töötlemine liimühenduse keskmist nihketugevust.

Tabel 17. Halli lepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Soudal PRO 40P

	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	9,35	10,05	10,40	8,38	8,48	6,74	4,05	6,54	7,20	4,78	4,84
Standardviga	1,69	2,04	0,93	1,16	2,03	3,07	2,24	2,39	1,89	1,98	2,69
Standardhälve	0,49	0,59	0,27	0,32	0,56	0,85	0,58	0,60	0,49	0,51	0,78
Suurim väärtus	11,43	11,96	11,46	10,04	12,88	11,98	7,68	11,26	10,86	7,10	10,02
Väikseim väärtus	6,64	4,84	7,85	6,38	5,65	1,08	0,44	1,91	4,23	1,80	1,32
Shapiro test p–väärtus	>0,05	<0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	9,67	11,35	10,99	8,60	8,87	7,34	4,47	6,99	7,55	5,88	5,36
Alumine 95% usalduspiir	9,03	8,75	9,81	8,17	8,10	6,15	3,63	6,09	6,84	3,68	4,34

Tabel 18. Halli lepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Soudal PRO 40P

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	0,9992									
LV 2	0,9788	1								
LV 3	0,9862	0,6619	0,3748							
LV 4	0,9936	0,7345	0,4470	1						
LV 5	0,0797	0,0060	0,0019	0,6546	0,5763					
LV 6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0369				
LV 7	0,0251	0,0012	<0,001	0,4078	0,3337	1	0,0471			
LV 8	0,2336	0,0249	0,0059	0,9202	0,8763	1	<0,001	0,9986		
LV 9	<0,001	<0,001	<0,001	0,4860	<0,001	0,3351	0,9971	0,4184	0,0709	
LV 10	<0,001	<0,001	<0,001	0,0022	0,0015	0,4699	0,9964	0,5687	0,1373	1

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Tabel 19. Sanglepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Soudal PRO 40P

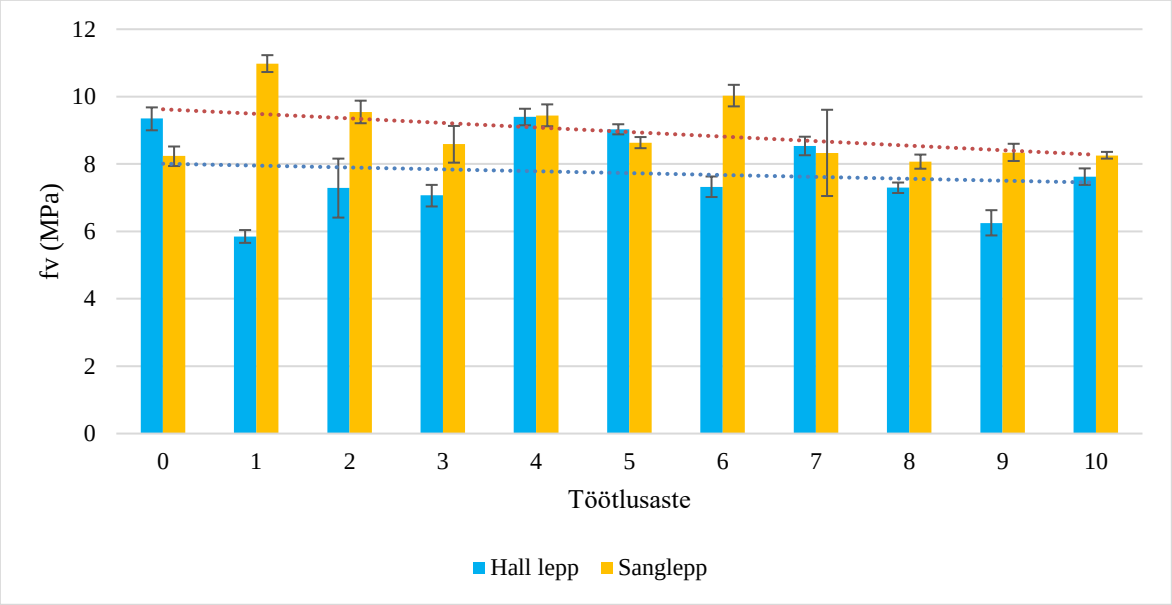
	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	9,01	12,18	11,48	5,30	4,77	5,29	7,01	2,65	6,96	8,72	9,13
Standardviga	0,89	2,58	2,56	2,77	2,17	2,45	1,30	1,89	2,18	1,69	1,24
Standardhälve	0,26	0,75	0,74	0,74	0,60	0,68	0,38	0,47	0,58	0,49	0,36
Suurim väärtus	10,42	15,32	14,19	10,40	8,69	8,93	8,91	5,86	10,71	11,71	10,90
Väikseim väärtus	7,43	6,92	4,93	0,03	2,13	1,57	4,51	0,02	3,07	6,51	7,32
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	9,17	12,65	13,11	5,81	5,19	5,75	7,25	3,66	7,38	9,04	9,36
Alumine 95% usalduspiir	8,84	11,68	9,85	4,79	4,37	4,83	6,76	1,64	6,55	8,40	8,90

