

TTÜ Inseneriteaduskond

## **ÜLEVAADE PUITPOLÜMEERIDEST JA NENDE TOOTMISMEETODIDEST**

**An overview of wood polymers and their manufacturing  
methods**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Jaan Tanel Veikesaar

Üliõpilaskood: 120861KAOB

Juhendaja: Anti Rohumaa

# 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.

"04" juuni 2020

Autor: Jaan Veikesaar  
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 202.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# TalTech Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Jaan Tanel Veikesaar 120861KAOB  
**Õppekava, peeriala:** KAOB02/09 - Puidu- ja tekstiilitehnoloogia  
**Juhendaja:** Anti Rohumaa, Teadur, Tallinna Tehnikaülikool,  
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut,  
[anti.rohumaa@taltech.ee](mailto:anti.rohumaa@taltech.ee)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) : Ülevaade puitpolümeermaterjalidest ja nende tootmismeetodidest.

(inglise keeles): An overview of polymer materials and their manufacturing methods.

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade spoonipõhistest toodetest ja turust.
2. Antud toodete omaduste kirjeldamine ning nendeks omaduste saamiseks vajalikke töötlemismeetodite tutvustamine.
3. Erinevate toodete kasutusvaldkondade ülevaate andmine ja tuleviku perspektiivide analüüsimine.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus  | Tähtaeg    |
|----|---|------------|
| 1. | Erialase kirjanduse leidmine ja sellega tutvumine.                            | 01.12.2019 |
| 2. | Turu ja toodete ülevaade valmis.  | 31.12.2019 |
| 3. | Tootmismeetodite ja nendest tulenevate omaduste muutuste tutvustamine valmis. | 31.01.2020 |
| 4. | Kasutusvaldkondade ja tuleviku analüüs valmis.                                | 29.02.2020 |
| 5. | Töö mahust 95% valmis.  | 31.03.2020 |

**Töö keel:** Eesti keel      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "15" aprill 2020 a

**Üliõpilane:** Jaan Veikesaar ..... "10" november 2019 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Anti Rohumaa ..... "....." .....201....a  
/allkiri/

# SISUKORD

|   |    |
|---|----|
| TalTech Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut .....                      | 3  |
| EESSÖNA .....   | 6  |
| 1. SISSEJUHATUS.....  | 7  |
| 2. Spoonipõhiste toodete kasutusala ja turujaotus .....                         | 8  |
| 2.1 Ajalugu.....  | 8  |
| 2.2 21. sajandi turu ülevaade .....   | 9  |
| 3. Spoonipõhiste toodete valmistamine ja turg .....                             | 11 |
| 3.1 Spooni tootmine .....   | 11 |
| 3.1.1 Toormaterjali valik spooni valmistamiseks .....                           | 12 |
| 3.1.2 Palgi eeltöötlemine .....   | 12 |
| 3.1.3 Spooni koorimine .....  | 13 |
| 3.1.4 Kuivatamine .....   | 15 |
| 3.1.5 Spooni liitmine ja parandamine .....                                      | 16 |
| 3.1.6 Spoonide liimimine ja vineeritooriku valmistamine.....                    | 16 |
| 3.1.7 Liimid .....  | 17 |
| 3.1.8 Eelpressimine ja kuumpressimine .....                                     | 21 |
| 3.2 Spoonipõhised tooted .....  | 22 |
| 3.2.1 Vineer .....  | 22 |
| 3.2.2 KOMPOSIITPUIT .....   | 24 |
| 3.2.3 LVL.....  | 25 |
| 4. Spooni ja spoonipõhiste toodete omaduste parandamine, modifitseerimine ..... | 28 |
| 4.1 Puidu modifitseerimise peamised mehhanismid .....                           | 29 |
| 4.2 Kasutatavad meetodid.....   | 30 |
| 4.2.1 Keemiline töötlemine .....  | 30 |
| 4.2.2 Termomehaaniline ja termo-hügro-mehaaniline töötlemine .....              | 36 |
| 5. Kasutusvaldkonnad ja tulevikuanalüüs.....                                    | 39 |
| 6. KOKKUVÕTE.....   | 42 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 7. Summary..... | 44 |
| 8. Viited ..... | 46 |

## **EESSÕNA**

Antud dokumendi teema aitas sõnastada dr Anti Rohumaa (TTÜ Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituudi teadur), ning kes aitas nõuga ning algsete materjalide kogumisega. Hilisemalt leitud materjalid olid leitud peamiselt Interneti allikatest, suuresti aitas siin kaasa ResearchGate.net veebileht.

Soovin tänada siinkohal oma juhendajat, dr Anti Rohumaad ja dr Jaan Kersi, kes algselt nõustas lõputöö teemal.

Spoon, vineer, liimkihtpuit, puidu modifitseerimine, bakalaureusetöö.

# 1. SISSEJUHATUS

Vineer on olnud tähtis materjal inimkonna ajaloos juba sajandeid. See kihiline komposiitmaterjal tõusis tööstuslikku tähtsusesse pärast kahe suure tähtsusega innovatsiooni leiutamist – 19. sajandi lõpus pöörleva treimise masina, millega oli võimalik tööstuslikus koguses spooni tootmine ja 20. sajandi alguses veekindlate fenoolformaldehüüdlüimide leiutamisega, millega sai ilmastikukindlat vineeri toota. Hilisemad arendused kihtspooni kihtide ladumise protsessis on lubanud tuua erinevaid uusi tooteid turule, nagu näiteks LVLi (ing k laminted wood lumber)või PSLi (ing k parallel strand lumber) ja aktiivne arendustöö uute materjalide ja kasutusvaldkondade leidmiseks käib pidevalt.

Vineeri üks peamisi eeliseid on selle tootmiseks kasutatava materjali suur kasuprotsent, sest on võimalik kasutada kalleid või haruldasi puiduliikide spoone ainult plaadi pinnakatte kihis. Oma suurepäraomadustest tingituna on vineer leidnud kasutust mitmes kõrgtehnoloogilises kasutusvaldkonnas, näiteks F1 autode põhjakonstruktsioonis [1] või isegi lennundustööstuses [2], aga põhilised kasutusvaldkonnad on ehitus, mööblitööstus, transpordivahendid valmistamiseks ja logistika, kus paljud kauba transportimiseks kasutatavad kastid on vineerist toodetud.

Esimese vineeri kasutuse teadaolev ajalugu algab 3500 aastat tagasi Vana-Egiptuses, kus on avastatud osaliselt sellest valmistatud sarkofaagid. Seal kasutati kuuest 4mm paksusega spooni kihist koosnevat materjali, mille valmistamiseks on erinevad spoonikihid omavahel kokkuhoidmiseks tüüblitega ühendatud [3]. Hilisemalt võeti juba kasutusele tüüblite asenduseks loomsete materjali põhjal valmistatud looduslikud liimid ja spoonikihid õhenesid umbes 3mm paksuseks [4].

Moodsad vineermaterjalid on põhimõtetelt ja välimuselt sarnased oma iidsetele vastetele, aga muutused ja arengud tootmises on tinginud paremaid füüsikalised omadused ja kvaliteedi. Koos inimkonna vajadusega kasutusele võtta rohkem taastuvatest materjalidest pärinevaid tooteid ja vineeri omaduste paranemisega uute tehnoloogiate kasutusele võtuga ning uute toodete turule tulekuga on tegu vägagi perspektiivse tootegrupiga, mis vanusest hoolimata pole lõplikult välja arendatud [4].

## **2. SPOONIPÕHISTE TOODETE KASUTUSALAD JA TURUJAOTUS**

Spoonidest valmistatud materjalidel on olnud ajaloos erinevates staatuses ja selle kasutusvaldkonnad on erinenud. Veel paar sajandit tagasi oli tegemist luksusliku materjaliga, millel oli suur hinnasilt tootmisest tingitud keerukuse tõttu. Hiljem koos arengutega tootmistehnoloogiates muutus see odavaks masstooteks ning koos ilmastikukindluse andvate liimide avastamisega, muutusid need 20. sajandil pea kõikjal kasutatavaks.

### **2.1 Ajalugu**

Vineeril oli veel 18. sajandil kõrge staatus, kui selle tootmisega tegelesid käsitöömeistrid, kes üldjuhul kas katsid juba suuri mööbliesemeid vineeriga, et nende välimust parandada või meisterdasid suuri mööbliesemeid ainult sellest materjalist. 19. sajandil oli tööstusliku revolutsiooni käigus pöördeline aeg vineeri jaoks, sest 1890. aastatel leiutati pöörlev treimismasin. Varasemalt lõigati palgist risti spooni ning mööblitööstuses on antud meetod siiani kasutusel. Uus masin lubas aga koorida palgilt õhukese kihina spooni ja kasutada toorainet palju efektiivsemalt ja parandas toote kättesaadavust laiemale hulgale tarbijatele. Samas oli vineeri tootmine üsna kesise kasvuga 20. sajandi algusaastatel. Esimene suurem muutus selles suunas toimus Esimese Maailmasõja ajal, vineeri omadusi parandati, et sellest oleks võimalik ehitada võimalikult kergeid lennukid. Samaaegselt hakkas muutuma vineeri suhtes üldine arvamus paremaks ja selles ei nähtud enam ainult odavat asendust mõnele muule materjalile [5].

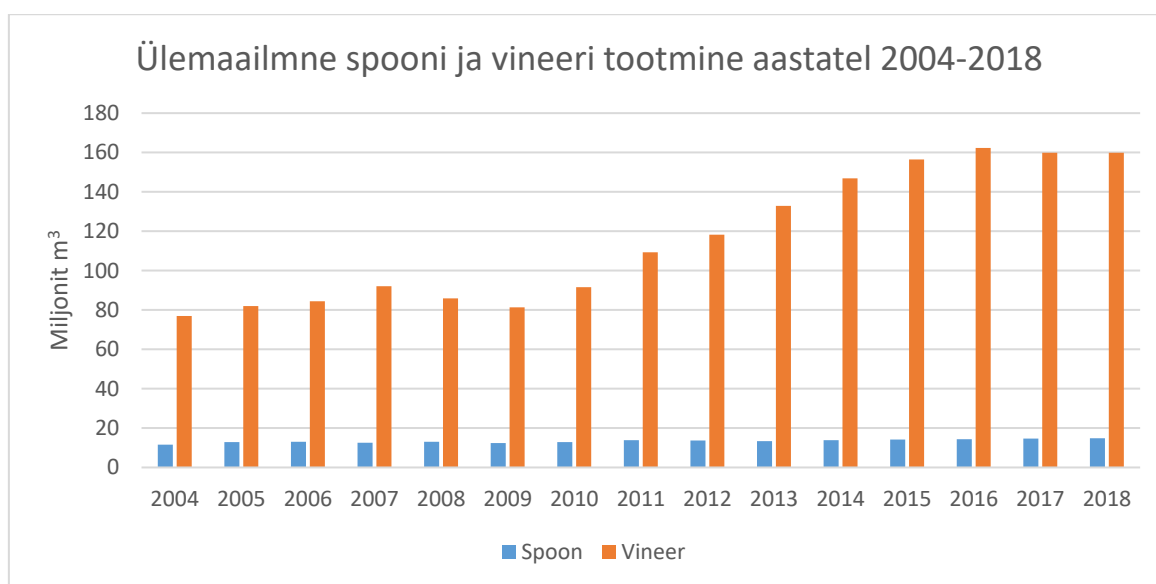
Järgmine suur muutus tuli 20. sajandil, 1934. aastal veekindlate liimide ja vaikude avastamise ning leiutamisega Dr James Nevini poolt Ameerika Ühendriikides. Senini kasutatud loomse ja taimse päritoluga liimid asendusid sünteetilisestega ja seetõttu paranes oluliselt lõpptoote ilmastikukindlus ning laienedid kasutusvaldkonnad paljudele varasemalt ebasobilikele aladele. See muutis võimalikuks kasutada okaspuidust toodetud vineeri ehitusmaterjalina ja enam mitte ainult siseruumides asuvate esemete loomiseks. II maailmasõja ajal tõusis vineer tähtsaks kohtale sõjaaegses majanduses, kus sellest ehitati paate, barakke, relvi ja isegi sõjalennukid. Üks näide on brittide de Havillandi Mosquito kergepommitaja, mille kere raamistiku osad olid peaaesjalikult



puidust ja lennukikere vineer-balsapuu-vineeri puitkomposiidist. Kuigi lennuki disainer võitles Briti Õhuväe juhatuse konservatiivsete vaadete vastu kogu lennuki projekteerimise faasis, osutus see lõpuks väga heaks disainiks, mis oli 1941. aastal üks maailma kiireimaid teenistuses olevatest lennukitest [6].

