



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

**KASE, HAAVA, SANGLEPA JA HALLI LEPA
PINNAOMADUSTE MÕJU LIIMÜHENDUSE
TUGEVUSELE**

**THE EFFECT OF SURFACE PROPERTIES ON
BOND STRENGTH OF BIRCH, ASPEN, BLACK ALDER
AND GREY ALDER**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Marja Mäetalu

Üliõpilaskood: 178938EANB

Juhendaja: teadur Anti Rohumaa, PhD

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Marja Mäetalu (sünnikuupäev: 06.05.1998)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kase, haava, sanglepa ja halli lepa pinnaomaduste mõju liimühenduse tugevusele“, mille juhendaja on Anti Rohumaa,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

04.06.2020 (kuupäev)

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Marja Mäetalu, 178938EANB

Õppekava, peeriala: EANB16/17 - Materjalitehnoloogia

Juhendaja(d): Anti Rohumaa, Teadur, Tallinna Tehnikaülikool, Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kase, haava, sanglepa ja halli lepa pinnaomaduste mõju liimühenduse tugevusele

(inglise keeles) The effect of surface properties on bond strength of birch, aspen, black alder and grey alder

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida spooni pinnaomaduste mõju liimühenduse tugevusele analüüsidest tulemusi nii puuliikide võrdluses kui ka liigisiselt.
2. Võrrelda vähekasutatud puuliikide omadusi kasepuidu omadega.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Koostada kirjanduse ülevaade uuritavatest puuliikidest, pinnaomadustest ning nende mõjust liimühendusele	28.02.20
2.	Töö praktiline osa – spoonide valmistamine, pinnaomaduste uurimine ja liimühenduste katsetamine	31.03.30
3.	Katsetulemuste analüüsimine ja järelduste tegemine	30.04.20

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 04.06.2020

Üliõpilane: Marja Mäetalu "....."..... 2020 a
/allkiri/

Juhendaja: Anti Rohumaa "....."..... 2020 a
/allkiri/

Programmijuht: Tiia Plamus "....."..... 2020 a
/allkiri/

AVALDUS

Palun piirata ligipääs minu bakalaureusetööle teemal „Kase, haava, sanglepa ja halli lepa pinnaomaduste mõju liimühenduse tugevusele“ ja mitte avalikustada seda TalTech digikogus, kuna töö sisaldab veel avaldamata materjale. Materjalid avalikustatakse 31.05.2025, peale mida võib töö avalikustada.

Lugupidamisega

Marja Mäetalu

20.05.2020

Kooskõlastatud:

Anti Rohumaa

Kooskõlastatud:

Dekaan/ prodekaan

Kooskõlastatud:

Kaitsmiskomisjoni esimees

SISUKORD

EESSÕNA	8
SISSEJUHATUS	9
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
1.1 Ülevaade uuritavatest puuliikidest.....	10
1.1.1 Kask	10
1.1.2 Sanglepp.....	10
1.1.3 Hall lepp	11
1.1.4 Haab	11
1.2 Pinnaomadused	12
1.2.1 Pinnakaredus	12
1.2.2 Märgevus	14
1.3 Liimühendused	16
1.3.1 Adhesioon	17
1.3.2 Pinnaomaduste mõju puidu liimitavusele	18
1.3.3 Liimühenduse kvaliteedi hindamine	20
2. MATERJALID JA METOODIKA	22
2.1 Katsekehad	22
2.1.1 Spooni treimine.....	22
2.1.2 Katsekehade valmistamine	22
2.2 Pinnaomadused	23
2.2.1 Pinnakaredus	24
2.2.2 Märgevus	24
2.3 Liimühendused	25
2.3.1 Liimühenduste moodustamine.....	25
2.3.2 Liimühenduse nihketugevus.....	27
2.4 Andmete analüüs.....	28
3. TULEMUSED JA ANALÜÜS	29
3.1 Pinnakaredus	29
3.1.1 Pinnakaredus puuliikide võrdluses	29
3.1.2 Pinnakaredus puuliigi siseselt.....	30
3.2 Märgevus.....	31
3.2.1 Märgevus puuliikide võrdluses	32
3.2.2 Märgevus puuliigi siseselt.....	32
3.2.3 Pinnakareduse mõju kontaktnurgale	33
3.3 Liimühendused	34
3.3.1 Liimühenduse tugevus puuliikide võrdluses.....	34

3.3.2 Liimühendused puuliigi siseselt	36
3.3.3 Pinnaomaduste mõju liimühenduse tugevusele.....	37
KOKKUVÕTE	40
SUMMARY.....	41
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	42
LISAD	47
Lisa 1 Keskmise pinnakaredus puuliigi siseselt	48

EESSÕNA

Lõputöö lõplik teema sõnastati Tallinna Tehnikaülikooli Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituudi teaduri Anti Rohumaa poolt, kes ka juhendas tööd. Töö katseline osa viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Puidutehnoloogia laboris. Teema taustast ettekujutuse saamiseks ning saadud tulemuste selgitamiseks kasutatud allikad on viidatud kirjanduse loetelus.

Uurimistööd on finantseerinud Eesti Teadusagentuur (PRG820 ja Mobilias Plus MOBTP123).

Soovin tänada Anti Rohumaad lõputöö juhendamise, tähelepanekute ning soovitude eest. Lisaks läheb eriline tänu teadur Heikko Kallakasele, kes oli suureks toeks töö katselise osa teostamisel, ning ka teistele jooksvate praktiliste küsimustega aidanud Puidutehnoloogia labori töötajatele.

Lõputöö eesmärk oli uurida spooni pinnakareduse ja märguvuse mõju liimühenduse tugevusele ning analüüsida tulemusi erinevate puuliikide võrdluses. Uuritavateks liikideks olid kask, haab, hall lepp ja sanglepp. Neist viimased kolm on kase kõrval üldiselt kehvemate omadustega ning seetõttu ka spoonitööstuses vähem kasutatud.

Uuritavatest puuliikidest treiti spoonid, millest valmistatud katsekehadel mõõdeti pinnakaredus ning märguvuse hindamiseks kontaktnurk tilgameetodil. Liimühendused moodustati ja testiti ABES meetodi eeskujul nii sama kui ka erinevate liikide kombinatsioonide vahel. Saadud andmeid analüüsiti puuliikide võrdluses ning liigisiselt. Pinnaomaduste puhul joonistusi puuliikide võrdluses välja erinevused. Nende mõju liimühenduse tugevusele hinnates tehtud järeldused viitavad, et liimühendus on keerukas süsteem, milles mängib rolli mitmete muutujate koosmõju või omavaheline tasakaal. Saadud tulemused võivad olla kasulikeks lähteandmeteks haava, sanglepa ja halli lepa puitpolümeerkomposiitide arendamisel.

Võtmesõnad: pinnakaredus, märguvus, pinnaomadused, liimühenduse tugevus, bakalaureusetöö.

SISSEJUHATUS

Liimitud toodete ja inseneripuidu osakaal puidutööstuses kasvab ning suund on odavamata toormaterjali kasutamisele, seejuures kvaliteedi ja omaduste poolest järelandmisi tegemata. Paremate omadustega komposiitide saamiseks on oluline mõista liite kvaliteeti mõjutavaid tegureid. Liimühendus on keeruline süsteem, mille iseloom sõltub mitmetest muutujatest – sideme loomisel mängivad rolli nii keemilised kui ka füüsilised näitajad ja nende koosmõju. Adhesiooni puhul on tegemist pinnanähtusega, seega on liimliite moodustumisel oluline pindade olemus. Antud töös keskendutakse pinnaomadustest karedusele ja märguvusele, mida on peetud adhesiooni puhul määravateks.

Teemat on varasemalt erinevatest vaatenurkadest uuritud, kuid kuna puit on keerukas ja mittehomogeenne substraat, mille omadused puuliigiti varieeruvad, siis on üldistuste tegemine keeruline.

Lõputöö põhieesmärgiks on uurida spooni pinnaomaduste mõju liimühenduse tugevusele ning analüüsida tulemusi puuliikide võrdluses. Soovitakse näha, kas ja mil määral on pinnakaredus ja märguvus seotud liimühenduse kvaliteediga ning millised erinevused või seaduspärasused esinevad erinevate puuliikide vahel aga ka sama liigi siseselt.

Eestis on puitpolümeerkomposiitide valmistamisel kasutusel peamiselt kasepuit. Madalama kvaliteediga ning odavamad puuliigid nagu sanglepp, hall lepp ja haab leiavad aga vähe kasutust. Eelnevalt nimetatud puuliikide kasutamist komposiitmaterjalides piiravad nende kehvemad mehaanilised omadused. Käesoleva töö eesmärgiks on uurida haava, sanglepa ja halli lepa omadusi võrreldes kasega, et hinnata nende võimalusi tööstuses kasutamiseks.

Käesolev lõputöö koosneb kolmest peatükist. Esimeses avatakse kirjandusele tuginedes teema teoreetilist tausta uuritavatest puuliikidest, puidu pinnakareduse ja märguvuse olemusest ning liimühenduse moodustumisest ja pinnaomaduste mõjust sellele. Metoodika peatükis antakse ülevaade töö eesmärgi saavutamiseks vajaliku praktilise osa läbiviimisest, kirjeldatakse materjali ettevalmistust ning kasutatud katsemeetodeid. Kolmandas, tulemuste ja järelduste, osas analüüsitakse saadud andmeid nii puuliikide võrdluses kui ka liigisiselt ning hinnatakse pinnakareduse ja märguvuse mõju ulatust liimühenduse tugevusele.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Ülevaade uuritavatest puuliikidest

1.1.1 Kask

Kask (*Betula pendula* Roth) on hajulisooneline lehtpuu, mida kasvab Euroopas ja Edela-Aasias (The Wood Database, 2019c). Eesti metsatagavarast moodustas kask 2018. aasta seisuga ligikaudu 21% (Raudsaar *et al.* 2019).

Kasepuidu värvus on valkjas või kreemikas, tekstuur on tihe ja ühtlane ning pind hea läikega (Tallnerk Grupp, 2019). Puidukiud on umbes 1 mm pikkused. Keemilise koostise poolest on kasepuidu tselluloosisisaldus ligikaudu 50%, hemitselluloosi ~25% ning ligniini on ~23% (Heräjärvi, 2005).

Kasepuit on suhteliselt hästi töödeldav, viimistletav ja liimitav (The Wood Database, 2019c). Puit kuivab kiiresti, kuid omab soodumust kaardumisele (Tallnerk Grupp, 2019). Kase keskmine tihedus on 640 kg/m³ (The Wood Database, 2019c). Tihedus varieerub tüve eri osades ehk kasvab ristlõikes seestpoolt väljapoole ning piki tüve ülalt alla. Mehaanilised omadused muutuvad sarnaselt tihedusele. Brinelli kõvadus risti kiudu on keskmiselt 22 MPa, elastsusmoodul piki kiudu 14 Gpa ning purunemismoodul 110 Mpa. (Heräjärvi, 2005)

Kasepuit on spooni valmistamiseks üks levinumaid. Kasutatakse peamiselt kihtpuidu aga ka kastide, liistude ja mööbli tootmiseks. (The Wood Database, 2019c)

1.1.2 Sanglepp

Sanglepp (*Alnus glutinosa* L.) on kiire kasvu ja lühikese elueaga laialt üle Euroopa levinud lehtpuu (Fennessy, 2004). Keskkonnaagentuuri andmetel moodustab sanglepp Eesti metsatagavarast 5,5%.

Sanglepa puidu värvus on kahvatu roosakas-pruun, mis valguse toimel tumeneb. Puit on suhteliselt ebaselgete aastarõngastega ja vähese läikega (Fennessy, 2020). Kiud on mustriit ja välimuselt sarnaselt kasele peened ja ühtlased (The Wood Database, 2019a).

Puit on lihtsasti töödeldav, kuid madala pinnakõvaduse tõttu pehme ning tekivad

kergesti t kkes (The Wood Database, 2019a). Hästi viimistletav, lihvitav ja liimitav (Fennessy, 2004) ning kuna on vedelikele hästi läbitav, siis ka immutamiseks sobiv (Claessens *et al.* 2010). Mehaaniliste omaduste poolest jäab sanglepp kasele alla. Madalate tugevusomaduste tõttu ei sobi rakendustesse, mis nõuavad vastupidavust, näiteks konstruktsioonimaterjaliks (Claessens *et al.* 2010). Sanglepa Keskmine tihedus on 495 kg/m³, Janka kõvadus 2890 N, elastsusmoodul 9 Mpa ning purunemismoodul 75,9 Mpa (The Wood Database, 2019a).

Kasutatakse peamiselt k ttmaterjalina, paberit ostuse toorainena, puitlaastplaatides ning tiseritoodetes (Claessens *et al.* 2010). Ida-Euroopas leiab kasutust kihtpuidu tootmisel (Fennessy, 2004).