Tabel 20. Sanglepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Soudal PRO 40P

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	0,0123									
LV 2	0,1317	1								
LV 3	<0,001	<0,001	<0,001							
LV 4	<0,001	<0,001	<0,001	1						
LV 5	<0,001	<0,001	<0,001	1	1					
LV 6	0,4005	<0,001	<0,001	0,5839	0,2173	0,6062				
LV 7	<0,001	<0,001	<0,001	0,0275	0,1965	0,0344	<0,001			
LV 8	0,3101	<0,001	<0,001	0,5664	0,1968	0,5910	1	<0,001		
LV 9	1	<0,001	0,0531	0,0025	<0,001	0,0032	0,6398	<0,001	0,5456	
LV 10	1	0,0037	0,1826	<0,001	<0,001	<0,001	0,3138	<0,001	0,2330	1

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Järgnevalt on välja toodud halli lepa ja sanglepa liimühenduse tugevuse f_v keskmised väärtused koos 95% usaldusnivooga kasutades liimi Soudal Pro 45P (joonis 24).



Joonis 24. Halli lepa ja sanglepa liimühenduse keskmise nihketugevuse sõltumine töötlusastmest koos 95% usaldusnivooga liimiga Soudal Pro 45P.

Tulemustes on mõlema puuliigi puhul näha liimühenduse keskmise nihketugevuse langevat trendi. Seevastu on Soudal Pro 45P liimiga mõlema puuliigi nihketugevuse trendi langemine väiksem kui teiste kasutatud liimide puhul. Töötlemata halli lepa liimühenduse keskmine nihketugevus oli 9,35 MPa ja sanglepal 8,24 MPa. Halli lepa puhul oli keskmine nihketugevus töötlemata puidust suurem töötlusastmel 4. Sanglepa puhul oli keskmine nihketugevus suurem töötlusastmetel 1-7 ja 9-10.

Töödeldud halli lepa kõige suurem nihketugevus 9,4 MPa oli neljandal töötlusastmel. Sanglepa suurim keskmine nihketugevus 10,98 MPa oli esimesel töötlusastmel. Mõlema puuliigi puhul olid antud tulemused töötlemata puidu omadest suuremad. Kõige väiksem keskmine nihketugevus oli hallil lepal 5,85 MPa töötlusastmel 1 ja sanglepal 8,07 MPa töötlusastmel 8. Suurim erinevus halli lepa ja sanglepa nihketugevuses väljendus töötlusastmel 1, kus halli lepa nihketugevus oli võrreldes sanglepaga 46,72% võrra väiksem. Kõikide töötlusastmete võrdluses oli sanglepa liimühenduse nihketugevus keskmiselt 16,1% halli lepa nihketugevusest suurem.

Liimühenduse nihketugevuse katsete alusel koostatud kirjeldav statistika on välja toodud tabelites 21 ja 23.

Et välja selgitada töötlusastmete vaheline erinevus, teostati liimühenduse nihketugevuse keskmistele väärtustele statistiline analüüs (tabel 22 ja 24). Halli lepa liimühenduse keskmine nihketugevus oli töötlemata puidu nihketugevusest suurem töötlusastmes 4. Analüüsist selgus, et tulemuste vahel statistilist erinevust ei esine. Töötlemata katsekehade statistiline erinevus halli lepa puhul on tõestatud töötlusastmetel 1-3, 6, 7 ja 8. Sanglepa puhul oli nihketugevus suurem töötlusastmetel 1-7 ja 9-10. Analüüsist selgus, et statistiliselt on erinevus tõestatud ainult töötlusastmega 1. Töötlusastmetel 2-10 ei ole töötlemata katsekehade statistiline erinevus tõestatud.