## 2.2 21. sajandi turu ülevaade

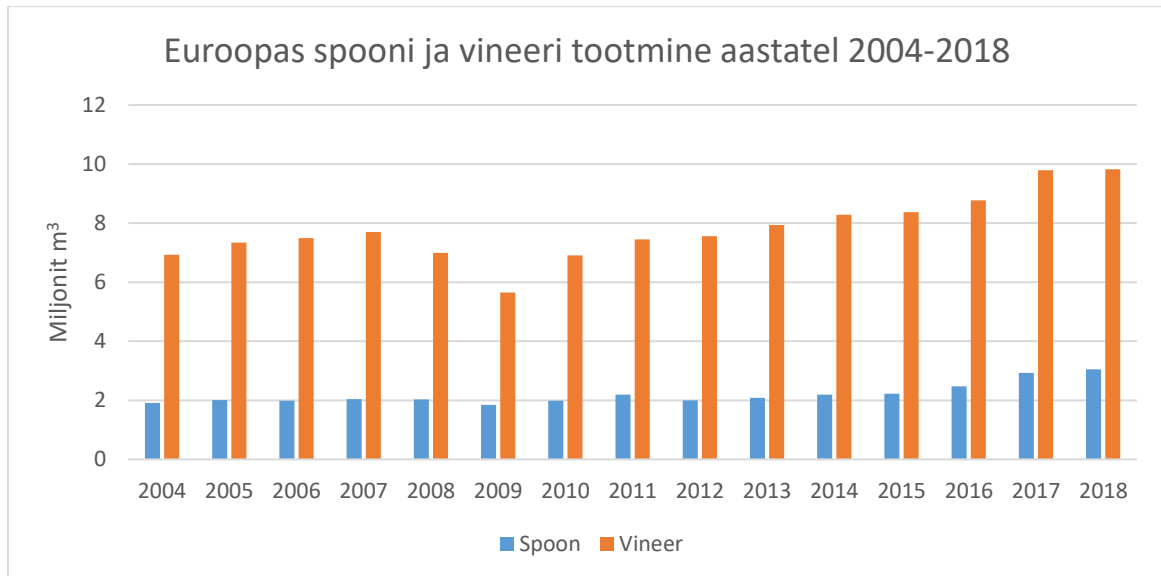
Ülemaailmselt on vineeritööstusel suur jalajälg, mis üldiselt on iga aastaga kasvamas. Viimase kahe kümnendi jooksul oli erandiks 2008. aastal alanud ülemaailmsest majanduskriisist tingitud langus, mistõttu 2009. aastal langes ülemaailmselt tootmine. 2010. aastaks oli kasv taas alanud ning kogu tootmismahut jäi ainult natuke alla 2007. aasta mahule ning edasi kasvas vineeri tootang kümnendi jooksul 76%, 92 miljonilt kuupmeetrilt 2007. aastal 162 miljoni kuupmeetrini 2016. aastal, pärast mida on jõutud platoonile tootmismahutades. Spooni tootmine on palju vähem muutunud, jäädes ilma langusest pärast majanduskriisi algust ja kasvades stabiilselt iga-aastaselt.



Graafik 1. Aastatel 2004-2018 ülemaailmselt toodetud vineeri ja spooni maht miljonites kuupmeetrites [7].

Euroopas on võrreldes ülejäänud maailmaga üldiselt sarnased trendid, kus mahud kasvavad iga-aastaselt kuni majandusraskusteni. Erinevus oli aga selles, et kriisi põhja

jõuti alles 2009. aastal, kus juures vineeri tootmine kukkus peaaegu 33%. Kriisijärgne taastumine oli samuti aeglasem, ületades varasema tootmise rekordi alles 2013. aastal. Spooni tootmine nii kõvasti ei kannatanud, isegi kasvas 2008. aastal ja korraks langes 2009. aastal ning peale seda on järjepidevalt kasvanud. Samas on vineeri tootmine majanduslangusele eelnevate aegadega võrreldes kasvanud 27%, kuigi spooni tootmisega on paremini läinud, kasvades peaaegu 50% 2018. aastaks võrreldes 2007. aasta toodanguga.



Graafik 2. Aastatel 2004-2018 Euroopas toodetud vineeri ja spooni maht miljonites kuupmeetrites [7].

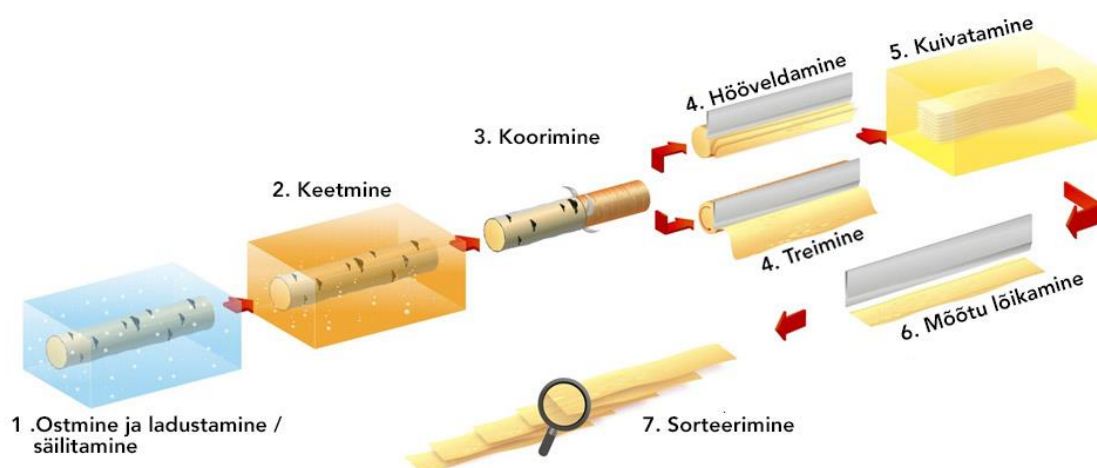
Vineeri ja spooni populaarsus materjalina on aja möödudes ainult suurenenud, hoolimata 2008. aastal alanud ülemaailmsest majanduskriisist, jõudes hiljemalt poole kümnendiga ületada kriisieelse tootmise taseme. Maailma vineeri tootmine on seejuures palju suurem võrreldes kümnenditaguse ajaga, demonstreerides selle materjali populaarsust üleilmselt. Euroopas toimus kasvu-languse-kasvu trend sarnaselt, aga kerge viivitusega ja suurema langusega ning väiksema hilisema kasvuga, kuid sellegipoolest ületades kriisi eelse tootmise. See võib olla põhjustatud Euroopa väikesest rahvastikukasvust ja juba arenenud majandusest ning infrastruktuurist, mis vähendab nõudlust uute projektide jaoks. Ikkagi on vineer vägagi populaarne ja moderne toode, olenemata ajaloost, mis ulatub tuhandeid aastaid tagasi.

### 3. SPOONIPÕHISTE TOODETE VALMISTAMINE JA TURG

Puidu kasutamine ehituses on kiirelt kasvamas. Sellest valmistatud materjalid ja konstruktsioonid on oma omaduste poolest paremad alternatiivid ehitamiseks linnades, lubades projekte ellu viia kiiremini, kergema lõppmassiga ja samas ümbritsevat keskkonda vähem negatiivselt mõjutades. Kuna puidust tooted saab enne ehitusobjektile saabumist juba eelnevalt kokku monteerida ja seetõttu kohapeal kiiresti paigaldada. See aitab veelgi vähendada ehitamiseks kuluvat aega ja tasuvusaega, parandades kvaliteeti ja minimaliseerida ehitusobjekti ümbritseva piirkonnale tekitatud ebameeldivusi [8].

#### 3.1 Spooni tootmine

Spoonitootmise protsess on paljuski jäänud samasuguseks, kui algas vineeri tööstuslik tootmine 20. sajandi alguses, kuigi sõltuvalt asukohast võivad mõningased muudatused protsessi olla sisse viidud. LVLi ja vineeri tootmise sammud on suuresti samasugused, erinevused tulevad spooni kihtide ladumisel, kuumpressimisel ja edasistel sammudel tootmises [4].



Joonis 1. Spooni tootmise protsessi osad [9].

### **3.1.1 Toormaterjali valik spooni valmistamiseks**

Spoonitootmisele eelnevalt toimub toormaterjali valik. Kasutatakse nii okas- kui lehtpuitu ja nende vahel valitakse vastavalt toote lõppkasutuseks vajalikele omaduste esinemisele puiduliigiti ning rahvusvahelisel turult saadavuse järgi [10]. Üldiselt toodetakse LVLi okaspuidust, aga on ka erandeid, kus Saksa firma Pollmeier toodab pöögist „BauBache“ nimelist LVL toodet [11]. Antud näide demonstreerib, et spooni tootmine kohaneb vastavalt toormaterjali olemasolule. Seda ilmestab veel vineeritööstuse algusaegadel USAs spooni tootmiseks kasutatud Douglase nulgu, millel oli tihti tüve diameeter üle 1,5m. Tänapäeval kasutatakse tihti ainult 30cm diameetriga kuuse või kase palke vineeri tehastes [10]. Samuti on peale palgi ristlõike suuruse muutunud ka toorme kvaliteet, sest vineeritööstusel tuleb võistelda teiste tööstusega nagu puidumassi või paberi tööstus ja ka Eestis aktuaalseks teemaks olev biomassi põletamine elektri tootmiseks [4].

Euroopas on suurenemas lehtpuude varu, milleks on peamisel pöök Kesk-Euroopas, millel võib olla tõenäoline efekt vineeri tootmisele Euroopas tulevikus. Peale minimaalse läbimõõdu, mis on umbes 25cm, on palkidele veel teisi nõudeid vineeri tootmiseks. Põhiliselt vaadatakse, et ladva poolne palgi kitsenemine oleks minimaalne ja palk ise oleks võimalikult sirge koos minimaalse hulga oksakohtadega ja mädanikuvaba [10]. Samas on uuemates paneelides kasutatud ka kuni 75mm suuruste oksakohtadega ja 25mm laiuste pragudega tooret ning üleüldine nõue palkidele on taganenud esimese ja teise klassi saepalkide juurde [12].

Tavaliselt toimub Põhjamaades puidu lõikamine metsas talviti, peale mida saadetakse palgid saeveskitesse. On leitud tõendeid, et männipuidul esineb sõltuvalt raiumise aastaajast suuri füüsikalisi-keemilisi omaduste muutusi, mis avalduvad vineeri pinna omadustes ja liimi sidemete tugevuse suurenemise osadel vaikel, tänu millele võib väheneda tööstuses vajaminev liimi kogus või toote üldiseid omadusi parandada [4].