1.1.3 Hall lepp

Hall lepp (*Alnus incana L.*) on levinud Kesk- ja Ida-Euroopas, Skandinaavias ja Lääne-Venemaal (Wilson *et al.* 2018). Eesti metsatagavarast moodustab 6,4% (Raudsaar *et al.* 2019).

Puit on punaka tooniga, kuid kahvatum kui sanglepp (Wilson *et al.* 2018). Omadustelt on pehme ja habras, ehituselt sirge kiu ja ühtlase kvaliteediga. On kergesti t deldav, l hestatav ja viimistletav (Puuproffa, 2019b). Tihedus on 500–530 kg/m³ (Wilson *et al.* 2018).

Halli lepa puitu kasutatakse puut os muusikainstrumentide ja dekoratiivesemete valmistamiseks, samuti k ttmaterjalina (Puuproffa, 2019b).

1.1.4 Haab

Haab (*Populus tremula L.*) kasvab Euroopas ning Aasias (The Wood Database, 2019b), Eesti metsatagavarast moodustab 8,7% (Raudsaar *et al.* 2019).

Haava puit on heleda tooniga ning pehme (Puuproffa, 2019a). Puus u on tavaliselt sirge, ühtlase keskmise tekstuuriga ning vähese l ikega (The Wood Database, 2019b).

Haava t deldavus on hea, kuid kasutada tuleb hästi teritatud l ikeriistu, et vältida karvast pinda. Puit ei ole kergesti l hestatav ning kuivatamisel kipub deformeeruma. Liimitavus ning viimistletavus on head. Haavapuidu tihedus on 450 kg/m³. Mehaanilistest omadustest on Janka kõvadus 1650 N, elastsusmoodul 9,75 MPa ning purunemismoodul 62 MPa (The Wood Database, 2019b).

Kasutatakse kastiliistude, kihtpuidu (The Wood Database, 2019b), aialippide, seinakatete ja tarbeesemete valmistamiseks ning paberitööstuse toorainena (Puuproffa, 2019a).

1.2 Pinnaomadused

Pinnaomadused võib jagada kolme kategooriasse: 1) puitaine omadused, ehk anatoomilised ja keemilised omadused; 2) töödeldud pinna struktuurilised omadused, mis sõltuvad töötlemise parameetritest; 3) mitte-ehituslikud omadused, mille hulka kuuluvad pinnakeemia ja füüsikalised omadused nagu pinnaenergia ja optilised omadused. (Sinn *et al.* 2009)

Puidu pinnaomadused on toormaterjali ja mehaanilise töötlemise vastastikmõju tulemus (Sinn *et al.* 2009) ning on määratud puidu anatoomiliste, keemiliste ning mehaaniliste näitajatega. Puidu ja selle kiudude keerulise struktuuri ning erinevate puuliikide rohkuse tõttu on raske teha pinnaomaduste suhtes üldistusi. (Gardner *et al.* 2016)

Puidu mitte-ehituslikud omadused nagu pinnakeemia ning pinnaenergia on ajast sõltuvad, sest pind, olles pidevas vastastikmõjus seda ümbritseva keskkonnaga, inaktiveerub ehk jõuab madala energiaga olekusse. (Sinn *et al.* 2009)

Kuna käesoleva töö eesmärgiks on uurida erinevate puuliikide liimitavust, on järgnevalt antud ülevaade just puidu adhesiooni enam mõjutavatest pinnaomadustest, milleks on pinnakaredus ning märguvus.

1.2.1 Pinnakaredus

Pinnakaredus iseloomustab peeneid ebakorrapärasusi töödeldud pinnal ning seda hinnatakse pinna ebatasasuste kõrguse, laiuse või kuju määramisega (Magoss, 2008).

Poorse struktuuri tõttu ei saa puidu pind olla kunagi ideaalselt sile (Sandak *et al.* 2005). Puidu pinnakaredus ulatub mikronist kuni millimeetri skaalani. Mikronites on mõõdetav puidu naturaalsest poorsest struktuurist ehk rakulisest ehitusest tulenev karedus. Suuremaskaalaline karedus on põhjustatud puidu töötlemismeetoditest. Näiteks spooni puhul võivad selleks olla treimisel tekkivad lõhed (*lathe checks*). (Gardner *et al.* 2016)

Pinnakvaliteedi määravad nii puidu omadused kui ka selle töötlemiseks kasutatud meetodid ja nende parameetrid. Mehaanilisel töötlemisel tekkinud pinnakareduse

peamine põhjus on materjali habras purunemine. Isegi täiusliku töötlemise korral tekib puidu poorse struktuuri avamise tõttu kare pind (Csanády *et al.* 2013). Pinnakaredus oleneb õõnsuste paiknemisest saadud pinna suhtes (Sandak *et al.* 2005).

Puidu omadustest sõltub karedus puuliigist ja tihedusest ehk laiemalt anotoomilisest ehitusest nagu rakuõõnte suurus ning soonte läbimõõt ja jaotus (Magoss, 2008). Mida suurem on puidu tihedus, seda siledam jääb pind. Üks võimalik pinnakareduse mõjutaja puidu anatoomia vaatepunktist on tühimike suurus. Suurte rakuõõnte ning soontega puit jätab pärast mehaanilist töötlemist avatud poorse tekstuuri, mis omakorda tähendab suuremat pinnakaredust (Alia-Syahirah *et al.* 2019). Tihedama ja ühtlasema tekstuuriga puidu pind on siledam. Tekstuurilt ühtlasemad on tavaliselt peente ning hajuli paiknevate soontega lehtpuud. (Thoma *et al.* 2014)

Samuti omab mõju niiskusesisaldus. Puit kui hügrokoopne materjal püüab säilitada tasakaalu niiskusesisalduse ning keskkonna õhuniiskuse vahel. Ka väikesed muutused puidu niiskusesisalduses mõjutavad pinna geomeetriat ning sellest tulenevalt ka karedust ning tasapinnalisust. (Sandak *et al.* 2005)

Pinnakareduse hindamiseks kasutatakse nii kontaktseid kui ka kontaktivabu meetodeid (Sinn *et al.* 2009). Levinumad on puute- ning optilised tehnoloogiad. Puutega mõõdetakse kõrguse jaotust piki joont, optiline hindamine keskendub rohkem kogu pinnale, määrates struktuuriosade tüübi ja jaotuse (Sandak *et al.* 2005). Pinnakareduse hindamiseks on erinevaid vahendeid: nõelpliats, optiline profilomeeter, pildianalüüsi tehnoloogiad videokaamera abil, pneumaatilised ja ultraheli meetodid ning mikroskoopia (Kilic *et al.* 2006).

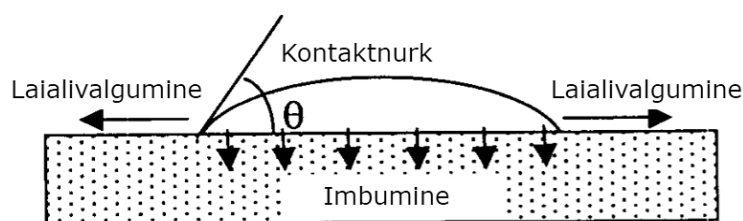
Kõige levinum viis kareduse mõõtmiseks on nõelkombitsaga (*stylus*) meetod. Antud meetod võimaldab ainult kahemõõtmelist hindamist, mis osutub anisotroopsete pindade hindamisel piiranguks. Korruga skaneeritakse üheteljeliselt ühte pinna sektsiooni, mõõtes anduri ja pinna vahelist kaugust. Andurit pinna suhtes liigutades saab uurida 2D-profiili. (Sandak *et al.* 2005)

Pole olemas karedusparameetrit, millega saaks iseloomustada pinda üheselt mõistetavalt, seetõttu on kasutusel mitmed parameetrid. Parameetrid on nende järjepidevaks tõlgendamiseks standardiseeritud (Csanády *et al.* 2013). Puidu anatoomilisest ehitusest ja mehaanilisest töötlemisest tulenevat karedust on raske eristada. Selle tõttu esineb pinnakareduse mõõtmisel suur mõõtemääramatus (Sandak *et al.* 2005).

Tavaliselt kasutatavad parameetrid on R_a , R_z ja R_{max} (Magoss, 2008). R_a on karedusväärtuse aritmeetiline keskmine, R_z keskmine kareduse sügavus ning R_{max} kareduse profiili maksimaalne sügavus (EVS-EN ISO 4287:1999).

1.2.2 Märguvus

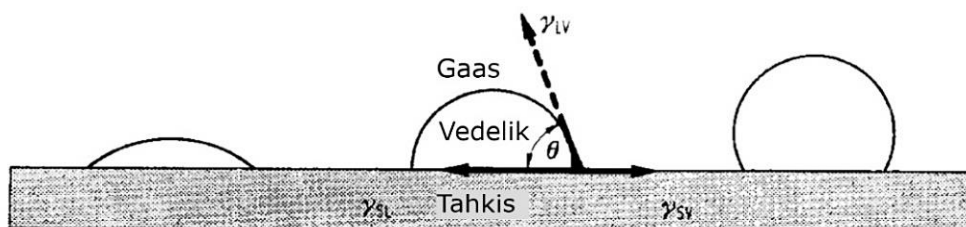
Kui vedeliku ja tahkise pinna vahel saavutatakse piisavalt lähedane kontakt, siis tekib nende aatomite vahel füüsikaline vastastikmõju, mille tulemuseks on märgumine (Baldan, 2012). Materjali pinna märgumisel esineb kolm nähtust: 1) kontaktnurga moodustumine tahkise, vedeliku ja gaasi piirpinnale, 2) vedeliku laialivalgumine pinnale ning 3) vedeliku tungimine tahkise pooridesse (joonis 1.1). Vedeliku laialivalgumise ning pinna sisse imbumise tõttu muutub kontaktnurk ajast sõltuvalt. (Wålander, 2000)



Joonis 1.1 Poorse materjali pinna märgumine (Shi & Gardner, 2001)

Puidu hügrokoopse olemuse tõttu võib toimuda märgumisel ka vedeliku sorptsioon ja seeläbi materjali pundumine (Moghaddam, 2015). Puidu hüdrofiilsuse ja hügrokoopseuse peamiseks põhjuseks on kõigil kolmel rakuseina peamisel komponendil esinevad vabad hüdroksüülrühmad, mis kokkupuutel polaarsete vedelikega on võimelised looma vesiniksidemeid. Ligniin on võrreldes tselluloosi ning hemitselluloosiga vähem hüdrofiilne (Piao *et al.* 2010). Puidu pinna suhteliselt suur polaarsus võimaldab sellel kasutada veepõhiseid liime (Frihart, 2005).

Märguvuse iseloomustamiseks saab kasutada termodünaamilisi näitajaid, näiteks kontaktnurka, mis kirjeldab vedeliku afiinsust tahkise suhtes (Collett, 1972).



Joonis 1.2 Tilk siledal tahkel pinnal (Collett, 1972)

Siledal pinnal asetseva tilga kuju sõltub tahkise ja vedeliku pinnaenergiatest (joonis 1.2). Olukorda, kus veetilk asetseb siledal horisontaalsel pinnal kirjeldatakse Young'i võrrandiga (valem 1.1).

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta, \quad (1.1)$$

kus γ_{SG} – tahke ja gaasilise faasi vaheline pinnaenergia,
 γ_{SL} – tahke ja vedela faasi vaheline pinnaenergia,
 γ_{LG} – vedela ja gaasilise faasi vaheline pinnaenergia,
 θ – kontaktnurk.

Märguvuse ulatus sõltub pinna ning vedeliku pinnaenergiate vahest. Vedelikud, mille pinnaenergia on väiksem uuritava pinna omast, märgavad seda efektiivselt. (Baldan, 2012)

Tuleb meeles pidada, et Young'i võrrand on täpne ainult ideaalselt sileda ja homogeense pinna puhul, mida puit aga pole. Siiski kasutatakse seda lihtsuse ning alternatiivide puudumise tõttu. (Sinn *et al.* 2009)

Märguvus sõltub nii puitmaterjalist kui selle töötlemisest. Piao *et al.* (2010) on kokku võtnud puidu märguvust mõjutavad tegurid, milleks on puuliik; makrostruktuur (kevad- ja sügispuidu ning malts- ja lülipuidu osakaal, kiusuund pinna suhtes); mikrostruktuur; füüsikalised (tihedus, niiskusesisaldus) ja keemilised (rakuseina koostis, ekstraktiivained) omadused; töötlemismeetodid; saastumine ja töötlemisel kasutatud kemikaalid. Rolli mängib ka märguvuse uurimiseks kasutatud meetodi ning vedeliku iseloom.