Halli lepa keskmine nihketugevus oli väikseim töötlusastmel 1. Analüüs näitas, et statistiliselt tõestatud erinevus esineb töötlusastmetega 4, 5 ja 7. Töötlusastmetel 2, 3, 6 ja 8-10 statistilist erinevust ei esinenud. Sanglepa keskmine nihketugevus oli kõige väiksem töötlusastmel 8. Statistiline erinevus on tõestatud töötlusastmega 1. Ülejäänud töötlusastmete tulemustega statistiline erinevus puudub.

Tulemusi analüüsides ilmneb, et halli lepa töötlemine vähendab Soudal Pro 45P liimi liimühenduse keskmist nihketugevust töötlusastmetel 1-3, 6, 8 ja 9. Sanglepa puhul tõstab termiline töötlemine keskmist nihketugevust töötlusastmel 1.

Tabel 21. Halli lepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Soudal PRO 45P

	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	9,35	5,85	7,29	7,07	9,40	9,03	7,32	8,54	7,30	6,25	7,62
Standardviga	1,82	1,01	1,38	1,69	1,30	0,79	1,60	1,44	0,82	1,97	1,36
Standardhälve	0,52	0,29	0,40	0,47	0,35	0,22	0,41	0,36	0,21	0,51	0,39
Suurim väärtus	11,62	7,24	8,50	9,78	11,57	10,14	9,75	10,77	8,20	10,02	10,28
Väikseim väärtus	6,52	4,13	3,64	3,50	6,58	7,59	4,72	5,20	5,57	3,63	5,40
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	9,68	6,04	8,16	7,38	9,64	9,18	7,63	8,81	7,45	6,63	7,87
Alumine 95% usalduspiir	9,00	5,66	6,41	6,74	9,15	8,88	7,02	8,26	7,14	5,88	7,38

Tabel 22. Halli lepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Soudal PRO 45P

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	<0,001									
LV 2	0,0235	0,3423								
LV 3	0,0051	0,5661	1							
LV 4	1	<0,001	0,0115	0,0021						
LV 5	1	<0,001	0,0948	0,0262	1					
LV 6	0,0158	0,2333	1	1	0,0069	0,0723				
LV 7	0,9253	<0,001	0,4451	0,1877	0,8652	0,9979	0,3979			
LV 8	0,0138	0,2536	1	1	0,0059	0,0644	1	0,3697		
LV 9	<0,001	1	0,7349	0,9195	<0,001	<0,001	0,6212	<0,001	0,6514	
LV 10	0,1193	0,0971	1	0,9964	0,0714	0,3438	1	0,8456	1	0,3342

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

Tabel 23. Sanglepa liimühenduse nihketugevuse F_v karakteristikud liimiga Soudal PRO 45P

	Töötlusaste										
Karakteristik	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aritmeetiline keskmine	8,24	10,98	9,54	8,59	9,44	8,63	10,03	8,33	8,07	8,34	8,25
Standardviga	1,53	1,37	1,76	2,86	1,72	0,87	1,68	2,49	1,09	1,34	0,54
Standardhälve	0,44	0,40	0,51	0,76	0,48	0,24	0,48	0,60	0,29	0,39	0,16
Suurim väärtus	9,91	13,56	12,50	13,48	12,55	10,30	12,09	13,97	9,63	10,71	8,95
Väikseim väärtus	5,12	8,50	6,75	3,84	5,99	7,21	7,55	1,14	5,97	6,00	7,49
Shapiro test p–väärtus	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Ülemine 95% usalduspiir	8,52	11,23	9,88	9,13	9,77	8,80	10,35	9,61	8,28	8,60	8,36
Alumine 95% usalduspiir	7,94	10,73	9,21	8,04	9,12	8,47	9,71	7,05	7,86	8,09	8,16

Tabel 24. Sanglepa liimühenduse nihketugevuskatsete p–väärtuste võrdlus sõltuvalt töötlusastmest liimiga Soudal PRO 45P

	LV 0	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5	LV 6	LV 7	LV 8	LV 9
LV 1	0,0079									
LV 2	0,7574	0,6321								
LV 3	1	0,0261	0,948							
LV 4	0,8153	0,5074	1	0,9707						
LV 5	1	0,0386	0,9674	1	0,9829					
LV 6	0,3005	0,9608	1	0,5737	0,9989	0,6472				
LV 7	1	0,0042	0,7509	1	0,8125	1	0,2639			
LV 8	1	0,0019	0,5476	1	0,6158	0,9989	0,1476	1		
LV 9	1	0,0129	0,8381	1	0,8855	1	0,3879	1	1	
LV 10	1	0,0087	0,7734	1	0,8297	1	0,3158	1	1	1

Märkus. Valge taustaga p–väärtused näitavad tulemuste statistilist erinevust ($p < 0,05$), punase taustaga väärtused statistilist erinevust ei näita ($p > 0,05$).