### **3.1.2 Palgi eeltöötlemine**

Esimene samm spooni tootmiseks on palkide keetmine või aurutamine, et muuta puit pehmemaks ja lihtsustada sellelt koore koorimist ja selle järgselt treida või hõõveldada vastavalt edasisele kasutusvaldkonnale. Keetmisele eelnevalt toimub palkide pikkuse, diameetri- ja kvaliteedipõhine sorteerimine kimpudeks, mis ühendatakse omavahel

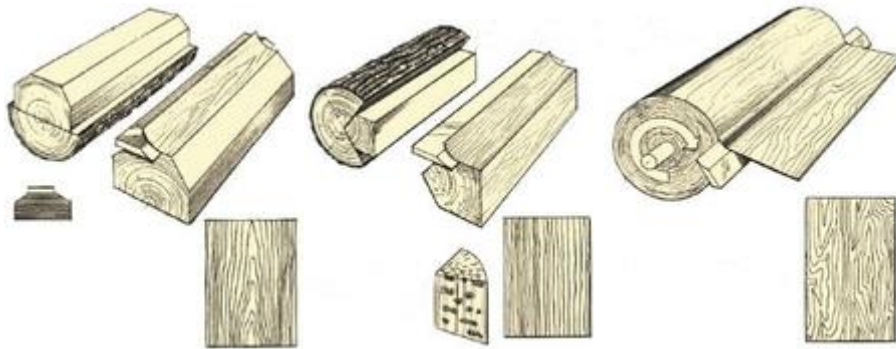
metallkettidega ja lastakse suurtesse vannidesse, kus toimub keetmine. See muudab palgilt koore eemaldamise kergemaks ning teeb puidu pehmemaks, mis lihtsustab hilisemalt treimist, parandades hilisema spooni kvaliteeti ja pinna siledust [13]. Tänapäeval on keetmisprotsess arvuti poolt juhitud, kestes umbkaudu 24-48 tundi. Töötlemisele eelnev õhutemperatuur, milles palk seisnud on, selle diameeter ja südamikute temperatuur omavad siin olulist rolli, sest nendest sõltub, kui kaua võtab aega, et palk soojeneks ühtlaselt, sest umbes 30cm diameetriga palgi südamikute soojenemine võib võtta 18 ja 24 tunni vahele jääva aja. Temperatuur keetmisel sõltub sellest, milleks materjali järgnevalt kasutama hakatakse. Vineeri tootmiseks kasutatava spooni tegemiseks on vee temperatuur umbes 40°C, samas kui mööblispooniks minevaid kasepalke keedetakse isegi kuni 70°C vees. Teine meetod vedelikus keetmise asemel on nende soojendamine kuuma auruga, mida kasutatakse tihti pöögi töötlemisel [4]. Samuti on arendamise infrapunakiirgust kasutavad meetodid, aga selle juures pole lahendatud probleemi, et kuivatatud materjali mahud ei ole tänapäevase tootmise vajadusi arvestades veel piisavad [14].

Kuumtöötlemisega saab vähendada treimisel tekkida võivat spooni pinna lõhenemist. Nende lõhede tihedus ja sügavus mõjutavad oluliselt materjali pinnaomadusi kihtide omavahelistes sidemetes vineeris ja LVLis [15]. Samuti toimuvad keemilised muutused puidu rakkude seinamembraanides, kus erinevad polümeerid saavutavad klaasistumistemperatuuri. Selle protsessi jaoks on vaja eelnevalt palgid sorteerida, sest muidu toimuks erineva suurusega palkidega ebaühtlane keemine – peenemad palgid „keedetakse üle“ ja suurema diameetriga palk ei pruugi südamikuni töödeldud saada. Mööblispoonide ülekeedetud puidu saab ära tunda roosaka või punase värvuse järgi ja alakeedetud on kollane. Eelistatuim on puidu loomulik värvus [4].

### **3.1.3 Spooni koorimine**

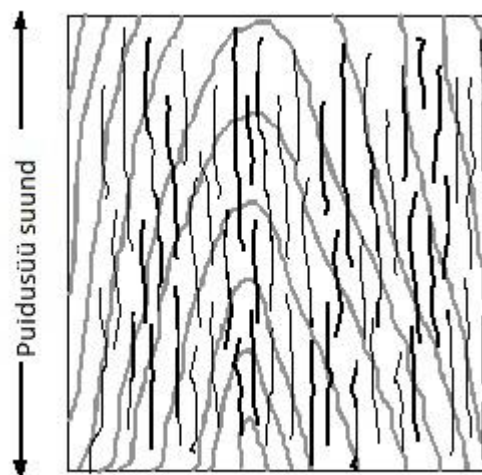
Vineeri ja LVLi tootmiseks on vaja selle koostiseks olevad spooni lehed eelnevalt palgist eraldada. Üle 90% spoonist treitakse ehk kooritakse, aga dekoratiivseks kasutuseks minevat spooni võidakse ka saagida või lõigata palgist. Spooni treimine jaotab puidu defektid üle terve spoonilehe laiali ja koos lamineerimisega omavad need lõplikus tootes väiksemat efekti, luues tugeva homogeense toote. Treimisel lõigatakse, sarnaselt õuna koorimisega, pöörlevast palgist õhukese kihina pikk spooni riba. Kuna selle käigus muudetakse ümmarguse kujuga palk tasapindseks plaadiks, siis tekivad praod sellele spooni poolele, mis oli palgis südamikute poole. Need praod on puidusüüga paralleelse

suunaga ja need esinevad läbi terve spoonilehe paksuse, kusjuures nende sügavus võib kohati olla 70-80% sellest ning need on kaldus nurga all. Lehtpuidu, näiteks kase, spooni paksus on tavaliselt 1,5 mm ja okaspuidul vineeri ja LVLi tootmiseks on need keskmiselt 3 mm paksusega [4].



Joonis 2. Spooni tootmine tangentsiaallõigetega, radiaallõigetega ja koorimisega [16].

Enne treimist on palk kooritud ning järgatud sobilikuks pikkuseks ja kontrollitud, et palk ei sisalda metalli, mis võiks kahjustada treimiseks kasutatava noa tera. Palk tõstetakse käppade vahel noa lähedale ja enne noaga kontakti surub eraldi tala palgile, mis lisab kokkusuruvat jõudu, et noa kontaktil ei tekiks puidu purunemist [12]. Rullikud mõlemas otsas kontrollivad survet noale ja talale [4]. Noa tera teravus, tera nurk, mille all palki treitakse, survet andva tala surve, palgi temperatuur ja selle pöörlemise kiirus mõjutavad treitava spooni kvaliteeti ning ka sellel esinevate pragude tihedust [17].



Joonis 3. Pragude tekkimine vineerplaadi pinnal toimub puidusüü suunaga paralleelselt [15].

Järgnevalt võidakse spoonidele teha kontrollimised, et neil puuduksid defektid või muud ebakorrapärasused. Avastades mõned, nagu näiteks plekid värvuses, saab need giljotiiniga välja lõigata. Seejärel sorteeritakse spoonid niiskuse sisalduse järgi, et toimuks võimalikult ühtlane kuivatamine [4].

### **3.1.4 Kuivatamine**

Kuivatamise eesmärgiks on spooni lehtede kuivatamine ühtlasele niiskusprotsendile, mis on sobiv liimimiseks ja kuumpressimiseks. Samas tuleb ettevaatlik olla, et ei toimuks „üle kuivatamist“, millest tingituna võib väheneda spooni pinna pindaktiivsus ja sellest tulenevalt kannatavad sideaine ja puidu vaheliste sidemete tugevus [4].

Kõige levinum spooni kuivatamise meetod on kuumaõhuahjus konvektsiooni meetodil. Tavaliselt on need ahjud mitmetsoonilised, kus näiteks esimeses spooni kuumutatakse, teises eraldatakse vaba vesi ning kolmandas puidus seotud vesi ja temperatuur on protsessi vältel 150-200 °C, mis on piisav, et kuivatada individuaalne spooni leht paari minutiga [18]. Spoonis olev niiskus võib esineda heterogeenselt ja sellest tulenevalt võib leiduda kuivemaid ja märjemaid regioone, millel on võimalik kuumpressimist mõjutada. Kui spoonile jäävad alles niiskemad piirkonnad, siis kuumutamisel võivad tekkida vee aurumisest tingitud surve kasvamisest tekkida spooni villid ja lõhed [4]. Et hoida ära olukordi, kus toimub spooni kahjustumine kuivatamise käigus, on vajalik seda eelnevalt täpselt ruumiliselt kaardistada, et saada täpne ülevaade võimalikest probleemkohtadest [19].

Õhu soojendamine on energiakulukas tegevus ja sellest tingituna on tegemist puidu töötlemise protsessis kõige suurema energianõudlusega osaga, mis võib osakaaluna olla 70% kogu tehase energiakulust ja 60% tervest protsessist [20]. Kui selles osas on võimalik ka natuke parandada protsessi efektiivsust, siis oleks kogu ahelale vajamineva energia hulk märgatavalt väiksem. Seetõttu on katsetatud teisi võimalikke kuivatamismeetodeid, näiteks kontaktkuivatamine, kus kuuma plaadi ja spooni otsese kontaktiga proovitakse spooni kuivatada [21].

Kuivatamise järgselt ja enne sideaine peale kandmist spoonid jahutatakse ning kontrollitakse nende erikaalu ja niiskussisaldust. Need kaks omadust on väga tähtsad vineeri ja LVLi tugevusnäitajate määramisel, sest erikaal näitab mehaanilist tugevust ja niiskusest sõltub kui hästi erinevad kihid omavahel seostuvad. Tänapäeval on need

katsed spoonile mittepurustava iseloomuga ning need viiakse läbi mikrolaine tehnoloogial põhinevate seadmetega. Sellega on veel võimalik märgata oksakohti ja teisi võimalikke defekte [4, 18].

### **3.1.5 Spooni liitmine ja parandamine**

Üks paljudest vineeri ja LVLi eelistest on nende suur kasutegur toormaterjali kasutamisel. Kuna spooni kvaliteet võib olla muutlik, siis osa treitud materjalist võib osutada kasutuskõlbmatuks ning lõigatakse välja või palgi väikse diameetri tõttu pole kooritud leht piisavalt pikk. Vastuseks nendele probleemidele on individuaalsete spoonide omavahel liitmine, mistõttu ei ole spooni lehe pikkus enam palgi suurusel sõltuv. Kui seda teha puidusüüga samas suunas, siis saab erinevad lehed omavahel ühendada hammastapiga, sest see annab neile piisava kattuvuse ja sidemete tugevuse. Puidusüüga risti liites tuleb muid meetodeid kasutada, näiteks kuuma sulatatud liimiga otste omavahel ühendamist. Lisavariandina saab liimiga kaetud kiuga erinevad lehed „kokku õmmelda“, mis seob need võrreldes niisama liimiga kleepides. Peale suurema ühendatud spooni kokku saamist võidakse see taaskord sobivasse suurusse lõigata, et olla sobiv traditsiooniliste vineerplaatide mõõtmetele [10]. Kui hiljem vineeri valmistamise ajal avastatakse masinatega kontrollides mõni oksakoht või muid defekte, siis saab selle vineeri osa välja lõigata ja defektita plaadiga kokku liita [4].

### **3.1.6 Spoonide liimimine ja vineeritooriku valmistamine**

19. sajandi alguses leiutatud fenoolformaldehüüd- liimid said esimesteks laialdaselt spoonide liitmiseks kasutusele võetud sideaineteks. Fenoolformaldehüüd on termoreaktiivne vaik, mida on kasutatud väga laialdaselt välistes tingimustes, sealhulgas ka mere ja ookeani keskkondades. See on võimalik, sest sellel on väga head füüsikalised omadused - suurepärase veekindlus ning vastupidavus kõrgetatud temperatuuridele. Seetõttu toodetakse ilmastiku- ja veekindlat vineeri just selle vaigu põhiste liimidega. Sisemisteks kasutusteks minevate puittoodete jaoks on populaarsed teistsugused fenoolil põhinevad vaigud, karbamiidformaldehüüd ning melamiinkarbamiidformaldehüüd. Need on värvuse poolest heledamad ning nendest ei jää peaaegu üldse nähtavaid liimijälgi, erinevalt fenoolformaldehüüdist, mis on tumeda punakas-pruunika värviga ja liimisel jäävad märgatavad jäljed. Samas on neil fenoolformaldehüüdiga võrreldes madalamad tugevusnäitajad ja niiskustaluvus, mis on



karbamiidformaldehüüdil väiksem kui melamiinkarbamiidformaldehüüdil, olles kergesti hüdrolüüsuvad [4].

Nende kolme kasutamisel on tänapäeval üks peamisi probleeme nende sisalduses olev formaldehüüd, mis on teatud kui üks paljudest vähki tekitavatest ühenditest ning seetõttu toimub aktiivselt alternatiivide otsing. Põhiline probleem uute ainetega on halb ilmastikukindlus, mistõttu on fenoolidel põhinevad ained veel laialdaselt kasutuses välistes oludes [22]. Üks sojajahu baasil toodetud liimidest on firma Solenis poolt arendatud ja müüdud Soyad [23]. Täispuittoodetes on potentsiaali ka polüuretaanide ja isotsüanaatidel põhinevatel vaikuldel, kuid nende kasutamise võimalikkus spoonist toodetud vineeris ja LVLis võib olla piiratud. Suurest huvist hoolimata ei ole turule jõudnud tehnoloogiad, mis valmistavad vaikusid tanniinist, ligniinist, juurvilja õlist ja teistest bioloogilistest toorainetest [4].