Anatoomiline ehitus, tihedus ning pinnakaredus on kõik üksteisega seotud ning omavad otsest mõju ka märguvusele (Shi & Gardner, 2001). Märguvus sõltub pinnakaredusest ja seeläbi ka puidu tihedusest. Üldjuhul, mida suurem on puidu tihedus, seda siledam pind ning omakorda kehvem märguvus. (Amorim *et al.* 2013; Alia-Syahirah *et al.* 2019)

Puidus sisalduvad ekstraktiivained muudavad pinnaenergiat ning põhjustavad proovivedelike saastumise (Wälinder & Johansson, 2001; Jankowska *et al.* 2018). Märgumatud ekstraktiivained blokeerivad hüdroksüülrühmasid ning põhjustavad pinna inaktiveerumise (Christiansen, 1990). Lisaks avaldab mõju puidu eelnev töötlemine, nagu näiteks kuivatusmeetod (Shupe *et al.* 2001; Wang *et al.* 2007).

Märguvuse hindamiseks on puidu puhul levinumad tilgameetod ja Wilhelmy plaadi meetod (Moghaddam, 2015).

Tilgameetodid (*sessile drop methods*) on oma lihtsuse tõttu kõige laiemalt kasutatavad (Hubbe *et al.* 2015). Tilgameetodil mõõdetakse kontaktnurka vahetult, vaadeldes pinnal asetsevat vedelikutilka. Kontaktnurka võib mõõta goniomeetriga varustatud mikroskoobi abil kindla aja järel peale tilga pinnale tilgutamist (Moghaddam, 2015) või läbi digitaalse pildianalüüsi, milles tilga profiili mõõtmete põhjal arvutatakse kontaktnurk (Wålinder, 2000). Mikrovideograafilised seadmed võimaldavad kiiret märguvuse hindamist, mis vähendab vedeliku absorbeerumisest tekkinud mõju (Hubbe *et al.* 2015).

Puidu märguvuse optilisel hindamisel kontaktnurkade kaudu tekitavad raskusi selle pinnakeemia heterogeensus, pinna poorsus ning karedus ja hügroskoopsus. Pinna struktuur ja kapillaarjõud võivad põhjustada vedelikutilga kiudude suunas mööda pinda laialikandumise (Wålinder, 2000). Tilgaservade kuju võimalike moonutuste tõttu sisaldavad goniomeetriga mõõdetud kontaktnurgad suurt määramatust. Seetõttu on usaldusväärsema tulemuse saamiseks vaja teostada uuritava pinnal mitmeid kordusmõõtmisi (Hubbe *et al.* 2015).

Wilhelmy plaadi meetodil kasutatakse tensiomeetrit, et mõõta jõudu, mida rakendatakse plaadikujulise katsekeha osalisel sukeldamisel vedelikku. Teades vedeliku pindpinevust ning katsekeha ristlõike ümbermõõtu, saab arvutada kontaktnurga (Wålinder & Johansson, 2001). Puidu pinnakareduse, heterogeensususe ning hügroskoopsuse tõttu peetakse Wilhelmy meetodit täpsemaks kui tilgameetodit. Meetod katab korraka suurema pindala, seega on tulemus vähem mõjutatud pinna keemilistest ja ehituslikest ebahomogeensustest (Wålinder & Ström, 2001; Moghaddam, 2015).

1.3 Liimühendused

Liimühendus on mitmete muutujatega süsteem, mille olemus sõltub nii puidu kui ka adhesiivaine omadustest ning protsessi parameetritest. Kokkuvõtvalt on mõned liimühendust mõjutavad tegurid toodud tabelis 1.1.

Tabel 1.1 Liimühendust mõjutavad tegurid (Frihart, 2005)

Puit	Liim	Protsess
Puuliik	Tüüp	Liimi kogus
Tihedus	Viskoossus	Liimi jaotus
Niiskusesisaldus	Molaarmaasiline jaotus	Suhteline niiskus
Pind (radiaalne, tangentsiaalne, ristlõige)	Reagentide moolsuhe	Koostamise aeg (avatud ja suletud)
Lüli- või maltspuit	Kövenemiskiirus	Temperatuur
Kevad või sügispuut	Kuivaine sisaldus	Surve
Juveniilpuut	Katalüsaator	Liimaine imbumine puitu
Reaktsioonpuut	Segamine	Pressimise aeg
Kiu kaldenurk	Täiteained	Eeltöötlus
Poorsus	Lahusti	Järeltöötlus
Pinnakaredus	Vanus	Substraadi temperatuur
Kuivatuskahjustused	pH	
Mehaanilised töötlemiskahjustused		
Ekstraktiivained		
Saasteained		
pH		
Pinnakeemia		

1.3.1 Adhesioon

Adhesioon on olemuselt keerukas füüsikalise-keemiline nähtus. Kuna tegemist on pinnanähtusega, siis sõltub liimühenduse iseloom eelkõige liimitava pinna omadustest ning nende koosmõjust adhesiivainega. Adhesiooni puhul on määravad mitmed tegurid, näiteks liimaine ja liimitava materjali tüüp, pinna eelnev töötlus, liimaine viskoossus ning liimühenduse moodustamise tingimused (Baldan, 2012).

Adhesiooni mõjutavad polümeeri ja pinna vastastikmõjud jagunevad keemilisteks ja mehaanilisteks. Adhesiivaine võib luua puidus läbipõimunud polümeervõrgustiku, reageerida puiduga, ristsillata rakuseina komponendid või kinnitada mehaaniliselt puidu struktuuris leiduvatesse tühimikesse. (Gardner *et al.* 2016)

Pole ühtset adhesioonimehhanismi, mis suudaks kirjeldada kõiki adhesiivseid ühendusi. Välja on pakutud mitmeid teooriaid, mille hulgas on näiteks mehaanilise sidumise (*mechanical interlocking*), adsorptsiooni, difusiooni, kovalentse sidumise ning nõrkade piirkihide (*weak boundary layers*) teooriad (Gardner *et al.* 2016). Kõik teooriad on teatud juhtudel kehtivad, sõltuvalt materjali ning adhesiivaine tüübist. Neis kirjeldatud

mehhanismid võivad kõik panustada adhesioonijõududesse, mis tekivad puidu ning adhesiivi piirpinnal ning nende tegurite mõju olulisus sõltub suuresti valitud süsteemist. (Wälinder, 2000)

Puidu poorse olemuse tõttu on adhesiooni kirjeldamiseks kõige kauem kasutatud mehaanilise sidumise teooriat, mille kohaselt tungib liim puidu rakuõõntesse, rakuseina mikrokapillaaridesse ja pooridesse ning polümeriseerub nendes tekitades mehaanilise sideme. (Gardner *et al.* 2016)

Adsorptsiooniteooria on kõige laiemalt aktsepteeritud mudel. Teooria kirjeldab termodünaamilist adhesiooni pinna ning adhesiivaine vahel, mis tekib nende väga lähedasel kokkupuutel aatomi- või molekulaarsel tasemel. Adhesiooni eelduseks on kokkupuude sidet moodustavate faaside vahel, seega on hea liimühenduse moodustumiseks vajalik maksimaalne efektiivne kontakt liimaine ja liimitava materjali vahel. (Baldan, 2012)

1.3.2 Pinnaomaduste mõju puidu liimitavusele

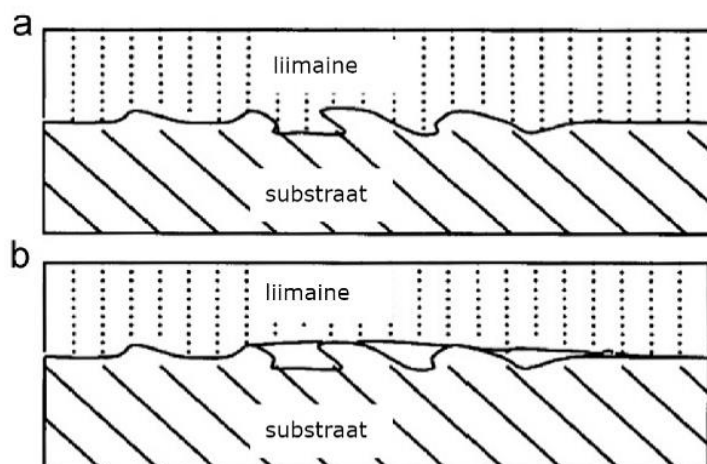
Liimühenduste moodustumisel on olulised nii pinna keemilised kui ka füüsilised omadused ning tihti on nende mõju raske eristada (Baldan, 2012). Pinnaomaduste puhul on leitud erinevaid seoseid liimühenduse kvaliteediga (Christiansen, 1990; Aydin *et al.* 2006; Yorur, 2018).

Pinnakaredus. Adhesiivi ja substraadi vahelise piirpinna geomeetria mõjutab liimühenduse efektiivsust. Jõu rakendamisel peab ühendus kandma pinget üle ühelt komponendilt teisele, pinna geomeetria aga mõjutab tekkivaid pingekontsentraatorite asukohti. (Kamke & Lee, 2007)

Pinnakaredus aitab liimühenduse moodustumisel kaasa mehaaniliste ühenduste tekkimise soodustamisega ning muudab märguvust tänu kapillaarjõududele (Gardner *et al.* 2016). Pinnakareduse tõusuga suureneb kogupindala ja sellest tulenevalt ka ala, millel võivad tekkida molekulidevahelised sidemed (Baldan, 2012).

Pinnakaredus ja poorsus soodustavad adhesiooni, kuid on positiivse mõjuga ainult teatud piirini. Karedus peab olema optimaalne sõltuvalt märguvusest ja kasutatava adhesiivi omadustest. Nagu on kirjeldatud joonisel 1.3, siis pinna märguvus peab olema piisav, et selle ebatasasused täituksid adhesiivainega (Baldan, 2012) ning pinnakaredus peab sobima adhesiivi viskoossusega. Näiteks, on leitud, et viskoossemad vedelikud märgavad paremini siledamat pinda, sest väiksema pinnakareduse tõttu jääb vähem

õhku pinna ning vedeliku vahele lõksu (Gardner *et al.* 2016).



Joonis 1.3 a) Pinna piisav märgumine, b) Pinna kehv märgumine (Baldan, 2012)

Märguvus on hea adhesiooni eelduseks (Scheikl & Dunky, 1998). Kvaliteetse liimühenduse moodustumiseks on vajalik maksimaalne efektiivne kontakt puidu pinna ja liimi vahel ning selle määrab märguvus. (Baldan, 2012)

Liimühenduse kvaliteedi ja pinna märguvuse vahel on leitud et, mida parem on märguvus, ehk madalam kontaktnurk pinna ning adhesiivaine vahel, seda tugevam on tekkiv ühendus (Gardner *et al.* 2016; Yorur, 2018). Kehva märguvuse tulemusel on kokkupuutepind liimaine ning pinna vahel väiksem ja seega ka ühendus nõrgem ning pinge jaotub nende piirpinnal ebaühtlaselt (joonis 1.3) (Baldan, 2012).

Lisaks adsorptsioonile, sõltub märguvusest liimaine imbumine (*adhesive penetration*) pinna pooridesse ning ebakorrapärasustesse (Gardner *et al.* 2015). Imbumine toimub nii mikro- kui ka nanotasandil. Esimese näiteks on rakuõõned ja poorid ning teisel juhul imbibub vaik rakuseina. (Kamke & Lee, 2007)

Liimi puitu imbumisel avaldub vastastikmõju puidu ja vaigu omaduste ning protsessi parameetrite vahel. Puidu omadustest on olulisemad läbitavus (*permeability*) ning pinnaenergia (Kamke & Lee, 2007). Läbitavus erineb nii puiduliikide kui ka kiusuuna suhtes. Erinevused esinevad samuti malts- ja lülipuidu ning kevad- ja sügispuidu vahel. Kevadpuidu suuremad rakuõõned ja suurem karedus põhjustavad kiirema imbumise. Seda näitab ka kiiremini kahanev dünaamiline kontaktnurk kevadpuidu pinnal (Scheikl & Dunky, 1998). Adhesiivi koostise poolelt on mõju selle tüübil, viskoossusel, tahkete ainete sisaldusel, pindpinevusel ning molaarmassilisel jaotusel. Liimühenduse moodustumise tingimustest omavad mõju koostamise ning pressimise aeg, temperatuur ja rõhk. (Kamke & Lee, 2007)

Kuigi suur varieeruvus muudab vaigu puitu imbumise ja liimühenduse efektiivsuse vahel korrelatsiooni leidmise keeruliseks, arvatakse, et sellel on mõju liimühenduse kvaliteedile, mõjutades kõiki adhesioonimehhanisme. Sügavama imbumise puhul on suurem kontaktpindala liimi ning puidu vahel ja sellest tulenevalt ka rohkem alasiidemetekkimiseks. Samuti täidab see praod ning katab kahjustatud rakud, parandades ühenduse tugevust ja vastupidavust ning soodustab ühtlasemat pingete jaotust koormuse all. (Kamke & Lee, 2007)