KOKKUVÕTE

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks oli uurida, kuidas mõjutab termiline töötlemine lepapuidu liimühenduse tugevust. Töö käigus anti ülevaade termilise töötlemise protsessidest ja seda mõjutavatest teguritest ning erinevatest puiduliimidest. Andmete kogumiseks teostati katsekehadele liimühenduse nihketugevuse katsed. Selle eelduseks oli katsekehade ettevalmistus. Katsekehad olid töödeldud 10 erinevas termilise töötlemise astmes, mis erinesid omavahel töötlemistemperatuuri ja protsessi kestuse poolest. Materjali ettevalmistamisel ja liimühenduse nihketugevuse katsete läbiviimisel lähtuti EVS-EN 14080:203 standardist. Tulemuste analüüsimiseks ning nende omavaheliseks võrdlemiseks teostati katsetulemustele statistiline analüüs. Samuti võrreldi töödeldud katsekehade tulemusi töötlemata katsekehade tulemustega.

Liimühenduse nihketugevuse määramiseks valmistati ette 296 katsekeha, millest iga katsekeha koosnes 5 liimühendusest. Katsekehadel sooritati 5 nihketugevuse mõõtmist kasutades universaalset katsemasinat Instron 3369. Iga termilise töötluse astme ja töötlemata puidu kohta sooritati katsed vähemalt 12 katsekehal. Katsekehade arv sõltus materjali väljatulekust ettevalmistamise protsessis.

Uurimusest selgus, et üldiselt oli termiliselt töödeldud halli lepa liimimise tulemuslikkus väiksem kui sanglepal. Termiline töötlemine vähendas halli lepa liimühenduste keskmist nihketugevust kõikide liimide puhul. Sanglepa puhul selgus, et termiline töötlemine vähendas liimühenduste nihketugevuse väärtust osaliselt. Kui liimide Titebond III Ultimate ja Titebond Original liimühenduste puhul toimus nihketugevuse väärtuste langemine, siis liimide Titebond II Premium, Soudal Pro 40P ja Soudal Pro 45P kasutamisel oli näha teatud töötluse astmete puhul väärtuste kasvu.

Töötlusastmetel 1, 2, 6, 9 ja 10 oli sanglepa liimühenduse keskmine nihketugevus kõikide liimide puhul suurem halli lepa väärtustest. Nii halli lepa kui ka sanglepa kõige tugevam liimühendus moodustus töötlusastmel 1 liimiga Soudal Pro 40P. Sanglepa kõige väiksem keskmine nihketugevus saadi töötlusastmel 7 liimiga Soudal Pro 40P. Halli lepa nõrgim tulemus oli töötlusastmel 8 liimiga Titebond III Ultimate. Töötlusastmetel 5-10 näitas sanglepa puhul head tulemust liim Soudal Pro 45P, moodustades kõikidest PVA liimidest

tugevamad ühendused. Hallil lepal moodustusid kõige tugevamad ühendused töötlusastmetel 4-10 samuti Soudal Pro 45P liimiga, mis oli lisaks PVA liimidele ka töös kasutatud teisest PUR liimist Soudal Pro 40P efektiivsem.

Termiliselt töödeldud puidu liimühenduse tugevuse edasiseks uurimiseks teeb autor ettepaneku viia läbi sarnane analüüs teiste puuliikide puhul, mis võimaldaks omavahel liimühenduse tugevusi võrrelda.

KASUTATUD KIRJANDUS

Boonstra, M. (2008). A two-strage thermal modification of wood. PhD Thesis. Henry Poincaré University-Nancy. France. 297 pp.

Conner, A. H. (2001) Wood: adhesives. – Encyclopedia of materials: science and technology. /Ed. K. H. J. Buschow. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, pp. 9583-9599.