Vedelaid liime saab mitut moodi materjalile kanda, näiteks pihustades, joana peale valades või liimirullikute vahelt läbi lastes. Pihustamisel ja joana peale kandmisel on eeliseks liimi hea kattuvus üle terve pinna aga rullikud on samas mitmekülgsemalt kasutatavad [4]. Fenoolformaldehüüdi kuiv osa moodustab lahusest 45-55% tavaliselt ja karbamiidformaldehüüdis on see 65% ning see lahustatakse pulbrina vees. Peale kantuna materjalile on fenoolformaldehüüdi keskmiselt 100-244g/m<sup>2</sup> [24].

Põhiliselt kasutatakse vineeride ja LVLis spoonide liimimiseks termoreaktiivseid vaikusid, aga on olemas ka termoplastilised polümeerid, mis saavad neid asendada. Nende kasutamisel on eelisteks, et pärast plaadi kokku liimimist on sellel võimalik soojusega kuju muuta vastavalt vajadusele [4]. Soome ettevõtte UPM Plywood pakub sellist lahendust UPM Grada® 2000 tootena, mida saab juba kuumutades 95°C-ni vormida [25].

### **3.1.7 Liimid**

Puitkomposiitides kasutatakse tänapäeval üldjuhul termoreaktiivseid sünteetilisi liimivaike. Kõige enam on kasutusel tööstuses järgnevad vaik-sideaine kooslused: fenoolformaldehüüd, karbamiidformaldehüüd, melamiinformaldehüüd ja isotsüanaadid [26, 10].

Lamineeritud materjalil on tavaliselt terve laminaadi ulatuses kantud sideaine kiht, mis lubab pingetel ühtlaselt jaotuda üle terve laminaadi pindala. Lamineeritud puidul on suur koormus puidusüü pikkisuunas, mis tekib puidu dimensionaalsetest muudatustest, kui see paisub või kahaneb erinevustes niiskuse tasemes, sest iga kiht on järgmisega võrreldes risti. Seega peab vinneri sideaine peamiselt vastu pidama sisepingetele tahvli endas, sest iga risti olev kiht aitab ära hoida teise kihi dimensioonide muutumist. Need vineertooted, mida hakatakse kasutama välistes oludes, peavad nendele sisepingetele vastu pidama ja samaaegselt peavad sideaine ja spoonivahelised sidemed olema vee hüdrolüüsivale toimele veelgi parema vastupidavusega [27].

### **Fenoolformaldehüüd**

Fenoolformaldehüüd (FF) vaigud, mida kutsutakse ka fenoolvaiguks, on tüüpiliselt kasutusel ehituses kasutatava vineeri ja laastplaatide (OSB) tootmiseks, kus võib vaja minna ilmastikukindlust toote kasutamise käigus. FF vaikude halvaks omaduseks on nende aeglane kõvenemine võrreldes teiste fenoolvaikudega ja seega on nendes puitkomposiitides, kus tootmisel kasutatakse kuumpressimist, vajalik neid kauem pressida kõrgematel temperatuuridel. Tihti laotatakse pärast pressimist kuum materjal teineteise peale, et vähendada pressimiseks kuluvat aega ja samas saavutada piisav vaigu kõvenemine. See kuumtöötlemine koos pressimisega annab materjalile fenoolsidemed, mille tagajärjel on materjalil väga väikene hügroskoopsus. Kõvenenud fenoolvaigud on ka hea temperatuuritaluvusega, millest tingituna nende sidemed jäävad stabiilseks kõrgetel temperatuuridel. Seetõttu on neid sidemeid kutsutud isegi keetmiskindlateks, omades võimet jääda mehaaniliselt ja dimensioonilasel muutumatuks ka materjali märgudes. Samas annab FF tootele võrreldes teiste liimidega tumedama värvi ja seega ei ole see sobiv kasutamiseks kohtades, kus on toote lõppvälimisel oluline koht, näiteks mööblis või sisemistel paneelides. Sisemiseks kasutamiseks on takistuseks formaldehüüdi eraldumine toodetest, kus FF liime on kasutatud [26].

### **Karbamiidformaldehüüd**

Karbamiidformaldehüüd (UF) liimidega valmistatakse peamiselt sisekasutuseks minevaid tooteid, näiteks puitlaastplaate ja keskmise tihedusega puitkiudplaate (MDF). Sellel põhjuseks on tõsiasi, et erinevalt FF sidemetest, UF liimide sidemed hakkavad

lagunema niiskuse olemasolul. Samuti hakkab kõvastunud UF keemiliselt lagunema liigse kuumuse tõttu ning seepärast tavapäraselt pärast kuumpressimist spetsiaalselt jahutatakse vineeriplaadid. Samas on eeliseks võrreldes FF liimidega UF madalam kõvastumise temperatuur ja lihtsus nende kasutamisel erinevates liimi kõvastamise protsessides. Lisaks veel on UF odavam võrreldes teiste termoreaktiivsete liimidega ning selle värvus on hele, mistõttu saab seda kasutada olukordades, kus tootel on dekoratiivsed omadused tähtsad. Formaldehüüdi lendumine aja möödudes on samuti siin probleem, mis on ohuks tervisele [26].

### **Melamiinformaldehüüd**

Melamiinformaldehüüd (MF) vaike kasutatakse põhiliselt dekoratiivsetes laminaatides, paberi töötlemisel või katmiseks ja on üldiselt kallimad kui FF vaigud. Sellegipoolest kasutatakse neid ka puitkomposiitide valmistamiseks, tihti koos UF vaikudega koos kombineerides. MF-UF vaigud on heleda tooniga ja vähemärgatavad ning omavad paremat veekindlust kui puhtad UF vaigud [26].

### **Isotsüanaadid**

Puidutööstuses on isotsüanaatide all mõeldud polümeerseid metüleen diisotsüanaate (pMDI) ja on alternatiiviks FF vaikudele. Peamiselt kasutatakse pMDI vaike laastudest tehtud polümeeride tootmisel. Need on kallimad võrreldes FF vaikudega, aga on samaaegselt kiirmini kivistuvad ja neid saab kasutada kõrgema algse niiskussisaldusega puitmaterjaliga. pMDI vaike kasutatakse ka koosluses teiste vaikudega, kus laastplaadi keskmes asuvad kihid liimitakse sellega ning välimised kihid aga liimitakse aeglasemalt kõvastuva FF liimiga. Erinevalt fenoolvaikudest, on pMDI vaigud ohtlikud enne kõvenemist ja seega tuleb kasutada spetsiaalseid kaitsevahendeid terviserikest hoidumiseks, samas kõvenenud pMDI vaigud pole enam ohtlikud inimestele [26].

### **Bioalternatiivid**

Looduslikeks liimideks on peamiselt proteiinidest koosnevad liimid, mis olid laialdaselt kasutusel enne 1970. aastaid, kui need asendati FF liimidega, tingituna fenoolsidemete paremast vastupidavusest kasutusel. Tänapäevane suundumine on huvi rohkem

taastuvatest allikatest toorainete kasutule võtmise vastu, taas on tekkinud huvi seda tüüpi liimide järele. Üks võimalikke asendajaid sünteetiliste ainete asemel on arendatud ja müüki paisatud sojapõhised liimid, mille sidemete tugevus on võrreldav FF liimide omaga. Sarnaselt sojaga on võimalik vastupidavaid vaike toota ka ligniinist ja tanniinist. Ligniini liimi on võimalik toota kasutatud paberimassist, mis tekitab puidu töötlemisel paberi või keemilise lähteaine tootmiseks. Ligniini kasutatakse puitkiudplaadi märjas tootprotsessis sideainena, sest seda leidub looduslikult lignotsellulooses toormes, aga sellele lisatakse juurde natuke FF vaiku täienduseks. Tanniin on looduslik fenoolil põhinev ühend ja seda leidub paljude puuliikide koostises. Selle eraldamisel koostisest ja modifitseerides fenoolformaldehüüdi olemasolul, saab reaktsioonis vahepealse polümeeri, mida on võimalik kasutada termoreaktiivse liimina [26].

### **Sobiva vaigu valimine**

Enamasti on ühes tootegrupis domineeriv ühte tüüpi vaiku, aga teistel on, nagu eelnevalt loetletud, omad eelised. Arvestada tuleb erinevaid soovitud toote ja olemasoleva toorme omadusi ning siis nende järgi valida, näiteks materjalid, mida soovitakse omavahel siduda, niiskuse sisaldus liidetavatel osadel liitmise hetkel, lõpptootele vajalikud mehaanilised omadused, vastupidavuse nõuded, eeldatud toote kasutusvaldkond ning vaigu enese maksumus [26].

FF, UF ja pMDI vaigud on ja eeldatavasti ka jäävad lähimatel aegadel põhilisteks kasutatavateks liimmaterjalideks puitpolümeeride tootmisel. Muutused võivad tekkida, kui nafta ja selle põhjal toodetud naftasaaduste kättesaadavus või hind muutub piisavalt ebameeldivaks, et bioloogilised alternatiivid oleksid odavamad ja lihtsamalt soetatavad, kui nende sünteetilised vastandid. Lisaks veel on karmistumas seadused ning regulatsioonid formaldehüüdi sisaldavate toode jaoks, sest sellest lenduvad formaldehüüd ühendid on tervisele ohtlikud ning rikuvad siseruumides õhukvaliteeti. Seda arvestades on oodata, et vaikselt hakkavad looduslikud alternatiivid oma turuosa suurendama [26, 10].

### **Lisandid**

Puitpolümeer komposiitide tootmisel lisatakse lõpptootele soovitud omaduste saamiseks või võimendamiseks juurde lisandeid. Üheks kõige tavalisemaks aineks, mida lisatakse,

on vaha, mis annab tootele vastupidavuse märgumisele. Puitlaast- ja puitkiudplaatides aitavad märgumisel vaha osakesed tagada lühiajaliselt veekindluse ning ära hoida mõõtmete muutumise. Vaha maht, et hoiduda märgumisest, võib kogu materjali hulga peale olla väga väike (0,5...1%) [26].

Ajutine veekindluse tõstmine aitab parandada toote kvaliteeti järgnevatel liimimistel või kaitseb selle omadusi kogemata märgumisel tootmise ajal või järgselt. Samas ei aita vaha lisamine kaitsta veeauru imendumise ja õhuniiskusest tingitud ristlõike muutumistest. Lisaks veekindluse parandamisele lisatakse veel konservante, tuleaeeglusteid ja hallituse tõrjujaid [26].

### **3.1.8 Eelpressimine ja kuumpressimine**

Pärast liimikihi lisamist spoonidele laotakse need teineteise peale, kuni need saavutavad nendest valmistatava plaadi soovitud paksuse. Vineeril laotatakse iga kiht ristisuunas võrreldes eelnevaga, nende arv on paaritu ja mõlematel välimistel spoonidel on puidusüü suund paralleelne, mis aitab ära hoida hilisemat kaardumist ja muid ebasoovitud dimensioonide muudatusi. LVLis laotakse üldiselt kõik spoonid samasuunaliselt. Enne eelpressimist liimiga kaetud materjalil seista, et see saaks spooni sügavamale sisse imbuda, mis võib pressimise järgselt parandada sidemete tugevust [18, 10].