Optimaalne imbumise sügavus pole teada, kuid peab olema piisav, et katta kahjustatud rakud pinnal. Liigne imbumine aga raiskab liimi ning võib olla negatiivse mõjuga, kui seda liimitavate pindade vahele enam ei jätku. (Kamke & Lee, 2007)

1.3.3 Liimühenduse kvaliteedi hindamine

Liimitud toodete osakaal puidutööstuses kasvab ning liite kvaliteeti mõjutavate tegurite mõistmine on oluline paremate omadustega komposiitide valmistamiseks. Üldiselt on puitu lihtne liimida, kuid keerulisem on vastupidava ühenduse saavutamine. Liimühenduse käitumist on raske ennustada, kuna faasidevahelise piirpinna omadustest teatakse vähem, kui liimaine või substraadi omaduste kohta. (Frihart, 2005)

Liimühenduse tugevust ei saa võrdsustada adhesiooniga. Adhesioon viitab liimi ning substraadi pinna vastastikmõjule, kuid liimliide on keerukam ning seda mõjutavad lisaks erinevad tegurid nagu pingekontsentraatorid ja nõrgad pinnakihid. Seega adhesioon on küll määrav faktor liimühenduse moodustumisel, kuid ei pruugi olla nõrk koht, mis tingib liite purunemise. (Frihart, 2005)

Standardised testmeetodid, nagu Euroopa standard EVS-EN 314-1:2005, hõlmavad liimühenduse kvaliteedi hindamist nii selle nihketugevuse kui ka puidu kohesiivse purunemise protsendi järgi. Valmistatakse vineer, millesse tehakse sisselõiked ühe liimijoone testimiseks. Nihketugevuse määramisele eelnevad leotamise ja kuivatamisega eeltötluse tsüklid. Eeltötluse eesmärgiks on näha liite vastupanu niiskuse muutustele. Võrreldes puiduga, mis sõltuvalt niiskusesisaldusest pundub või kahaneb, enamuse kasutatavaid liime aga ei näita palju dimensionaalseid muutusi. See tekitab ühenduse piirpindadel lisapingeid, mis mõjutavad liimliite vastupidavust. (Wescott *et al.* 2007)

Puidu purunemise protsendi hindamine toimub tavaliselt visuaalselt, seega on tulemused subjektiivsed ja sõltuvad hindajast. Raske on määrata, kas liimühendus lagunes liimi, liimi ja puidu piirpinna või puidu purunemise tõttu (Rohumaa, 2016).

Laboratoorses uuringutes kasutatakse katsekehadena sirge kiuga ning defektideta tangentsiaalseid pindasid, reaalses tootmises aga pole tegurid nii kontrollitud (Frihart, 2005).

ABES meetod on uuem vahend liimühenduse tugevuse testimiseks. Automatiseeritud liimumise hindamise süsteem ABES (*Automated Bonding Evaluation System*) näol on tegemist seadmega, mis võimaldab luua väikese ülekattega liimühendusi kindlal pressimise temperatuuril, rõhul ja ajal. Lisaks saab samas seadmes koheselt teostada ka liite nihketugevuse mõõtmise. Süsteemi saab kasutada erinevate substraatide ning adhesiivainete omaduste ja liidete kujunemise uurimiseks kontrollitud tingimustel (Adhesive Evaluation Systems, 2014). Meetod on kinnitatud ASTM D7998-19 standardiga.

Uuringud on näidanud, et ABES testi tulemuste ja plaatmaterjali omaduste vahel on tugev seos (Huang & Feng, 2018). Antud meetod on vähem aja- ning materjalikulukas kui traditsioonilised standardsed kihtpuidu testid. See-eest on ABES-i kasutamist liimitööstuses käsitletud siiski ettevaatlikult, kuna testide tulemused võivad ootamatult varieeruda ja on leitud probleeme korratavusega. (Rohumaa, 2016)

2. MATERJALID JA METOODIKA

2.1 Katsekehad

Pinnaomaduste ning liimühenduse tugevuse seose uurimiseks võeti võrdluseks neli puuliiki: kask, haab, sanglepp ja hall lepp. Usaldusväärsemate tulemuste saamiseks koguti katsekehasid iga puuliigi puhul kolmest palgist, kuna ka sama puuliigi korral võivad omadused erinevate puude lõikes varieeruda.

2.1.1 Spooni treimine

Spoon treimisele eelnevalt leotati pakke vähemalt 24 tundi vees 40°C juures. Enne treimist mõõdeti paku niiskusesisaldus elektrilise mõõturiga ning temperatuur infrapuna-termomeetriga. Mõõtmiste andmed on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Treimiste andmed

Kuupäev	Pakk	Temperatuur	Niiskus	Märkused
12.12.19	Hall lepp 1	29,5	73	
12.12.19	Kask 1	-	-	
13.12.19	Hall lepp 2	28,5	67	
13.12.19	Kask 2	28,5	62	
17.12.19	Kask 3	28,3	65	
10.01.20	Hall lepp 3	30,5	71,7	
04.02.20	Sanglepp 1	-	-	
11.02.20	Sanglepp 2	31	60,6	
28.02.20	Sanglepp 3	31	75,7	Spoon paksus 1 mm
03.04.20	Haab 1	31	-	
03.04.20	Haab 2	24,5	-	

Spoon treiti Raute treipingil. Treitud spoon lõigati spooniljotiini abil lehtedeks mõõtmetega 950 x 450 mm. Järgnevalt saadud spoonilehed kuivatati spoonikuivatis, et saavutada niiskus 4±2%. Kuivatamine toimus temperatuurivahemikus 165–175°C.

2.1.2 Katsekehade valmistamine

Järgnevate katsetuste jaoks valmistati katsekehad mõõtmetega 120 x 20 mm. Selleks valiti mõned spoonilehed spoonilindi algusest, keskelt ning lõpust ehk paku suhtes selle välimisest, keskmisest ja sisemisest osast (hiljem tähistatakse vastavalt A, B ja C).

Kuivatatud spoonilehtedest lõigati spooniljotiiniga 120 mm pikkused ribad. Järgnevalt hakiti need käsijotiiniga 20 mm laiusteks tükkideks (joonis 2.1). Valiti välja visuaalselt ühtlased, defektideta ning sirge kiuga tükid. Igast grupist võeti 10 katsekeha, ehk kõigist pakkudest A, B ja C kohta 10 tükki.



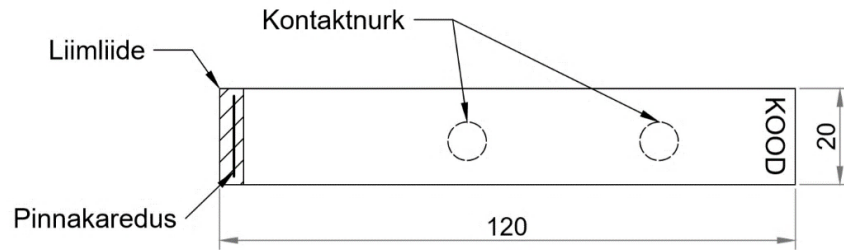
Joonis 2.1 Käsijotiiniga katsekehade lõikamine

Katsekehad tähistati koodiga, millest kajastub selle puuliik, paku number, katsekeha asukoht pakust (A, B või C) ning katsekeha number antud grupis. Näiteks kood K2.A5 viitab kasepaku number 2 spoonilindi algusest võetud viiendale katsekehale.

Enne kõigi katsetuste läbiviimist hoiti katsekehi kliimakapis 20°C ja 20% suhtelise niiskuse juures, kuni konstantse massi saavutamiseni. Puidu niiskus sellistel tingimustel peaks olema ligikaudu 4%.

2.2 Pinnaomadused

Pinnaomaduste uurimiseks valiti spooni pealmine pool, et vältida treimislõhede mõju antud omadustele. Mõõtmised viidi läbi vastavalt skeemile joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Katsekeha ning sellel teostatud mõõtmiste skeem

2.2.1 Pinnakaredus

Pinnakaredus mõõdeti seadmega Mitutoyo Surftest SJ-210 (Joonis 2.5). Mõõtmine tehti spooni pealmisel poolel kiusuunaga risti samas katsekeha otsas, millega oli plaanis luua liimliide, et saada antud pinna profiil (joonis 2.3).

Mõõtmisel oli proovivõtu pikkus 2,5 mm ning mõõteala pikkus 12,5 mm (EVS-EN ISO 4288:1999). Mõõdeti suurused R_a , R_z ning R_{max} .

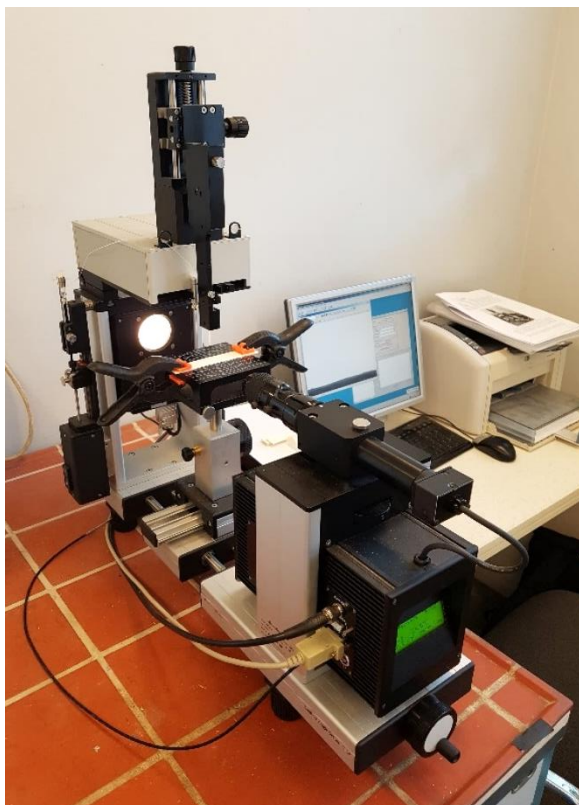


Joonis 2.3 Pinnakareduse mõõtmine

2.2.2 Märguvus

Märguvuse iseloomustamiseks mõõdeti tilgameetodil kontaktnurk kasutades seadet Data Physics OCA 20 (joonis 2.4). Igal katsekehal mõõdeti kontaktnurk piki kiudu kahest kohast (joonis 2.2).

Katsekeha kinnitati klambritega alusele, süstlast tilgutati tilk destilleeritud vett uuritavale pinnale ja programm arvutas videopildi põhjal kontaktnurga. Kontaktnurga muutumist vaadeldi 40 sekundi jooksul. Programm oli seadistatud kontaktnurki arvutama eksponentsiaalselt väheneva sagedusega nii, et alates tilga spooni pinnale langemisest esimesel sekundil teostati 5 mõõtmist sekundis, kuni lõpuks korra sekundis. Kokku teostas 100 mõõtmist erinevatel ajahetkedel.



Joonis 2.4 Kontaktnurga mõõtmine seadmega Data Physics OCA 20

2.3 Liimühendused

2.3.1 Liimühenduste moodustamine

Kasutati väikese ülekattega liimühendusi ABES meetodi eeskujul (ASTM D7998 - 19). Katsekehade vahel moodustati paarikaupa liimühendused vastavalt erinevate puuliikide kombinatsioonide tabelile (tabel 2.2).

Tabel 2.2 Puuliikide kombinatsioonid

Puuliik	Kask	Sanglepp	Hall lepp	Haab
Kask	Kask			
Sanglepp	Kask + sanglepp	Sanglepp		
Hall lepp	Kask + hall lepp	Sanglepp + hall lepp	Hall lepp	
Haab	Kask + haab	Sanglepp + haab	Hall lepp + haab	Haab

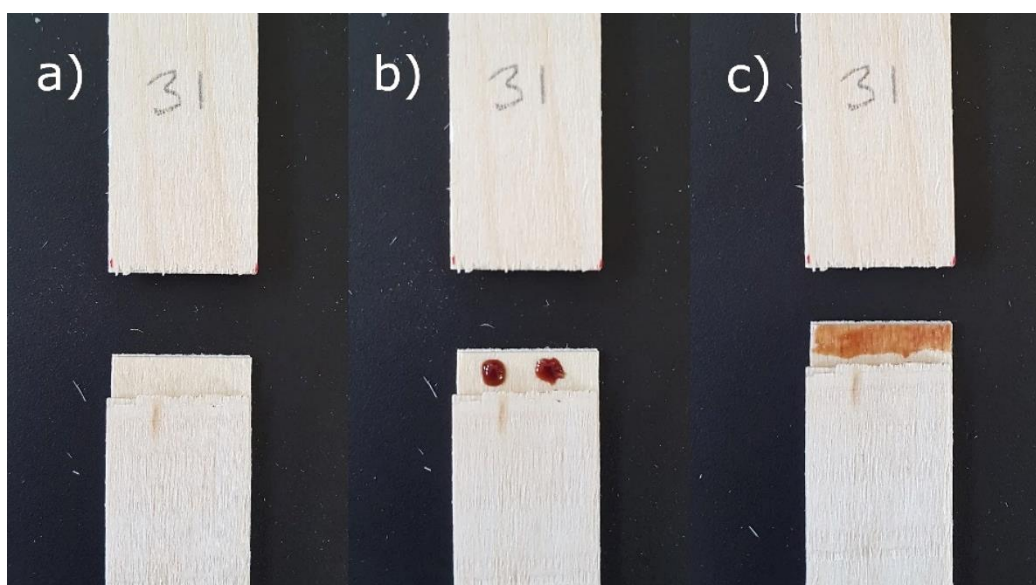
Liimühenduste moodustamiseks kasutati fenool-formaldehüüdlimi koostisega 68% vaik (Prefere 14J021), 14% kõvendi (Prefere 24J662) ning 18% vesi.