EUR 20609 – COST Action E13 – State-of-the-art report – Volume 1 (2002). /Ed. M. Dunky., T. Pizzi., M. V. Leemput. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 174 pp. https://www.academia.edu/26081244/State_of_the_art_report_Volume_1_Wood_adhesion_and_glued_products (13.04.2023)

EVS-EN 14080:2013 (2013). Puitkonstruktsioonid. Lamell-liimpuit ja plankliimpuit. Nõuded. Euroopa standard.

Frihart, C. R. (2015). Introduction to Special Issue: Wood Adhesives: Past, Present, and Future. – *Forest Products Journal*. Vol.65 (1-2), pp. 4-8.

Frihart, C. R., Hunt, C. G. (2010) Adhesives with Wood Materials Bond Formation and Performance – Wood handbook: wood as an engineering material. /Ed. R. J. Ross. Madison, Wisconsin: USDA Forest Service, pp. 228-251.

Gérardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood – a review. *Annals of Forest Science*. Volume 73, pp 559-570. [*on-line*] https://link.springer.com/article/10.1007/s13595-015-0531-4 (02.05.2013).

Gibbs, N. (2005). The Wood Handbook. The United Kingdom: Quatro publishing plc. 256 pp.

Hill, C. A. S. (2006). Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Chichester: John Wiley & Sons, 239 p.

Kööts, R. (2019) Termilise töötlemise mõju lepapuidu pinnaomadustele. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 69 lk.

Laas, E. (2019). Dendroloogia ja pargindus. Tartu: Atlex. 640 lk.

Militz, H. (2002). Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art. *Proceedings of Conference on "Enhancing the durability of lumber and engineered wood products".* Kissimmee, Orlando, 19 pp. [on-line] https://www.thermotreatedwood.com/_files/ugd/76a2e2_3f1b5723a1b34104bda06a0fcbf2a906.pdf (21.04.2023).

Mitchell, P. H. (1987). Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen. – Wood and Fiber Science 20, pp 320-335.

Pizzi, A., Mittal, K. L. (2010). Wood Adhesives. Florida: CRC Press, 451 pp.

Podgorski, L., Chevet, B., Onic, L., Merlin, A. (2000). Modification of wood wettability by plasma and corona treatments. – International Journal of Adhesion and Adhesives. Amsterdam: Elsevier Science Ltd. Vol. 20 (2), pp. 103-111.

Sandberg, D., Kutnar, A. (2016). Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America. – Wood and Fiber Science 48, pp. 28-39.

Selbo, M. L. (1975). Adhesive bonding of wood. Washington, D. C.: U.S. Government Printing Office, 122 pp.

Sernek, M. 2002. Comparative Analysis of Inactivated Wood Surfaces. PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. USA, 193 pp.

Sernek, M., Boonstra, M., Pizzi, A., Despres, A., Gèrardin, P. (2008). Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives. – *Holz Roh Werkst.* Vol. 66, pp. 173-180.

Shi, J. L., Kocaefe, D., Zhang, J. (2007). Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. – *Holz Roh Werkst.* Vol 65, pp. 255-259

Zhou, X., Du, G. (2020). Applications of Tannin Resin Adhesives in the Wood Industry. – Tannins. /Ed. A. Aires. London: Intechopen, 19 pp.

The Community Research and Dedvelopment Information Service (s.a). Wood adhesion and glued products [veebileht] https://cordis.europa.eu/project/id/E13 (16.04.2023)

Vick, C. B. (1999). Adhesive bonding of wood materials. – Wood handbook: Wood as an engineering material. /Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin: USDA Forest Service, pp. 178-200.

Wikberg, H. (2004). Advanced Solid State NMR Spectroscopic Techniques in the Study of Thermally Modified Wood. Helsinki: Helsingin yliopisto, 40 pp.

Ülker, O. (2016). Wood Adhesives and Bonding Theory. – Adhesives: Applications and Properties /Ed. A. Rudawska. London: Intechopen, pp. 271-288.

Xie, Y-J., Liu, Y-X., Sun, Y-X. (2002). Heat-treated wood and its development in Europe – Journal of Forestry Research. Vol 13 (3), pp 224-230.

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Marko Remmelgas,

Sünniaeg 28.09.1994,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
Termotöödeldud lepapuidu liimühenduse tugevus,

mille juhendaja on Regino Kask,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)