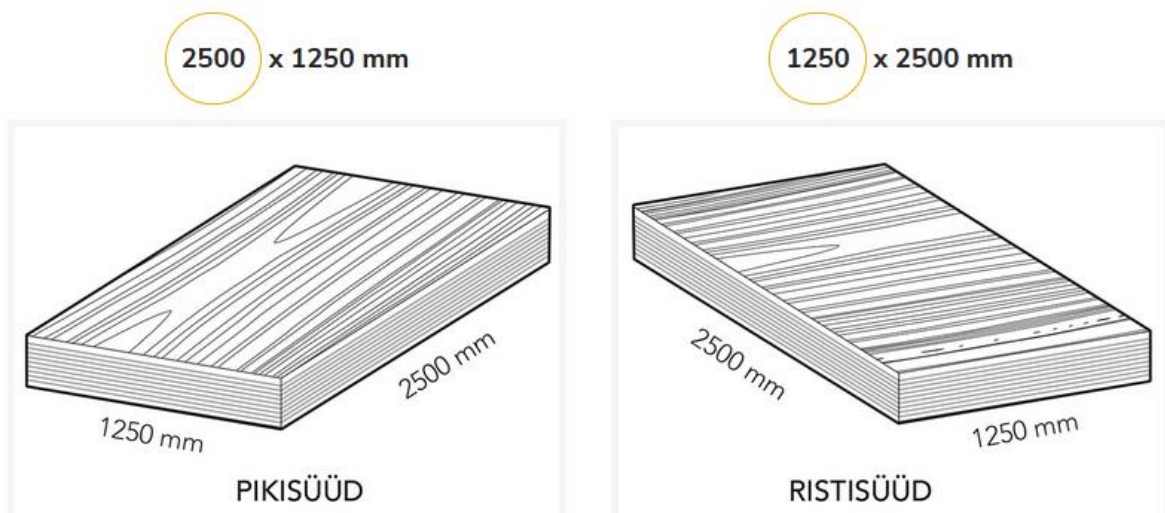
Kui spoonid on laotud, toimub eelpressimine, et algaks sidemete loomine erinevate kihtide vahel. Sellele järgneb kuumpressimine, et muuta plaat üheks monoliitseks osaks ja et vaik kõvastuks. Kuumpressimisel sõltub pressi plaatide temperatuur kasutatavast sideainest, kus fenoolformaldehüüdil on see 130°C ning karbamiidformaldeüüdil on see natuke kõrgem. Pressimisel kasutatav surve ja aeg on otseselt seotud pressitava plaadi paksusest, sest mida paksem on plaat, seda kauem läheb aega, et plaadi südamikus olevate spoonidel olev vaik ka kõvastuks [4].

## 3.2 Spoonipõhised tooted

Spoonist on võimalik toota väga erinevaid komposiitmaterjale, mis on tinginud selle populaarsuse. Erinevate spoonide kasutamine annab eeliseid, mida täispuit materjalidel pole ning lubab kasutada toormaterjali efektiivsemalt ning kaasata ka varem mitte või alakasutatud liike.

### 3.2.1 Vineer

Vineeriks nimetatakse mitmekihilist paneeli, mis koosneb mitmest erinevast spooni kihist. Nende kihtide arvuks on paaritu arv, kuigi ettenähtud paksuse saamiseks võidakse lisada keskele lisa spoonikiht. Iga kiht on eelmise kihi kiudude suunaga võrreldes risti, et tõkestada plaadi kaardumist ja see annabki vineerile tuntud triibulise serva. Ühe kihi võib moodustada üks monoliitne spoonileht või mitu, mis on omavahel kokku liimitud ja mille kiudude suunad on paralleelsed. Vineeri kihtide arvuks loetakse seda arvu, mis näitab mitu korda puidusüü suund muutub. Plaadi keskmiseks kihiks on võimalik kasutada spooni, saepuitu, puitlaastplaati või puitkiudplaati, millest kõige tihemini kasutatakse täielikult spoonist toodetud vineeri [26]. Vineerplaadi mõõtude esimene arv näitab mõlema poole pealmise kihi puidusüü suund jookseb [28].



Joonis 4. Vineertahvli mõõtude esimene väärtus näitab, mis suunas puidusüü jookseb [28].

Vineeri kasutusvaldkonnad on väga laiad, alustades ehituses kattematerjalina, mööblis ja dekoratiivkatetes, kuni olles teistes osana puitkonstruktsioonides, nagu näiteks eelvalmistatud I-talades, kast talades, pinge all olevates paneelides ja vineerpaneelidest tehtud katustes [26].

### **Vineeri omadused**

Vineeri omadused sõltuvad selles kasutatud spooni kihtide kvaliteedist, nende järjekorrast, sideainest ja liimimiseaegsest protsessi kontrollist tootmise ajal. Puidu ja sideaine vaheliste sidemete vastupidavusel on suur tähtsus kasutatud sideainel, kuid oluline roll on ka liimimise ajal protsessi tingimuste kontrollimisel ja spooni kvaliteedil. Vineerplaadi lõpliku kvaliteediklassi määrabki spooni kvaliteet, kus põhirõhk langeb kahele välimisele kihile mõlemal pool plaati [26].

Vineerplaatidel on võrreldes sarnaste täispuitplaatidega palju suurem vastupidavus paindumisele, nii plaadi pikki- kui ka ristisuunas ja selle tugevus ning jäikus on ühtlasemalt jaotunud üle terve plaadi pindala. Lisaks on vineeril palju parem võime hoiduda niiskusest tingitud dimensionaalsetest muudatustest, mis teeb sellest materjalist hea kandidaadi kasutamiseks kohtades, kus erinevad detailid on ühendatud sideainega liimitud tappidega. Vineeri teeb teistest, väiksematest osakestest tehtud paneelidest erinevaks tõi, et selle äärte paisumine vedelike toimel on minimaalne ja suuresti tagasipöörduv. Samuti saab vineerplaadi suhteliselt ääre lähedale kinniteid paigaldada, sest risti olevad kihid annavad hea vastupidavuse lõhede tekkimisele. Sellistes kasutusvaldkondades, kus sisemised oksakohad või tühimikud võivad probleemiks osutada, võib tellida vineeri, mille südamik on tahkest puidust ja mõlemad pooled on kaetud spoonikihiga [26].

### **Vineeri tüübid**

Kõige üldisemalt on võimalik vineeri jagada kahte erinevasse leeri – ehitus- ja tööstuslik vineer ning lehtpuidust ja dekoratiivne vineer. Ehitus- ja tööstuslikvineeri kasutuses on esmatähtsad füüsilised omadused ja välimusele on palju vähem rõhku pandud. Siiski leidub mõningaid klasse ka ehitusvineerile, kus siiski vaadeldakse pealmiste spoonikihtide välimust ja nendes hinnatakse pinna spooni loomulikku välimust või heledat värvust. Nende tööstuste jaoks on tavaliselt spooni valmistatud okaspuidust,

näiteks kuuse- või männipuust. Kõige tavalisem sideaine, mida selle eesmärgiga vineeri tootmiseks kasutatakse on FF [26]. Üks USA standard, mis seda kirjeldab, on Ameerika Ühendriikide NIST vabatahtlik standard PS 1-19 [29] või osaliselt ka Vene Föderatsiooni riiklik standard GOST 3916.1-96 [30].

Lehtpuu- ja dekoratiivset vineeri toodetakse väga laialdasest valikust puiduliikudest, kus paljud on eksootilisemad ja haruldasemad troopika- ja ekvatoriaalsetest oludest pärinevad liigid. Nende kasutamine toimub tavaliselt kontrollitud või sisetingimustes, kus toote välimus on esimene prioriteet, nagu näiteks mööblis ja seinakatetes. Samas leiavad need ka harvemini välistes tingimustes kasutust, näiteks laevade ja paatide ehituses ja nende sisustamisel, mistõttu liimitakse seda sorti vineeri ka veekindlate sideainetega. Suurem osa lehtpuidust toodetud ja müügil olevast vineerist tuleb juba tehases viimistletud kujul. Lehtpuidu- ja dekoratiivse vineeri kategoriseerimise aluseks rohkem parameetreid, kui ehituse ja tööstuslikuks kasutuseks minevale vineerile. Hinnatakse pindmise spoonikihi liiki ja selle välimust, sideaine vastupidavust ja plaadi keskmiste kihtide sisu (kas on spoonist, täispuidust, puitlaastplaadist, MDFist) (USA standard HPVA 2009) [26].

### **Erikasutuseks mõeldud vineerplaadid**

Vineeri on võimalik kergesti surve all töödelda veepõhiste säilitusainetega ja tuleaeglustitega ning kuna vineer üldiselt suuresti taastab oma algsed mõõdud peale märgumist, ei ole sideaine ja spoonide vahelised sidemed tundlikud veepõhiste kemikaalidega töötlemisele. Säärane töötlemine toimub tavaliselt sellele spetsialiseerinud ettevõtetes, mitte vineeri tootja enda juures. Märkimist väärib, et vineeri töötlemine on standardiseeritud ning seda saab määratleda kommertsstandardite alusel. Erikasutuseks valmistatud vineerplaate kasutatakse näiteks laevadel, betoonivalu vormideks või isegi teesiltides [26].

### **3.2.2 KOMPOSIITPUIT**

SCL (ing k structural composite lumber) leitud ajal, kui oli suurenemas nõudlus kvaliteetse saematerjali järele, aga selle omandamine oli muutumas raskemaks. Komposiitstruktuuriga puit koosneb väiksematest puidu tükkidest, mis on omavahel



kokku liimitud. Sellega saadakse puitmaterjali, mille mõõdud on sarnased, kui eelnevalt ühest suurest tükist tehtuna [26].

Komposiitstruktuuriga puidu alla mõistetakse mitut erinevat tüüpi komposiiti, millest üks komposiitmaterjal on lamineeritud vineerpuut. Teised on sellised, mis koosnevad pikkadest õhukestest puidukiududest, mis on omavahel kokku liimitud ja kuumpressitud kokku. Sõltuvalt kasutatud toorainest jagunevad need LSL (ing k laminated strand lumber), PSL (ing k parallel lumber strand) ja OSB (ing k oriented strand board) alamklassideks. Neid saab toota puiduliikidest, mida tavaliselt ei kasutata selliste materjalide tootmiseks, näiteks haab. SCLi jaoks saab rebida erinevate dimensiooniga laaste toormest vastavalt vajadusele. See aitab kontrollida lõpptootte omadusi, mistõttu on võrreldes tavapärasest saematerjalist toodetega, SCL tihti tugevam, vastupidavam ja võimalik toota suuremates pikkustes ja väiksemate dimensionaalsete muutustega [26].

Komposiitpuidu roll ja turuosa on suurenemas puidutööstuses tänu selle omadustele, et see on hakanud asendama teisi puitkomposiite ja eelvalmistatud puitdetaili, näiteks I-talasi, mille tootmiseks on antud materjalide ette arvatavad omadused eelisteks [26].

### **3.2.3 LVL**

LVLi on lamineeritud vineerpuuttoode, mille kasutusvaldkondadeks on alates majade ja sildade konstruktsioonide ehitusest remondini. LVL talad, paneelid on oma mitmekülgsuse ja ehitusliku vastupidavuse tõttu keskseks osaks paljudes tänapäevastes puitehitisetes [8]. LVLi tootmisel ei ole piiranguid erinevate puiduliikide kasutamiseks, mis lubab selles kasutada madalakvaliteetset või alakasutatud liikidest valmistatud toormaterjali [10].

LVLi tootmiseks kasutatakse põhiliselt okaspuidust tehtud spooni, milleks Euroopas on tavaliselt mänd ja kuusk. Kuuse eeliseks on hea kaalu ja tugevuse suhe ning selle väiksem vaigu sisaldus lihtsustab tootmist. Männil on suurem keskmine tihedus, mis annab sellest valmistatud materjalile paremad mehaanilised omadused. Euroopas leidub samas ka lehtpuidust, põhiliselt pöögist ja kasespoonist LVLi valmistajaid. Kuna lehtpuidul on võrreldes okaspuiduga erinevad füüsikalised omadused, keskmine tihedus

on suurem ning seega ka mehaanilised omadused paremad ja seetõttu on ka tootmisprotsessis erinevuseid. Seega kasutada erinevaid töömasinaid, mis okaspuidu korral pole vajalikud, näiteks kruviaukude ette puurimiseks. Lehtpuidu pinnad on samas ka hallituse suhtes tundlikumad [8].

Tavaliselt kasutatakse 3mm paksusi spoone, mis liimitakse omavahel kokku veekindlate fenoolipõhiste sideainetega. Sarnaselt vineeriga, ei sõltu lõpptoote dimensioonid liimimisel kasutatud materjali suuruselt, lubades LVLi tegemisel kasutada ka väikesete dimensioonidega palkidest pärit tooret. Samas on selle tootmine kallim kui tavalisest saepuidust valmistatud detailide puhul, aga nende eeliseks on, et sama tugev detail saab olla füüsiliselt väiksem ja suuremad kui saematerjalist on võimalik toota [8, 10].