20 x 5 mm ülekatte saavutamiseks kinnitati iga katsekeha külge 5 mm kaugusele selle otsast abitükk (joonis 2.5), mis aitas tagada liimi sattumise ainult soovitud alale ning vältida nihkumist pressimise ajal.



Joonis 2.5 Katsekehad koos abitükkidega

Katsekehade paarist ühele kanti mikropipeti abil liim kahe 6,3 μ l suuruse tilgana (joonis 2.6 b) ning määrati laiali katsekehade otsasid omavahel kokku hõõrudes (joonis 2.6 c). Seejärel hoiti katsekehasid mõne sekundi vältel koos ning asetati pressimisplaadile (joonis 2.7).



Joonis 2.6 Liimi kandmine katsekehadele



Joonis 2.7 Katsekehad pressimisplaadil

Liimi kogus kõigi ühenduste puhul oli 150 g/m^2 . Liimühendused pressiti rõhul $1,8 \text{ MPa}$ kasutades Carver kuumpressi. Pressiti temperatuuril 130°C 6 minutit, lähtudes valemist $3 \text{ min} + 1 \text{ min}$ iga 1 mm spooni paksuse kohta.

2.3.2 Liimühenduse nihketugevus

Liimühenduste nihketugevuse määramiseks viidi läbi tõmbekatsed seadmega Instron 1122 (joonis 2.8). Kiirus tõmbekatsel oli 2 mm/min vastavalt standardile EVS-EN 314-1:2005.



Joonis 2.8 Liimliite tõmbekatse

Purunemisel rakendatud jõu ning ülekatte pindala põhjal arvutati ühenduse nihketugevus valemiga 2.1.

$$f_v = \frac{F}{l_1 \times b_1} \quad (2.1)$$

kus f_v – nihketugevus, MPa,

F – jõud, N,

l_1 – ülekatte pikkus, mm²,

b_1 – ülekatte laius, mm².

2.4 Andmete analüüs

Erinevate rühmade keskmiste erinevuse olulisust hinnati dispersioonanalüüsi (ANOVA) abil. Keskmiste erinevused eraldati ja võrreldi Tukey testiga ($P < 0,05$). Lineaarsed korrelatsioonid määrati Pearsoni standardmeetodi põhjal.

3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Eelnevas peatükis kirjeldatud katsetuste eesmärgiks oli kase, haava, sanglepa ning halli lepa pinnakareduse, märguvuse ja liimitavuse kohta teabe saamine. Seejärel oli ülesandeks analüüsida tulemusi nii liigisiselt kui ka puuliikide võrdluses ning uurida, kas ja mil määral on vaadeldud pinnaomadustel seos liimühenduse tugevusega.

3.1 Pinnakaredus

Liimitava pinna paremaks iseloomustamiseks mõõdeti spooni pinnakaredus risti kiudu samas katsekeha otsas, millega loodi hiljem liimühendus.

Mõõtmistulemustes joonistusid välja erinevused nii puuliikide võrdluses kui ka sama liigi puhul pakkude vahel.

3.1.1 Pinnakaredus puuliikide võrdluses

Pinnakaredused puuliikide võrdluses on toodud tabelis 3.1. Siledamate pindadega olid kask (11,1 μm) ja sanglepp (13,3 μm), halli lepa puhul oli karedus eelmistega võrreldes veidi kõrgem (17,3 μm). Kõige suurem keskmine karedus esines haavapuidul (23,3 μm), mis on ligi kaks korda kõrgem kase väärtusest. Samasuguses järjestuses kasvasid ka standardhälbe väärtused, ehk pinnakareduse varieeruvus oli kõrgem suurema karedusega liikide puhul.

Tabel 3.1 Keskmised pinnakareduse väärtused

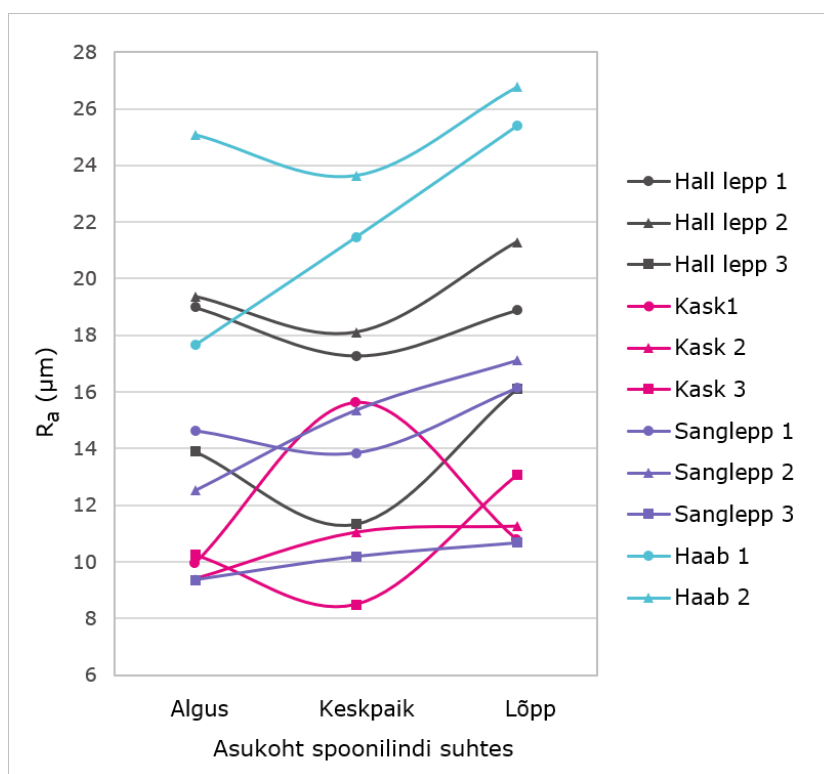
Puuliik	Pinnakaredus		
	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)
Kask	11,13 \pm 3,27	87,55 \pm 14,08	107,17 \pm 20,09
Sanglepp	13,32 \pm 4,11	95,31 \pm 21,41	114,05 \pm 30,09
Hall lepp	17,25 \pm 4,41	107,91 \pm 21,25	133,14 \pm 30,87
Haab	23,28 \pm 6,61	139,58 \pm 37,63	175,29 \pm 46,92

Erinevus puuliikide lõikes on tõenäoliselt tingitud nende erinevast tihedusest ja selle koostõjust kasutatud treimise parameetritega. Pinnakareduse vähenemist tiheduse kasvuga on varem korduvalt märgitud (Amorim *et al.* 2013; Aydin *et al.* 2013; Alia-Syahrah *et al.* 2019). Samuti peenema kiu ning ühtlasema tekstuuri ja soonte jaotusega puit on üldiselt siledama pinnaga (Thoma *et al.* 2014).

Katsekehade tihedust käesolevas töös ei mõõdetud, kuid pinnakareduste keskmised järjestuvad puuliikide võrdluses, nagu kirjandusest leitavate tiheduse andmete põhjal võis oodata.

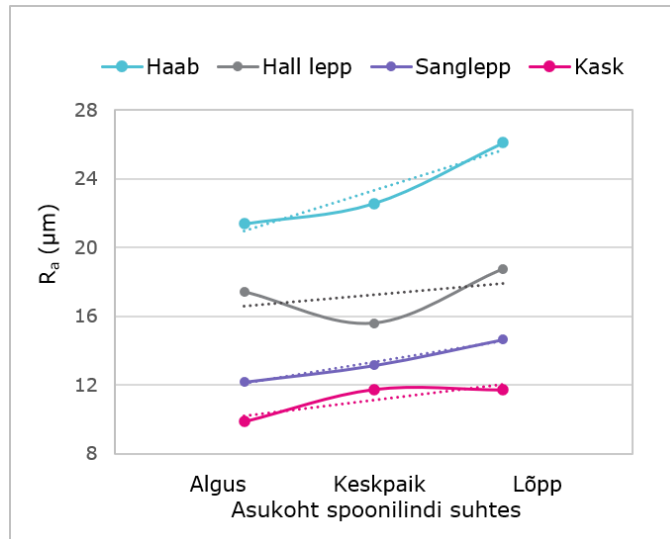
3.1.2 Pinnakaredus puuliigi siseselt

Puuliigi siseselt esineb tulemuste kõikumist nii pakkude vahel kui ka spoonilindi alguse, keskosa ja lõpu suhtes (edaspidi tähistatud ka vastavalt A, B ja C) (joonis 3.1). Mõõtmistulemuste keskmised on täpsemalt välja toodud lisas nr 1. Katsekeha päritolu järgi on ANOVA põhjal pakkude vahel kordades suurem tulemuste varieeruvus kui A, B ja C lõikes. Seega pinnakareduse puhul oli suurem roll pakul, millest spoon treiti, kui katsekeha asukohal spoonilindi suhtes.



Joonis 3.1 Keskmine karedus pakkude võrdluses

Joonisel 3.2 kirjeldatud keskmiste väärtuste põhjal võiks öelda, et pinnakaredused erinevad veidi spoonilindi lõikes ning üldiselt suureneb pinnakaredus paku ristlõike suhtes väljast sissepoole. Jooniselt 3.1, kus on välja toodud kõik pakud eraldi, nähtub aga siiski, et pilt pole nii selge ja tulemustes on suur hajuvus.



Joonis 3.2 Keskmine karedus sõltuvalt katsekeha asukohast spoonilindi suhtes

Sanglepa puhul puuliigi siseses pakkude võrdluses esinevat kolmanda paku suurt vahet ülejäänud kahega võiks selgitada selle puhul kasutatud teistsuguste treimise parameetritega. Antud pakust treiti 1,5 mm asemel 1 mm paksune spoon (tabel 2.1). Haavapuidul tuleb erinevus asukoha spoonilindi suhtes kõige selgemalt välja. Halli lepa puhul on B ehk spoonilindi keskelt võetud katsekehadel tunduvalt väiksem karedus. Sama esineb ka mõnel pakul ülejäänud puuliikidest.

Tulemuste lahknevuse katsekehade asukoha spoonilindi suhtes või pakkude vahel võivad põhjustada erinevused paku läbisoojenemise ühtluses enne treimist või treimise parameetrites. Mõningal määral aga ka puidu enda ehituslikes omadustes, sest puit pole homogeenne materjal. Näiteks uuritavate liikide puhul tihedus veidi kasvab puu ristlõikes seest väljapoole (Vurdu, 1977; Kärki, 2001; Heräjärvi, 2005) ning pinnakaredust võib mõjutada ka kevad- ja sügispuidu erinevus (Csanády *et al.* 2013). Sõltuvalt sellest, milline koht satub valitud katsekehale, võib tekkida suurem varieeruvus sama grupi tulemustes.

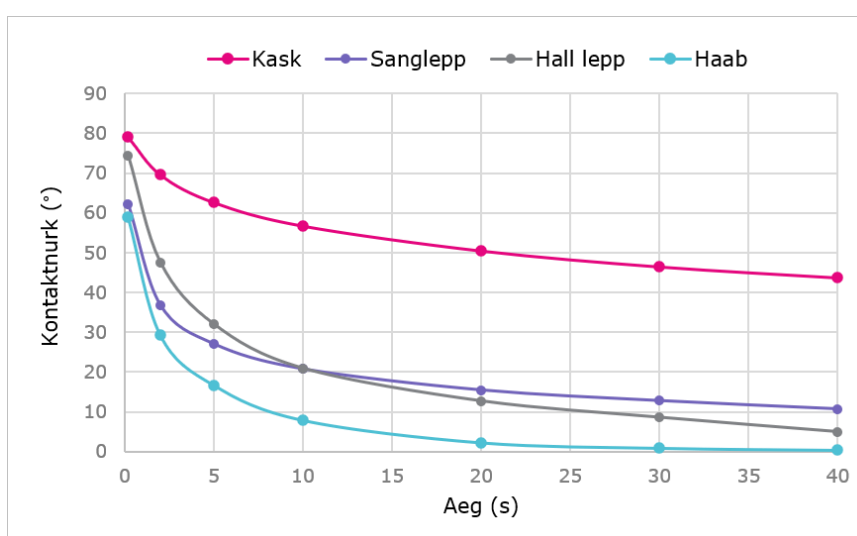
3.2 Märguvus

Spoonilise märguvuse iseloomustamiseks mõõdeti kontaktnurgad piki kiusuunda. Kontaktnurga muutumine ajas on kujutatud joonisel 3.3, mis on koostatud mõõtmistulemuste keskmiste põhjal. Kõige suuremad muutused kontaktnurgas toimusid esimese 5, aga ka kuni 10 sekundi jooksul, kus väärtuste langemine oli kiireim. Edasi kahanemine jätkus, kuid aeglasemalt. Kasutatud meetodi ja mõõtmistulemuste põhjal ei saa eristada, kas muutus kontaktnurgas toimus pigem tilga pinnale laialikandumise või sisse imbumise tõttu. Mõlemad nähtused on liimühenduse

moodustamise vaatepunktist olulised.