Lamineerimise toimetel jagunevad erinevad defektid spoonis üle terve LVLi ja see tagab ehitusel vajaliku väga hea jäikuse ja tugevuse ning annab sellele väga kõrge, terasesega võrreldes kahekordse, tugevuse kaalu suhtes. Nagu vineeriga on LVL ka dimensionaalselt stabiilne, ei kõverdu, anna pinde ega lõhene otstest. Kuna LVL saabub tehastest juba kuivana, ei teki sellel ehitusel kokkutõmbumist, eeldusel, et see on hoitud ilmastiku eest kaitstuna. LVLi tootmine toimub juba soovitud ja vajatud suuruste järgi, mis eemaldab vajaduse hiljem sobivasse suurusesse saagimiseks ning vähendab materjali kadusid saagimisel [8, 10].

Otsade ühendamine võib toimuda erinevate tappidega, et minimaliseerida tugevuse kadu otstes ning lihtsam variant on kasutada pökkseotist. Osad tootjad müüvad juba tehases ettevalmistatud tappidega LVL plaate, tavaliselt on need hammasjätkud ja sõrmseotised [26].

Paralleelsete kihtidega vineeri on toodetud vähemalt 20. sajandi algusest saadik mööblitööstuse jaoks. LVLi ajaloo algus jääb 1940. aastate algusesse, kui oli suur nõudlus lennukite tootmises tugeva konstruktsioonimaterjali järele [26]. Laiema populaarsuseni jõudis see materjal 1970. aastatel Põhja-Ameerikas ja natuke hilisem ka Euroopas [8, 10].

### **Vastupidavus välistele tingimustele**

Parim meetod LVLi vastupidavust suurendada väliste mõjude eest, on selle varjamine otseselt nende eest, näiteks pikendades katust seinast kaugemale või vundamendi

kõrgemaks ehitamisega ning niiskust isoleerivate katete lisamisega vundamendi ja LVLi vahele [8].

Nii nagu kõikidel puittoodetel, muutub loomulikult LVLi pind ka halliks Päiksest kiirgava UV kiirguse toimel, kuid see ei mõjuta tugevusomadusi. Kui see on visuaalselt häiriv, siis on võimalik pind katta kaitsva kihiga või lisanditega, mis peab olema piisavalt paks, et UV kiirgus sellest läbi ei tungiks ja tervet pinda kattev olema [8].

Otsene kontakt veega, kas siis vihma või pritsmete kujul ning vee konvektsioonist teistelt kontaktis olevatelt pindadelt, peaks olema minimaalne. Samuti peab ehituse disain olema selline, et ehituse järgselt ei toimuks vee kogunemist õhu taskutesse konstruktsiooni vahel. Samas pole ajutine märgumine ehitamise ajal probleemiks, sest lühiajaliselt on LVLil hea vastupidavus välistingimuste suhtes ning ei kahjustu või alusta lagunemist. Kuid seejärel tuleks kindlasti need detailid ehituse ajal kuivatada, et taastuks eelnev puidu niiskussisaldus enne ehituse lõplikku katmist. Sideaine vastupidavus ehitise eluea jooksul toimub vastavalt materjali klassile [8].

LVL hakkab punduma vee sisalduse kasvades ja tõmbab kokku selle vähenedes nagu tavaline puit. Selle muutuse suurus sõltub paljuski puidukiudude suunast laminaadis ning osaliselt on see protsess pöördumatu. Märgumise tagajärjel võib seega tekkida jääv puidu deformatsioon ja see võib tekitada soovimatuid visuaalseid ebakõlasid, alates vineeri värvuse muutumisest, pinna pragunemisest ja vedeliku sisalduse kahanedes oksakohtade lõhenemiseni [8].

Liitekohad, kus on kasutatud kinnitamiseks näiteks polte, võivad lahti tulla paisumise ja kahanemise tsüklite tagajärjel. Suure läbivusega märgumisel ja sellele järgenval kuivamisel, võib pragunemine toimuda sügavamalt, kui ainult pinnakihis ja sellel võivad olla tõsised mõjud raskust kandvatele konstruktsioonide [8].

## **4. SPOONI JA SPOONIPÕHISTE TOODETE OMADUSTE PARANDAMINE, MODIFITSEERIMINE**

Metsadest pärinevast toormest tehtud materjalide kasutamine on keskkonnale positiivse mõjuga, kui neid kasutada pika elueaga projektides, mis annab võimaluse hoida atmosfääri sattumast puidus seotud süsihappegaasi. Paljud puidutöötlemise aspektidest on tänapäeval teada ning võimalik arvestada toote elutsükli, aga puudu on veel üleüldine arusaam, mis mõju on toote omaduste muutmisel toote võimekusele, keskkonnale ja elutsükli lõpetamise stsenaariumidele on paljuski veel teadmata suurus. Nende leidmiseks tuleb arvestustesse võtta töötlemise parameetrid, valmistoodangu omadused ja selle võimalikud keskkonnamõjud. Puidul põhinevatel tööstustel toimub pidevalt areng tootmisprotsessides, kasutatavates materjalides, et olla konkurentsivõimelised ja uute nõudmistega vastavuses. Esile on tõusmas loodussõbralikud viisid, kuidas saada puidule vajalikud omadused ja vormid [31].

Puit on kergesti kättesaadav, üldiselt inimestele ohutu ja odav biomassist koosnev taastuv ressurss. Oma looduslikust päritolust tingituna on sellel ka puudused, mis sõltuvad iga puu individuaalsetest erinevustest. Sellest tulenevad puidu kasutusele piirangud, mistõttu tuleb sellest toodetud materjali töödelda ja modifitseerida, et saavutada soovitud omadused ja funktsionaalsus. Puidu töötlemise eesmärk seega on parandada puidu olemasolevaid vormi ja funktsionaalsust ning samas hoida alles selle ökoloogiliselt sõbralikud omadused [31].

Tänapäeval on puitkomposiitides kasutatava spooni, puitosakeste või saepuidu töötlemise all mõeldud protsessi, mis parandab nende elementaarsete osade mehaanilisi, füüsikalisi omadusi või väljanägemist. Seda kutsutakse puidu modifitseerimiseks, sest protsessis olid ja jäävad materjalile alles loodusliku puidu iseloomulikud omadused ja selle hulka ei kuulu meetodid, mille käigus lahustatakse puitu ennast või selle kiudusid. Sellest tulenevalt pole puidu töötlemine mürgine tegevus ja selle elutsükli lõpus utiliseerimisel ei eraldu ka mürgiseid jääkained, mistõttu võiks toote realiseerimine olla ohtlikum, kui algselt töötlemata puidu kasutamine. Töötlemist tehakse, et parandada puidu nõrgimaid aspekte, nagu [31]:

- Halb vastupidavus UV kiirgusele.
- Halb vastupidavus ilmastikutingimustele.
- Suur tundlikkus niiskuse suhtes.
- Madal dimensionaalne stabiilsus.
- Madal kõvadus ja kulumiskindlus.

- Väljanägemise parandamine.

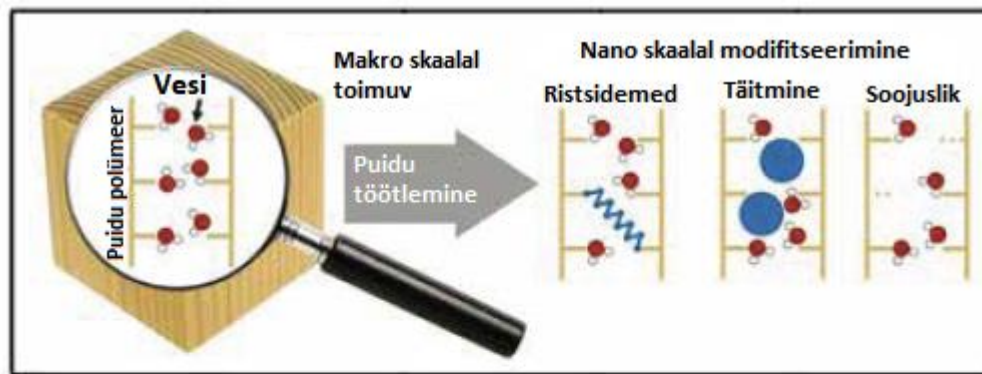
Puidu peamisteks komponentideks on tselluloos ja ligniin, mis reageerivad alustega ja hapetega vastupidiste tagajärgedega. Tselluloosil on hea vastupidavus alusteliste ainete suhtes, aga reageerib hästi happelistega, ligniin aga lahustub alustes ja on keemiliselt stabiilne aluste olemasolul. See kokku annab puidule mõõduka kaitse hapete ja aluste vastu. Samas leeliste toimel hakkab puit pehmenema ja hoiduda tuleb otsesest kontaktist klooriga, hüpokloritidega, nitraatidega ja teiste oksüdeerivate ainetega [8].

Puidul on orgaaniliste ainete vastu parem vastupidavus. Orgaanilised lahustid, nagu atsetoon, benseen ja alkohol, mis toimivad nagu vesi ja lahustavad vahasid, vaikusid ning rasvu, tekitavad vee kontaktiga sarnaseid tagajärgi, kus puit paisub ja kahaneb ning tugevus väheneb kergelt. Naftal põhinevad õlid ei vähenda puidu tugevusomadusi, küll aga muudavad selle värvust [8].

## **4.1 Puidu modifitseerimise peamised mehhanismid**

Puidu töötlemist võib jagada kahte erinevasse klassi – aktiivne ja passiivne modifitseerimine. Passiivsel modifitseerimisel ei muudeta puidu keemilist koostist, aga aktiivsel modifitseerimisel toimuvate reaktsioonide tõttu toimuvad puidus keemilised muudatused. Nendest muudatustest on tänapäeval peamiselt uuritud puidu rakuseinu moodustavate polümeeride hüdroksüülrühmade reageerimist mingi reagendiga. Puidu ja vee omavahelises koostoimes on just nendel rühmadel põhiline roll ning samaaegselt on need ka kõige kergemalt keemiliselt reageerivad asukohad [31].

Puidu märgumisel liiguvad vee molekulid just nende puidu rakuseintel asuvate hüdroksüülrühmade vahele ja hüdroksüülrühmade ning vee molekulide vahel moodustuvad vesiniksidemed. Järelkult, muutes nende veemolekulide hulka, saab kontrollida ka puidu pundumist ja kokkutõmbumist ning seetõttu kõik puidu töötlemise meetodid mõjutavad mingitmoodi puidu ja vee vahelist koostoimimist. Tavaliselt esinevad koos samaaegselt mitu erinevat töötlusmeetodit. Näiteks, termotöötlemisel muudetakse rakuseinte koostist, millest tekivad ristsidemed, redutseeruvad OH-rühmad ning tekivad soovimatud lõhustumised polümeeride ahelates [31].



| Passiivne modifitseerimine |                     | Aktiivne modifitseerimine        |                  |                        |
|----------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------|------------------------|
| Vahede täitmine            | Rakuseinte täitmine | Reaktsioonid puidu polümeeridega | Rist-sidestamine | Rakuseinte lagundamine |
|                            |                     |                                  |                  |                        |

Joonis 5. Puidu keemilise töötlemise võimaluste diagramm [31].

## 4.2 Kasutatavad meetodid

Puidu töötlemine määratletakse üldiselt kasutatud protsessi järgi ning kõige levinumate puidu modifitseerimisprotsesside hulka kuuluvad: keemilised, termo-hügro-mehaanilised ja erinevad füüsikalised protsessid. Arendamisel on ka paljud uued potentsiaalsed puidutöötlemise meetodid, mille jaoks võetakse eeskuju teistest töötlevatest tööstustest, nagu näiteks toidutööstuses, põllumajanduses ja energia konverteerimises kasutusel olevatest protsessidest [31].

### 4.2.1 Keemiline töötlemine

Puidu keemiline töötlemine toimub keemilise reaktsiooni tagajärjel, kus reageerib reagent puidu sisalduses olevate polümeeridega (ligniin, tselluloos, hemselluloos). Sellega tekivad stabiilsed kovalentsed sidemed reageeriva aine ja puidu rakuseintes olevate polümeeride vahel. Seetõttu peetakse peaaegu kõiki puidu keemilise töötlemise

meetodeid aktiivseks töötlemiseks, sest materjali keemilises koostises toimub selge muudatus.

Kogu töötlemise protsessis toimuvatest protsessidest ei teata veel palju. Põhiliselt on teada ja mõistetud kolme erinevat toimeviisi, mis mõjutavad aktiivtöödeldud puitu:

1. Tasakaaluniiskuse tase langeb töödeldud puidus ja seetõttu on seentel raskem saada oma elutegevuseks vajalikku niiskust.
2. Töödeldud puidurakuseintes tekkinud muudatused aitavad takistada seente spooridel füüsiliselt rakkudesse siseneda.
3. Keemilised muudatused takistavad mõningate ensüümide toimimist.

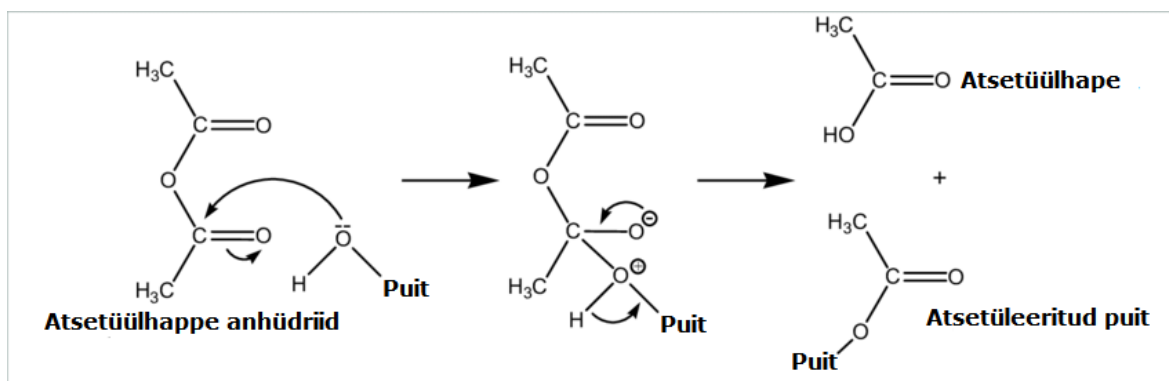
### **Atsetülatsioon**

Kõige tavalisem ja levinum puidu keemilise töötlemise vorm on atsetülatsioon. Esimene teadaolev eksperiment toimus Saksamaal 1928. aastal, kus W. Fuchs kasutas protsessis keemilise reagentina oli atsetüülanhüdriid ja katalüsaatorina oli väävelhapet [32]. Samal aastal atsetüleeriti pööki Horni poolt, aga sellel korral prooviti eemaldada hemitselluloosi ja isoleerida ligniini [33]. Esimest korda atsetüleeriti puitu eesmärgiga stabiliseerida selle pundumist niiskuse toimel 1946. aastal [34, 35]. 1940. aastatel algas laiem katsetamine puidu atsetüliseerimisega, kus kasutati ja uuriti erinevaid puiduliike [36, 37, 38].

Esmased puidu atsetüliseerimise turustamise katsed ebaõnnestusid Ameerika Ühendriikides, Nõukogude Liidus ning Jaapanis, sest protsessiga seotud kulud olid liiga suured [39]. Selle meetodi laialdasem turundus algas tehnoloogiate arenguga 21. sajandi alguses Hollandist, kuigi seda protsessi on teatud juba aastakümneid. Esimene edukas läbimurre, et tuua atsetüliseerimine laborist pooltööstuslikule tasemele, toimus Hollandis 1990. aastatel ettevõttes Stichting Hout Research [40, 41, 38].

Puidu atsetüliseerimisel kasutati peamiselt vedelat atsetüülanhüdriidi [36, 37]. Algselt oli reaktsiooni läbiviimiseks erinevaid katalüsaatoreid katsetatud, nagu tsinkkloriid ja püridiin [34] ja hiljem laiendati uurimist erinevatele vedelatele ning aurustatud katalüsaatoritele, nagu naatriumatsetaat, magneesiumpersulfaat, dimetüülformamiid ja karbamiid ammoniaak sulfiit [36]. Samas tänapäeval toimuvad need reaktsioonid ilma katalüsaatorita [39, 42, 38].

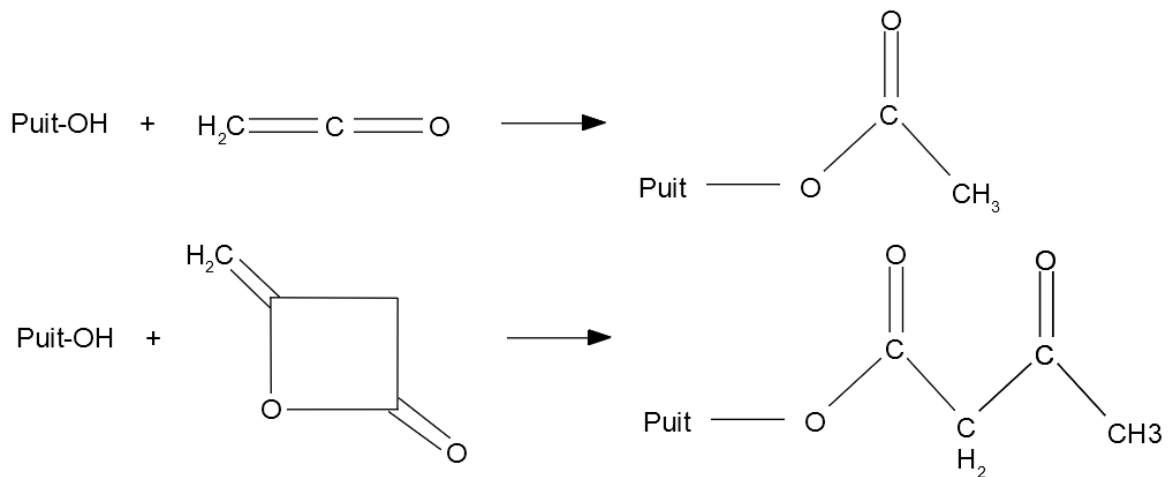
Joonis 6. Puidu atsetüleerimine ätsetüülhappe anhüdriidiga. näitab keemilist reaktsiooni, mis toimub puidu ja atsetüülanhüdriidide vahel 100 kuni 120°C juures. Suuremates tootmiskeskondades võib sellega meetodiga tekkida probleem liigse soojusega, sest atsetülatsioon on eksotermiline protsess [31]. Selle protsessi käigus esterduvad puidurakuseintes ligipääsetavad hüdroksüülrühmad [36] ja eraldub kõrvalsaadusena atsetüülhape. Kuna atsetüülhape on inimeste jaoks ebameeldiva lõhnaga, siis tuleb see tavaliselt eemaldada hilisemalt [38].



Joonis 6. Puidu atsetüleerimine ätsetüülhappe anhüdriidiga [43].

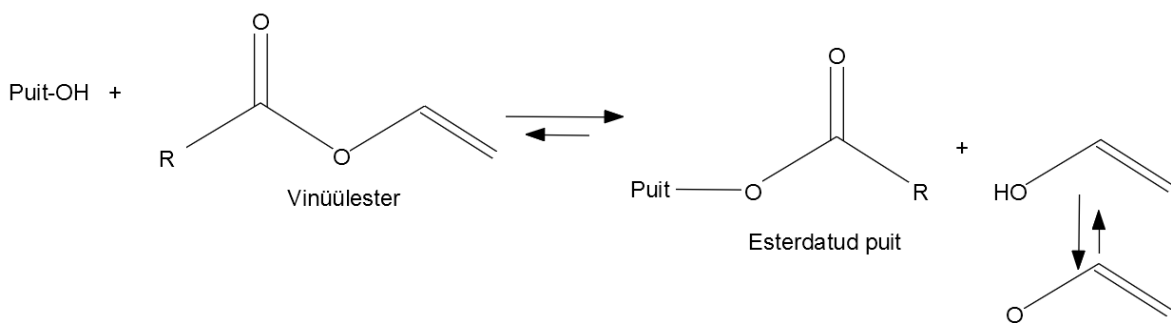
Algselt vaadati atsetüül anhüdriidide vabanemist piirava faktorina, aga hiljem tulid turule uued atsetülatsiooni reaktsiooni järgsed meetodid anhüdriidide eemaldamiseks. Samas on avastatud ka alternatiivsed ained, millega sarnaselt puidu atsetülatsiooni läbi viia ilma atsetüül anhüdriidide tekketa. Kaks võimalikku asendajat on keteen ja diketeen, mis on võimelised panema puidu reageerima keerulistel tingimustel atsetüülhappega või atsetüülkloriidiga, kuigi viimasega tekib samas ikkagi reaktsiooni produktina atsetüülanhüdriid [31].





Joonis 7. Puidu reaktsioonid keteeni ja diketeeniga [31].

Järgmine huvitav tootmismeetod kasutab vinüülatsetaati, et tootmisprotsessi muuta lihtsamaks. Selle aine kasutamisel eemaldatakse vajadus lisasammudeks tootmisel tekkivate tugevalt lõhnavate ühendite eemaldamiseks, nagu on vaja atsetüülhapet eemaldada tavalise atsetülatsiooni käigus. Senised katsed on näidanud, et vinüülatsetaadiga on võimalik saavutada atsetülatsioon temperatuuridel alates 90°C [31].



Joonis 8. Puidu atsetülatsioon vinüülestriga reageerides [31].

Üks palju uuritud atsetüleeritud puittooteid on Accoya nime all lepast ja männist turustav Hollandi firma Accsys Technologies. Keskmiselt on nende toodetud puidul 20% massi suurenemine atsetüüli mõjul [44].

Atsetüleeritud puidul on märgatavalt suurenenud bioloogiline vastupidavus. Puidu bioloogiline vastupidavune suurenes klass I vastavaks, sarnaselt väga vastupidavatele

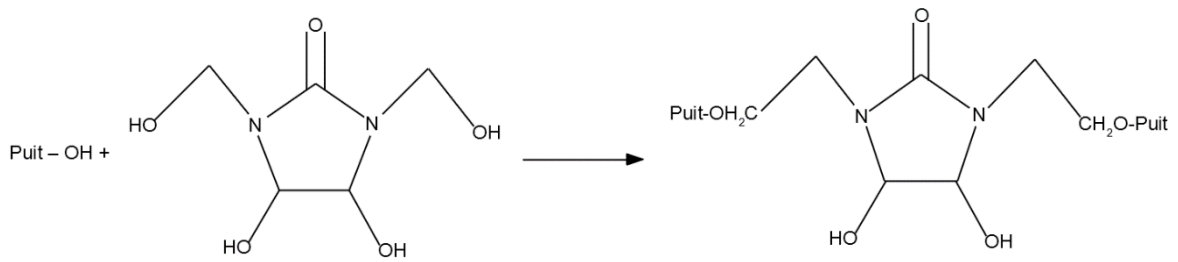
troopilistele puiduliikidele nagu tiikpuul (*Tectona grandis*) ja ipel (*Handroanthus spp.*) [45, 42]. Samuti on atsetüleeritud puidul kiudude küllastuspunkt alla 15% ning raku seintel on väga hea võimekus niiskust väljas hoida. Puidurakuseinad on küllastunud atsetüülrühmadega, mis katavad vee võimalikud sisenemise vektorid [46]. Sellest tingituna on pundumine ja kahanemine niiskuse toimel 70-80% väiksem kui töötlemata puitmaterjalil. Võrreldes töötlemata puiduga on atsetüleeritud puit 15-30% kõvem. Samas jäävad muud mehaanilised omadused, nagu tugevus, sisuliselt muutumata [39, 44].

Sarnaselt CCAga (ing k chromated copper arsenate) töötletud männipuiduga on atsetüleeritud Accoya puidul, mis sisaldab üle 20% atsetüüli, ülimalt hea vastupidavus vees elutsevate puidukahjurite vastu ka pärast 16-aastast kasutust [47]. Lisaks on avastatud atsetüleeritud puidul väga hea vastupidavus erinevate termiitide vastu [48, 44].

Atsetüleeritud puidu toomisel on palju väiksem CO<sub>2</sub> jalajälg, kui võrrelda seda betooni, terase või jätkusuutmatult langetatud azobe (*Lophira alata*) puidul. Seda turustatakse „roheline“ tootena praegu seoses eelnevalt kirjeldatud omaduste tõttu ja Accoya puidul on üle terve elutsükli kui negatiivse CO<sub>2</sub> jalajäljega toodet. Samas piirab väheste puiduliikude kasutamine selle toote valmistamist ja laiema kasutuselevõtu saavutamiseks tuleb veel teisi potentsiaalseid puiduliike lisada [44].