3.2.1 Märguvus puuliikide võrdluses

Kontaktnurkade põhjal joonistuvad puuliikide märguvuses välja erinevused (joonis 3.3). Kask eristub kindlalt ülejäänud uuritud puuliikidest, olles kõrgeima kontaktnurga ehk kõige kehvema märguvusega. Võrreldes ülejäänud liikidega, on kase kontaktnurga muutus aja jooksul väiksem. Lepad on tulemuste poolest lähedased. Esimeste sekundite jooksul oli sanglepa kontaktnurk suurem, kuid hiljem langes hallist lepast madalamale. Kõige parema märguvusega oli haab, mille kontaktnurga keskmine väärtus oli 40 sekundi lõpuks nullilähedane (tabel 3.3).



Joonis 3.3 Kontaktnurga sõltuvus ajast

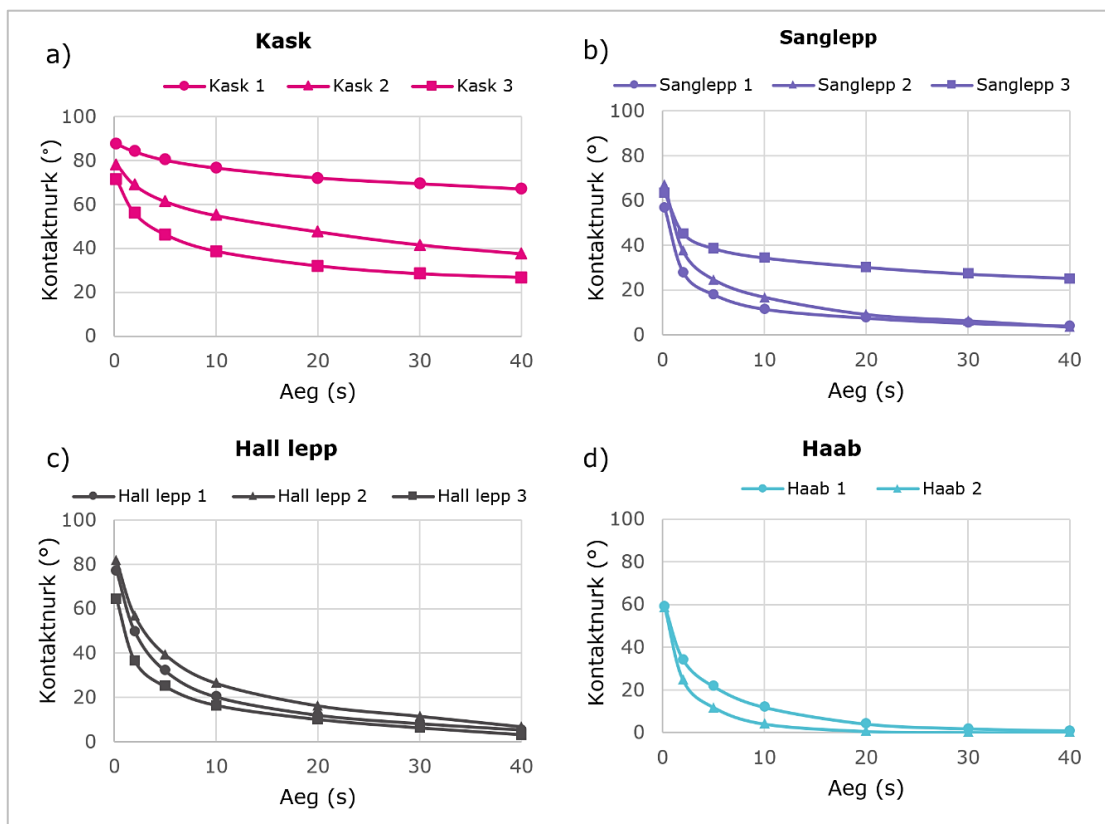
Tabel 3.3 Kontaktnurga keskmised väärtused erinevatel ajahetkedel

Kontaktnurk (°)				
Tilga vanus	Kask	Sanglepp	Hall lepp	Haab
0,2 s	78,8 ± 11,2	62,3 ± 9,7	74,4 ± 9,7	59,4 ± 8,8
2 s	69,5 ± 15,6	56,7 ± 10,4	69,8 ± 10,7	52,4 ± 10,4
5 s	62,6 ± 18,1	27,3 ± 11,9	31,8 ± 9,7	16,7 ± 9,9
10 s	56,7 ± 20,0	20,9 ± 13,0	20,9 ± 7,6	7,9 ± 7,8
20 s	50,6 ± 21,4	15,5 ± 13,6	12,7 ± 6,5	2,2 ± 6,5
30 s	46,4 ± 21,8	12,0 ± 13,2	8,6 ± 6,1	0,8 ± 3,0
40 s	43,6 ± 22,3	10,7 ± 12,9	5,0 ± 5,7	0,3 ± 1,9

3.2.2 Märguvus puuliigi siseselt

Liikide siseselt tulid välja vahed erinevatest pakkudest võetud katsekehade

märguvuses. Statistilise analüüsi põhjal kuulusid kõigi liikide pakkude keskmised tulemused erinevatesse homogeensetesse rühmadesse ehk olid oluliselt erinevad.



Joonis 3.4 Kontaktnurka muutumine ajas pakkude võrdluses.
a) Kask; b) Sanglepp; c) Hall lepp; d) Haab

Suurim erinevus pakkude võrdluses on kase puhul (joonis 3.4, a). Sanglepal tuli esile paku nr 3 tulemuste suur erinevus teistest, nagu ka pinnakareduse tulemustes täheldatud. Halli lepa ning haava tulemused olid pakkude lõikes ühtlasemad.

Katsekehade asukoht spoonilindi suhtes märguvuses olulist rolli ei mänginud. Kindlat seaduspära A, B ja C võrdluses välja ei joonistunud ning tulemused puuliigi siseselt statistiliselt ei erinenud.

3.2.3 Pinnakareduse mõju kontaktnurgale

Varasemalt on korduvalt välja toodud pinnakareduse ja märguvuse seost (Arnold, 2010; Yorur, 2018; Alia-Syahirah *et al.* 2019). Ka antud töös esines kontaktnurga ja pinnakareduse andmeid analüüsides nende vahel mõõdukas negatiivne korrelatsioon. Kõige suurem seos esines R_a ja R_z (korrelatsioonikoefitsiendid r vastavalt -0,52 ja -0,47) ning 10 sekundi vanuse tilga vahel. Mida suurem oli pinnakareduse väärtus, seda väiksem kontaktnurga oma, seega võib karedamate spoonide puhul oodata ka

tõenäoliselt paremat märguvust.

Viidates kirjanduse ülevaatele, on märguvust mõjutavaid tegureid palju. Puuliikide vahelise erinevuse peamiseks põhjuseks võib pidada tihedust (Amorim *et al.* 2013; Yorur, 2018; Alia-Syahirah *et al.* 2019). Suurema tihedusega puidu puhul on kontaktnurga langus ajas väiksem (Boehme & Hora, 1996). Kase puhul oli kontaktnurk ülejäänud liikidega võrreldes kordades suurem, kuid pinnakareduse näitajate puhul proportsionaalselt samasugust vahet ei esinenud, mis võib ka antud juhul näidata tiheduse mõju.

Pakkudevahelise tulemuste varieeruvuse põhjuseks võib olla lisaks puidu ehitusele ka kõikumised kuivatamise temperatuuris või ajas ning mingil määral erinevatest treimistest tingitud katsekehade erinev pinna struktuur. Lisaks ka spooni vanus, kuna pinnaenergia muutub ajas (Sinn *et al.* 2009).

3.3 Liimühendused

Liimühenduse tugevuse väärtuste üldpildis esines suur hajuvus. Tulemusi mõjutab ning hajuvust suurendab inimtegur liimühenduste moodustamisel, millest tuleneb näiteks ebaühtlane liimi jaotumine liites.

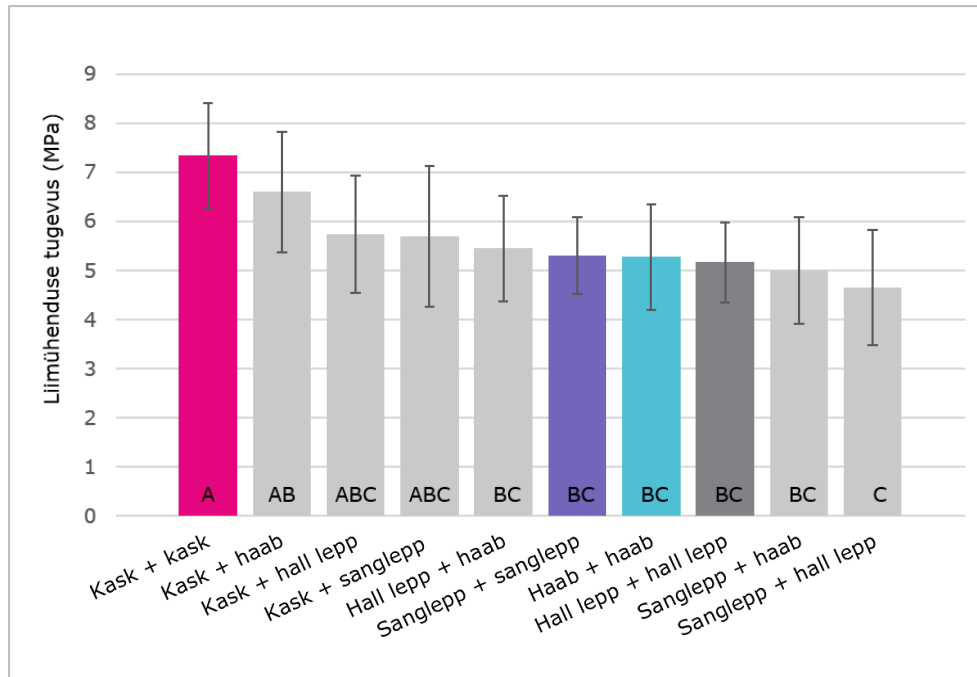
3.3.1 Liimühenduse tugevus puuliikide võrdluses

Puuliikide lõikes andis keskmiselt kõige tugevamad liimliited kask, järgnes haab ning siis hall lepp ja sanglepp (tabel 3.4).

Tabel 3.4 Liimühenduste tugevused puuliikide võrdluses

Puuliik	Liimliite tugevus (MPa)
Kask	6,12 ± 2,07
Haab	5,52 ± 1,24
Hall lepp	5,24 ± 0,96
Sanglepp	4,82 ± 1,41

Liimühenduste keskmised tugevused kõigi testitud kombinatsioonide puhul on kujutatud joonisel 3.5. Puuliikide võrdluses oli tugevaim kask + kask liide (7,34 MPa). Ülejäänud uuritud liikide omavahelised ühendused olid nõrgemad, kuid sarnaste keskmiste väärtustega. Sanglepp ja haab andsid ligilähedased tulemused, vastavalt 5,3 ja 5,27 MPa. Halli lepa liide oli keskmiselt veidi nõrgem, 5,16 MPa.



Joonis 3.5 Liimühenduste tugevused puuliikide kombinatsioonide võrdluses

Erinevate liikide paaridest andsid tugevamaid liimühendusi kombinatsioonid kasega. Halli lepa ja haava vahel saavutati keskmise tugevusega ühendus, sanglepa ja haava ning sanglepa ja halli lepa liited olid aga nõrgemad (tabel 3.5).

Tabel 3.5 Liimühenduste tugevused puuliikide kombinatsioonide võrdluses (A, B ja C tähistavad homogeenseid grupe Tukey testi põhjal)

Puuliigid	Liimliite tugevus (MPa)	Homogeenne rühm
Kask + kask	7,34 ± 1,07	A
Kask + haab	6,60 ± 1,23	AB
Kask + hall lepp	5,74 ± 1,20	ABC
Kask + sanglepp	5,69 ± 1,43	ABC
Hall lepp + haab	5,45 ± 1,08	BC
Sanglepp + sanglepp	5,30 ± 0,79	BC
Haab + haab	5,27 ± 1,07	BC
Hall lepp + hall lepp	5,16 ± 0,82	BC
Sanglepp + haab	5,00 ± 1,08	BC
Sanglepp + hall lepp	4,64 ± 1,17	C

Statistiliselt esines liimühenduse tugevustes Tukey testi põhjal kolm rühma. Kuna tulemuste hajuvus oli suur ning katsekehi võrdluses vähe, siis statistilised erinevused kombinatsioonide vahel teravalt välja ei joonistu. Kaske sisaldavad liited olid statistiliselt sarnased ning seega võiks kombinatsioonidest kasega oodata kõige tugevamaid ühendusi. Ülejäänud liikide puhul sellist seaduspära ei esine.

Liikidevaheliste paaride purunemispindade vaatlusel nähtus, et enamjaolt oli kombinatsioonides nõrgimaks lüliks hall lepp. Ligikaudu pooltel juhtudel lagunes liide tõmbekatsel halli lepa, umbes 21% sanglepa, 20% haava ning 9% kase poolelt. Siinkohal tuleb märkida, et tegemist on visuaalse hinnanguga, mis on subjektiivne. Lisaks on raske määrata, kas purunemine toimus pigem liimi ja puidu piirpinnal või puidu pealmistes kihtides.

Haava ja halli lepa kombinatsiooni puhul tuli kõige selgemalt esile seaduspära liimliite purunemise pildis (joonis 3.6). Purunemisel jäi liim suures osas katsekeha haava poole külge ehk purunemine toimus kas halli lepa puidus või puidu ja liimi piirpinnal. Põhjuseks võib olla haava veidi karedama pinna ning parema märguvuse koosmõju, mille tulemusel liim võis parema mehaanilise sideme (*mechanical interlocking*) luua.



Joonis 3.6 Haava (vasakul) ja halli lepa (paremal) kombinatsiooni liimühenduse purunemise pinnad

3.3.2 Liimühendused puuliigi siseselt

Vaadates liimühenduse tugevuse väärtusi puuliikide siseselt oli pakkude võrdluses kask statistiliselt kõige ühtlasemate omadustega. Väljapaistvamad erinevused esinesid leppade puhul. Sanglepa pakk nr 3 andis tugevuse väärtuse poolest tunduvalt nõrgemaid ühendusi. Halli lepa puhul oli samuti pakk nr 3 statistiliselt erinev, kuid

vastupidi suurema tugevusega. Mõlema liigi puhul oli tegemist pakkudega, mille pinnakaredus oli märgatavalt madalam ülejäänud kahest. See näitab, et kareduse mõju liimühendusele võib liigiti erineda või mängib muude omaduste koosmõju pinnakaredusest suuremat rolli.

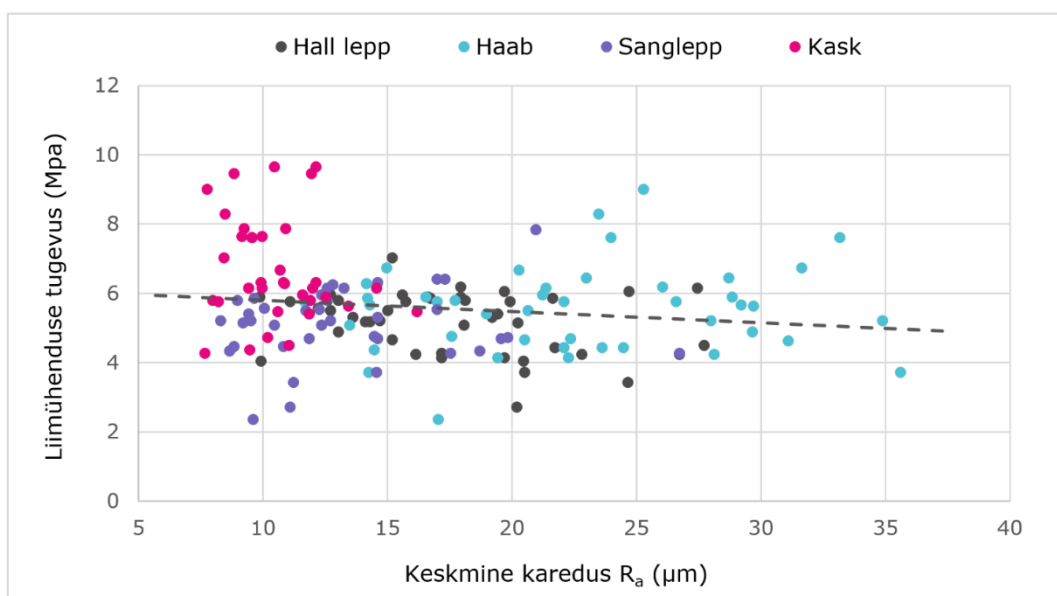
Katsekeha asukoha spoonilindi suhtes ning liimliite tugevuse vahel seaduspära välja ei joonistunud. Haavapuidu puhul esines ainsana suurem erinevus kohtade A, B ja C vahel. Nimelt oli spoonilindi algusest võetud katsekehadega liimühendustel keskmiselt 1 MPa võrra suurem tugevus kui selle keskelt või lõpust võetutel.

Dispersioonanalüüsi põhjal oli kase ja sanglepa korral liimühenduste tugevuste väärtustes suurem varieeruvus pakkude võrdluses, haaval ja hallil lepal aga spoonilindi ulatuses, mida oli näha ka pinnaomaduste puhul.

3.3.3 Pinnaomaduste mõju liimühenduse tugevusele

Tulemused viitasid uuritud pinnaomaduste teatud mõjule liimühenduse tugevusele, kuid raudset seost kummagi omadusega välja ei joonistunud. Sõltuvused olid nõrgad või varieeruvad lähtuvalt puuliigist.

Pinnakareduse üldist pilti ehk kõigi puuliikide tulemusi koos vaadates oli selle seos liimühenduse kvaliteediga väike (joonis 3.7). Esines nõrk negatiivne korrelatsioon, R_a ja R_z puhul olid korrelatsioonikoefitsiendid vastavalt $-0,16$ ja $-0,12$. Seega suurema karedusega puuliigid võivad anda madalama tugevusega liiteid.

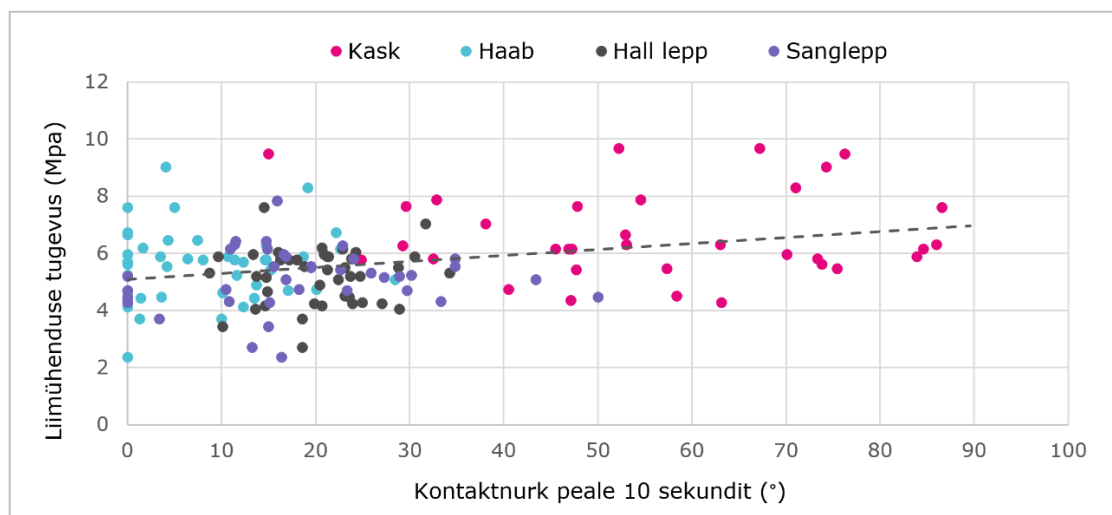


Joonis 3.7 Liimühenduse tugevus sõltuvalt pinnakaredusest

Seevastu ei mõjunud pinnakaredus kõigile puuliikidele samamoodi. Liikide võrdluses eraldi oli kase ning halli lepa puhul korrelatsioon tugevam ning liimliite tugevus langes kareduse kasvuga, haaval ja sanglepal esines aga nõrk vastupidine trend ehk kareduse kasvuga tugevus veidi tõusis.

Tähtsusetut seost liimühenduse ja pinnakareduse vahel on varem märgitud (Neese *et al.* 2004), aga on täheldatud ka liite tugevuse langust pinnakareduse kasvuga (Aydin *et al.* 2013; Söğütlü, 2017; Yorur, 2018).

Märguvus avaldas liimühendusele olulisemat mõju, liite tugevuse ning kontaktnurga vahel esines tugevam seos (joonis 3.8). Suurim mõju avaldus alates viiendast sekundist ja vanematel tilkadel, mille puhul korrelatsioonikoefitsient jäi vahemikku 0,32...0,34. See näitab, et tugevamad liimliited moodustasid kõrgema kontaktnurgaga ehk kehvema märguvusega katsekehad.



Joonis 3.8 Liimühenduse tugevus sõltuvalt kontaktnurgast

Teoreetiliselt peaks parem märguvus tõstma liimühenduse tugevust. Antud juhul aga võib puuliikide erinev tihedus märguvuse mõju üle kaaluda. Üldiselt annavad tihedamad puuliigid tugevamad liimühendused (Aydin *et al.* 2013; Yorur, 2018). Tänu tihedama puidu kõrgemale nihketugevusele, on sellega moodustatud liidetes suurem kohesiivne tugevus. Samuti imbub parema märguvuse ja väiksema tihedusega puuliikidesse tõenäoliselt rohkem liimi sisse, mis ühest küljest peaks liidet tugevdama, kuid teisest küljest võib liigne imbumine vähendada substraatide piirpinnale jäävat liimihulka.

Tiheduste erinevus aga ei seleta haavapuidu, mis on võrreldud liikidest kõige kergem ning suurima märguvuse ja karedusega, liidete suhteliselt suurt tugevust. See annab kaalu tõsiasjale, et liimühendus on keeruline süsteem, mille mitmed muutujad võivad

olla omakorda üksteisest sõltuvad ning mängib rolli nende omavaheline tasakaal või koosmõju.

KOKKUVÕTE

Liimühenduse tugevust mõjutavad nii puidu kui ka adhesiivaine iseloom ning liite moodustamise protsessi parameetrid. Adhesiooni näol on tegemist pinnanähtusega, mille kujunemise määrab keemiliste ja füüsikaliste omaduste koosmõju. Pinnaomadustest peetakse ühenduse moodustumisel olulisemateks märguvust ning pinnakaredust.

Lõputöö eesmärk oli analüüsida spooni pinnakareduse ja märguvuse mõju liimühenduse tugevusele. Uurimisel olid neli puuliiki: kask, haab, hall lepp ja sanglepp. Neist viimased kolm on kase kõrval üldiselt kehvamate omadustega ning selle tõttu ka spoonitööstuses vähem kasutatud.

Uuritavatest puuliikidest treiti spoonid ja valmistati katsekehad, millel mõõdeti pinnakaredus ning märguvuse hindamiseks kontaktnurk tilgameetodil. Liimühendused moodustati ja testiti ABES meetodi eeskujul erinevate kombinatsioonidena nii samast kui ka erinevast puuliigist katsekehade vahel. Tulemusi võrreldi puuliikide vahel, aga ka sama liigi siseselt erinevate pakkude ning spoonilindi alguse, keskaiga ja lõpu suhtes.

Pinnaomaduste puhul joonistusid puuliikide võrdluses välja erinevused. Liigid järjestusid keskmise kareduse väärtuse ja märguvuse põhjal kasvavalt nagu nende tiheduste põhjal võis oodata: kask, sanglepp, hall lepp, haab. Liimühenduste tulemustes esines suur hajuvus ning katsekehade suhteliselt väikese arvu tõttu statistilised erinevused testitud kombinatsioonide vahel tugevalt välja ei tulnud. Puuliikide võrdluses andis kõige tugevamad liimühendused kask, seejärel haab, hall lepp ning sanglepp. Eri liikide kombinatsioonidest olid tugevaimad samuti liited kasega.

Tulemustest järeldus uuritud pinnaomaduste nõrk seos liimühenduse tugevusega. Karedus avaldas liimliitele minimaalset negatiivset mõju, märguvusega aga esines veidi suurem korrelatsioon. Tugevamad liimliited moodustusid siledama pinna ning kehvema märguvuse ehk kõrgema kontaktnurgaga katsekehade vahel. Üldiselt olid seosed nõrgad või varieeruvad sõltuvalt puuliigist, mis omakorda lisab kaalu tõsiasjale, et liimühendus on keerukas süsteem, milles on osa mitmete muutujate koosmõjul või omavahelisel tasakaalul.

Kokkuvõttes töö eesmärk saavutati ning saadud tulemused võivad olla kasulikeks lähteandmeteks haava, sanglepa ja halli lepa puitpolümeerkomposiitide arendamisel.

SUMMARY

The strength of a glue bond is affected by the characteristics of wood and adhesive as well as the parameters of the bonding process. Adhesion is a surface phenomenon, which is determined by both physical and chemical interactions. Of surface properties, roughness and wettability are thought to be the most influential in bond formation.

The aim of this thesis was to analyze the effect of veneer surface roughness and wettability on bond strength. Four different wood species, birch, aspen, black alder and grey alder were studied. Compared to birch, the last three are generally considered to be of lower quality and mechanical properties and as a result less used in manufacturing.

On veneers peeled from the chosen wood species, surface roughness was measured using stylus method, and for evaluating wettability contact angles by sessile drop method. Bonds were formed and tested similarly to ABES method between specimens of the same species as well as combinations of different species. The results were analyzed and compared among the species as well as within them depending on the log and the location of the specimen in relation to the cross section of the log.

In the case of surface properties, differences occurred based on wood species. The species ranked in order of increasing roughness values and wettability, as could be expected from their densities: birch, black alder, grey alder, aspen. There was a high variance among the bond strength results and due to the relatively small number of test specimens, the statistical differences between the tested combinations were not clear. Of the studied species, birch gave the strongest bonds, followed by aspen, grey alder and black alder. Between the combinations of different wood species, again the strongest were joints with birch.

It was concluded that the relation between the studied surface properties and glue bond strength was weak. Hardness had a minimal negative effect on the performance of the adhesive joint. The correlation with wettability was slightly higher. Stronger bonds were formed between the test specimens with a smoother surface and poorer wettability. Overall, the relations were weak or varied depending on the wood species. This adds to the fact that adhesive bonds are a complex system influenced by many factors and the balance between them.

The aim of the thesis was achieved, and the obtained results could be useful for the development of wood-polymer composites using aspen, black alder and grey alder.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Adhesive Evaluation Systems, Inc. (2014). Automated Bonding Evaluation System (ABES) Installation and Operating Manual. [Online] <https://www.adhesiveevaluationsystems.com/images/pdfs/ABES-Manual-2014.pdf> (04.04.2020).

Alia-Syahirah, Y., Paridah, M. T., Hamdan, H., Anwar, U. M. K., Nordahlia, A. S., Lee, S. H. (2019). Effects of anatomical characteristics and wood density on surface roughness and their relation to surface wettability of hardwood. – *Journal of Tropical Forest Science*, 31 (3), 269–277.

Amorim, M., Ribeiro, P., Martins, S., Del Menezzi, C., Souza, M. (2013). Surface wettability and roughness of 11 Amazonian tropical hardwoods. – *Floresta e Ambiente*, 20, 99-109.

Arnold, M. (2010). Planing and sanding of wood surfaces – effects on surface properties and coating performance. – *Proceedings of the PRA's 7th international woodcoatings congress "Reducing the environmental footprint", Middlesex, UK* (p. 32 (12 pp.)).

ASTM D7998-19. (2019). Standard Test Method for Measuring the Effect of Temperature on the Cohesive Strength Development of Adhesives using Lap Shear Bonds under Tensile Loading. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Aydin, I., Demirkir, C., Colak, S., Salca, E.-A. (2013). The Effect of Veneers Roughness on Bonding and Some Mechanical Properties of Plywood. – *Pro Ligno*, 9 (1), 41-49.

Baldan, A. (2012). Adhesion phenomena in bonded joints. – *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 38, 95-116.

Boehme, C & Hora, G. (1996). Water Absorption and Contact Angle Measurement of Native European, North American and Tropical Wood Species to Predict Gluing Properties. – *Holzforschung*, 50 (3), 269-276.

Christiansen, A. W. (1990). How Overdrying Wood Reduces Its Bonding to Phenol Formaldehyde Adhesives: A Critical Review of the Literature. Part I. Physical Responses. – *Wood and Fiber Science*, 22, 441–459.

Claessens, H., Oosterbaan, A., Savill, P., Rondeux, J. (2010). A review of the

characteristics of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and their implications for silvicultural practices. – *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 83 (2), 163–175.

Collett, B. (1972). A review of surface and interfacial adhesion in wood science and related fields. – *Wood Science and Technology*, 6, 1-42.

Csanády, E., Magoss, E. (2013). *Mechanics of Wood Machining* : 9. Surface Roughness. Berlin : Springer-Verlag.

EVS-EN ISO 4287:1999. Toote geomeetriline kirjeldus ja tehnilised andmed (GPS). Pinnatekstuur: profiilimeetod. Terminid, määratlused ja pinnatekstuuri parameetrid.

EVS-EN ISO 4288:1999. Toote geomeetriline kirjeldus ja tehnilised andmed (GPS). Pinnatekstuur: profiilimeetod. Juhised ja tegevuskeemid pinnatekstuuri hindamiseks.

Fennessy, J. (2004). Common alder (*Alnus glutinosa*) as a forest tree in Ireland. – *Coford Connects, Dublin : Reproductive Material no. 8*, 1-4. [Online] <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/cofordconnects/Alder-reprod.pdf> (24.10.2019)

Frihart, C. R. (2005). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*: 9 Wood Adhesion and Adhesives. CRC Press.

Gardner, D., Blumentritt, M., Wang, L., Yildirim, N. (2015). Adhesion Theories in Wood Adhesive Bonding. – *Progress in Adhesion and Adhesives*, 125–168, Scrivener Publishing LLC.

Gardner, D., Oporto, G., Tze, W. (2016). Wood and fiber-based composites: Surface properties and adhesion. – *Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment*, 345-383.

Heräjärvi, H. (2005). Birch – properties and utilisation. Finnish Forest Research Institute Metla. [Online] http://www.valbro.uni-freiburg.de/pdf/birch_prop_and_util.pdf (24.10.2019)

Huang, Z., Feng, M. (2018). Correlation of Adhesive Performance between Automated Bond Evaluation System Tests and Plywood Tests: A Case Study of Lignin-Phenol-Formaldehyde Adhesives. – *Forest Products Journal*, 68 (4), 353-358.

Hubbe, M. A., Gardner, D. J., Shen, W. (2015). Contact angles and wettability of cellulosic surfaces: A review of proposed mechanisms and test strategies. – *Bioresources*, 10 (4), 8657-8749.

Jankowska, A., Boruszewski, P. Drożdżek, M. (2018). The Role of Extractives and Wood Anatomy in the Wettability and Free Surface Energy of Hardwoods – *Bioresources*. 13 (2), 3082-3097.

Kamke, F. A., Lee, N. L. (2007). Adhesive penetration in wood — A review. – *Wood and Fiber Science*, 39 (2), 205–220.

Kilic, M., Hizirolu, S., Burdurlu, E. (2006). Effect of machining on surface roughness of wood. – *Building and Environment*, 41, 1074-1078.

Kärki, T. (2001). Variation of wood density and shrinkage in European aspen (*Populus tremula*) – *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59, 79-84.

Magoss, E. (2008). General Regularities of Wood Surface Roughness. – *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica*, 4. [Online] <https://core.ac.uk/download/pdf/26228380.pdf>

Moghaddam, M. (2015). Wettability of modified wood : Doktoritöö. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.

Piao, C., Winandy, J. E., Shupe, T. F. (2010). From hydrophilicity to hydrophobicity: a critical review: Part I. Wettability and surface behavior. – *Wood and Fiber Science*, 42, 490-510.

Puuproffa. (2019a). Aspen. [WWW] http://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/en/puulajit/aspen-dp1 (24.10.2019)

Puuproffa. (2019b). Grey alder. [WWW] http://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/en/puulajit/grey-alder (24.10.2019)

Raudsaar, M., Sims, A., Timmusk, T., Pärt, E., Nikopensius, M., Matson, T. (2019). Aastaraamat Mets 2018: 1. Metsavarud. Keskkonnaagentuur. [Online] https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/01_metsavarud_20.08.pdf (24.10.2019)

Rohumaa, A. (2016). The impact of log preheating on birch veneer surface quality, bond

formation and plywood performance : Doktoritöö. Aalto University.

Sandak, J., Negri, M. (2005). Wood surface roughness – What is it. – *Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar (IWMS 17), Rosenheim, Germany, 26-28.*

Scheikl, M., Dunky, M. (1998). Measurement of dynamic and static contact angles on wood for the determination of its surface tension and the penetration of liquids into the wood surface. – *Holzforschung*, 52, 89-94.

Shi, S. Q., Gardner, D. J. (2001). Dynamic adhesive wettability of wood. – *Wood Fiber Science*, 33, 58–68.

Shupe, T. F., Hse C.-Y., Wang, W. H. (2001). An Investigation of Selected Factors that Influence Hardwood Wettability – *Holzforschung*, 55 (5), 541-548.

Sinn, G., Sandak, J., Ramananantoandro, T. (2009). Properties of wood surfaces – characterisation and measurement. A review. – *Holzforschung*, 63, 196–203.

Söğütlü, C. (2017). Determination of the effect of surface roughness on the bonding strength of wooden materials. – *Bioresources*. 12 (1), 1417-1429.

Tallnerk Grupp, 2019. Birchwood properties. [WWW] <http://www.tallnerk.ee/?179> (24.10.2019)

The Wood Database. (2019a). European alder. [WWW] <https://www.wood-database.com/european-alder/> (24.10.2019)

The Wood database. (2019b). European aspen. [WWW] <https://www.wood-database.com/european-aspen/> (24.10.2019)

The Wood Database. (2019c). Silver birch. [WWW] <https://www.wood-database.com/silver-birch/> (24.10.2019)

Thoma, H., Peri, L., Lato, E. (2014). Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics – *Materials. Science and Technology*, 17 (2), 285-292.

Vurdu, H. (1977). Anatomical characteristics of stem, branch and root wood in european black alder (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) : doktoritöö. Iowa State University, Ames, Iowa.

Wålinder, M. (2000). Wetting phenomena on wood, Factors influencing measurements of wood wettability : Doktoritöö. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.

Wålinder, M., Johansson, I. (2001). Measurement of Wood Wettability by the Wilhelmy Method. Part 1. Contamination of Probe Liquids by Extractives. – *Holzforschung*, 55, 21-32.

Wålinder, M., Ström, G. (2001). Measurement of Wood Wettability by the Wilhelmy Method. – *Holzforschung*, 55, 21-41.

Wang, S., Zhang, Y., Xing, C. (2007). Effect of drying method on the surface wettability of wood strands – *Holz als Roh- und Werkstoff*. 65 (6), 437-442.

Wescott, J. M., Birkeland, M. J., Traska, A. E., Frihart, C. R., Dally, B. N. (2007). New method for rapid testing of bond strength for wood adhesive. - Proceedings of the 30th annual meeting of the Adhesion Society, Inc. : February 18-21, 2007, Tampa Bay, 219-221.

Wilson, S., Mason, B., Savill, P., Jinks, R. (2018). Non-native alder species (*Alnus* spp.) – *Royal Forestry Society*, 112 (3), 136-174. [Online] <https://www.rfs.org.uk/media/504733/non-native-alder-species-alnus-spp.pdf>

Yorur, H. (2018). Investigation of factors influencing on wood adhesion capability. – *Journal of Forestry Faculty, Kastamonu University*. 18 (1), 99-107.

LISAD

Lisa 1 Keskmine pinnakaredus puuliigi siseselt

Tabel L1.1 Keskmine pinnakaredus puuliikide võrdluses pakkude ja spoonilindi lõikes

Puuliik	Kask		Sanglepp		Hall lepp		Haab	
	R _a (μm)	St.dev	R _a (μm)	St.dev	R _a (μm)	St.dev	R _a (μm)	St.dev
Pakk 1	12,11	4,57	14,87	2,68	18,42	3,03	21,50	7,06
A	9,93	1,44	14,63	2,20	18,99	2,98	17,65	3,67
B	15,64	6,03	13,84	2,01	17,28	2,54	21,46	5,94
C	10,77	1,13	16,14	2,87	18,88	3,19	25,39	8,41
Pakk 2	10,55	1,48	15,00	5,06	19,59	4,49	25,11	5,54
A	9,40	1,19	12,53	4,04	19,36	5,26	25,09	3,44
B	11,06	1,25	15,37	5,34	18,10	3,99	23,64	5,64
C	11,28	1,00	17,11	3,90	21,29	3,04	26,77	6,74
Pakk 3	10,69	2,57	10,08	1,24	13,78	3,14		
A	10,24	1,96	9,36	0,42	13,90	3,33		
B	8,49	0,47	10,19	0,57	11,34	1,28		
C	13,06	1,99	10,68	1,70	16,11	1,94		