### **DMDHEUga modifitseerimine**

1,3-dimetüülool-4,5-dihüdroksüetüleenkarbamiit leidis algselt kasutust tekstiilitööstuses, kuid on ajaga ka puidu töötlemiseks kasutama hakatud 20. sajandi lõpus. Uue sajandi alguses tehtud uurimistöõde alusel tõestati, et see protsess vajab veepõhist impregneerimist kõrgetel temperatuuridel. Tavaliselt algab niisketil tingimustel 100-120°C juures polümerisatsioon, mis kõvastab materjali polükondensatsiooniga ja eemaldab seejärel sisalduva vee [31].

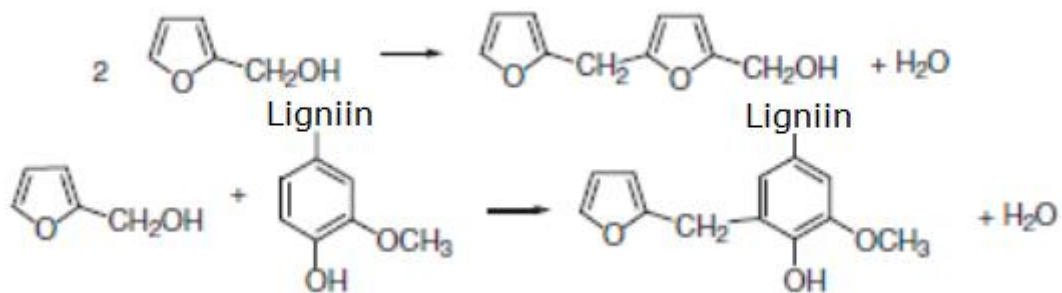


Joonis 9. Puidu ja DMDHEU omavahelise reaktsioon.

DMDHEUga töötlemine vähendab tuntavalt puidu hügrooskoopsust [49], mis vähendab erinevate bioloogiliste ohtude suurust [50]. Suurendab puidu dimensionaalset stabiilsust, kahanemise vastane efektiivsuseks on leitud kuni ~75% [44], jäädes keskmiselt aga 30-40% vahele [51]. Suureneb vastupidavus termiitide vastu [52]. Ligniini vastupidavus UV kiirguse vastu suureneb töödeldud puidus, aeglustades tehislükku vananemist [53] ja parandades üldist ilmastikukindlust [54]. Elastsusmoodul ja rebenemismoodul kasvavad võrreldes töötlemata puiduga [55]. Töödeldud puidu värvus ei muutu võrreldes töötlemata puiduga [56].

### Furfurüülimine

Furfuolalkoholi toodetakse põllumajandusjätmetest nagu suhkruroost ja maisitõlvikutest. Furfurüülimise käigus impregneeritakse furfurolalkoholi puitu koos katalüsaatoritega ja kuumutades need reageerivad omavahel ning võimalik, et ka rakuseintes oleva ligniiniga [57, 58]. Seejärel leidub furfurolalkoholi koos lisanditega puidu struktuurisiseselt õõnsustes ja rakuseintes. Polümerisatsiooni toimub peamiselt raku sees olevates mikroõõnsustes ning on lihtsasti nähtav optilise mikroskoobiga [31]. Sellega saavutatakse puidu mehaaniliste ja bioloogiliste omaduste paranemine, nagu näiteks suurenenud vastupidamine loomulikule lagunemisele, dimensionaalne stabiilsus, ilmastikukindlus ja kõvadus [38].



Joonis 10. Puidu reageerimine DMDHEU ühendiga [31].

Puidu bioloogiline vastupidavus suureneb [59]. Katsed on näidanud furfurüülitud puidul, mis on mõõdukalt furfurüülitud (30-35% massist) on vastupidavus sarnane CCAga immutatud männipuidule. Väljaarvatud vastupidavus löökidele, paranevad furfurüülalkoholiga reageerides puidu mehaanilised omadused. Paranenud on kõvadus, elastsus ja rebenemiskindlus, aga suurenenud on rabadus [42].

Furfurüülitud puidul, mille massist suurem osa on furfurüülitud (>50%,) on ülimalt vastupidav erinevatele vees elutsevate puidukahjurite rünnakutele [47]. Furfurüülitud puidust ei eraldu ohtlikke ühendeid ka selle põlemisel suuremas mahus, kui töötlemata puidust [60]. Seetõttu on see arvestatud Skandinaavias „roheliste“ puidutoodete hulka [59].

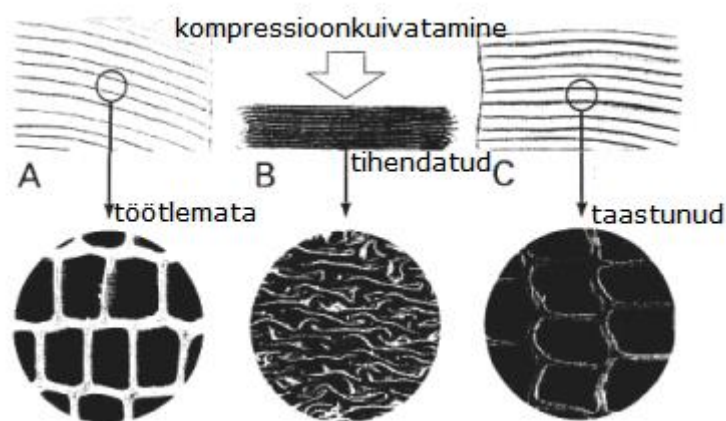
#### 4.2.2 Termomehaaniline ja termo-hügro-mehaaniline töötlemine

Protsessid, kus puidu töötlemisel kombineeritakse kõrge temperatuur ja survejõud, nimetatakse termomehaaniliseks töötlemiseks ning kui tagada kõrge temperatuur ja vee olemasolu koos välise mehaanilise survega, siis on tegemist termo-hügro-mehaanilise töötlemisega. Tavaliselt mõistetakse nende hulka ka hilisem impregneerimine või liimimine soovitud kuju saamiseks [44].

Puidu elastsus- ja rebenemismoodul suurenevad märkimisväärselt nende protsesside tulemusel, mis on tingitud puidu tiheduse kasvamisest. Samaaegselt vähendab termotöötlemine puidu

## Termomehaaniline töötlemine

Selle protsessi käigus tihendatakse puitu avatud süsteemis, kus korraga kasutatakse kõrge temperatuuri ja mehaanilise surve koosmõju. Tavaliselt jäävad temperatuurid vahemikku 150-200°C ning tihendusaste on 40-60%. Protsess sõltub töödeldava puidu anotoomilistest omadustest – tihedusest, lülipuidu kogusest, puidurakuseinte mahust ning surve suunast [61, 62].



Joonis 11. Puidu elastiline taastumine tihendamise järgselt [63].

Puidu elastsetest omadustest tingituna on termomehaanilise töötlemise järgselt selle dimensioonide ja kuju osaline või täielik taastumine [64]. Mida suurem on tihendusaste, seda suurem see võib olla ning see tekitab suuremaid sisemisi pingeid materjalis [65]. Töötlemise toimel suureneb puidu tihedus, vastupidavus paindumisele ning elastsusmoodul paralleelselt tihendusastme suurenemisele [66]. Termomehaanilisel töötlemisel mõjutab peamiselt elastsusmoodulit tihendusaste ja pressi temperatuuril on väike mõju sellele [63, 62].

Töötlemise järgselt tekkinud omaduste muutused võivad olla tingitud puidus olevate tühimike ruumala vähenemisest ning puidurakkude kogumahu suurenemisest materjalis. Erinevalt lihtsalt mehaaniliselt töödeldud puidust, hoiavad termomehaanilise töötlemise järgselt puidu rakud oma kokkusurutud vormi, kus taaste määraks võib olla alla >1%. Pärast termomehaaniliselt töödeldud puidu vees leotamist ja kuivatamist ei toimunud selle algse vormi taastumist, aga võimalik on väike tugevuse kadu [67]. Töötlus suurendab pinna vastupidavust löökidele [68], kus surveastmel 50% on

võimalik harilikku mäнди (*Pinus sylvestris*) töödeldes saavutada kahekordse Brinelli kõvadus võrreldes töötlemata puiduga [67].

### **Termo-hügro-mehaaniline töötlemine**

Termo-hügro-mehaaniline töötlemine on tehnoloogia, kus puitmaterjali tihendatakse suletud süsteemis vee, temperatuuri ja survega [69]. Tihendamist on võimalik kontrollida, kasutades küllastunud veeauru surumise ajal. Tavaliselt on protsessis läbivalt temperatuur 150°C ja surveks ligi 130 kg/cm<sup>3</sup>. Erinevalt termomehaanilisest töötlemisest kuumutab siin otseselt puitu surve all olev aur, mis aitab muuta puitu vähem niiskuseimavaks ning stabiilsemaks. Nendel temperatuuridel tekivad hüdrooniumioonid, mis kombineeritult pika protsessi ajaga hakkavad reageerima puidus olevate polüsahariididega, luues ristsidemeid ja lõhkudes olemasolevaid molekulaarsidemeid [70]. Termo-hügro-mehaaniliselt töödeldes ei teki puidu rakkude purustamist ning pragunemist, sest vesi ja kõrge temperatuur muudavad rakud pehmemaks enne survetöötuse algust [61, 71, 62].

## 5. KASUTUSVALDKONNAD JA TULEVIKUANALÜÜS

Puidu kasutamisel ja inimeste sotsiaalmajanduslikul arengul on pikaajaliselt olnud omavahelised seosed. Ennekoike seostub see keskmise saetud palgi diameetri kahanemisest ning tööjõu kulude suurenemisest, mis sunnib puidutööstust arenema, et hoida töö efektiivsust ning kasumlikkust. Kõige paremini on võimalik automatiseerida, standardiseerida ja skaleerida tööstuslikule tasemele protsessid, kus puitu lõigatakse väikseteks tükkideks või kiududeks. Säärased protsessid on potentsiaali poolt piisavad, et paljud tootjad mõõdavad oma tootmise efektiivsust võrreldes toormaterjali ja valmistoote mahte, mis termo-hügro-mehaaniliselt töötletud puiduga võib olla 50% väiksem. Seega on tootjatel suur surve tootmise efektiivsust tõsta või leida uusi madalamade hindadega toormaterjali [72].

Kiiresti kasvavaid puiduliike ei loeta oma madalast tihedusest tingitud mehaaniliste omaduste poolest sobivateks ehitusel toetuseks kasutamiseks [73]. Puidu töötlemise trend on kasvav ja populaarne, et aidata väärindada senini väheväärtuslikeks peetud, aga samas kiiremini ja jätkusuutlikult kasvatatud puiduliike. Esile on kerkimas uued töötlemise metodoloogiad, mis ei ole mürgised ja biotsiidsed [74]. Sarnane probleem on tööstuslik, et paljud tootjad mõõdavad oma tootmise efektiivsust võrreldes toormaterjali ja valmistoote mahte, mis termo-hügro-mehaaniliselt töötletud puiduga võib olla 50% väiksem. Seega on tootjatel suur surve tootmise efektiivsust tõsta või leida uusi madalamade hindadega toormaterjali [72].

Suurimat huvi tuntakse soojemates kliimades asuvates maades erinevate kiiresti kasvavate puiduliikide vastu, mida aktiivselt puidukasvandustes kasvatatakse. Seetõttu võib tulevikus suurem osa maailma puidutoodangust tulla neljast või viiest erinevast puiduliigi esindajatest [75]. Okaspuidust on metsaistandustes põhiliselt esindatud kiirjas mänd (*Pinus radiata*), ebatsuuga (*Pseudotsuga*) ning lehtpuudest on maailmas kõige enam esindatud eukalüpt (*Eucalyptus spp.*). Need on sobivad ka arenevates maades kasvatamiseks, et aidata täita nende suurenevat puidu tarbimist [76].

Termo-hügro-mehaaniliselt töötletud puitu kasutatakse insenerpuidus ja komposiitide osana, asendades senini tugikonstruktsioonides kasutatud liike teiste madalaväärtusega liikidega ja asendades terast pikkades vahemikes ning terastalade asemel [72]. Aina kõrgemaid ja suuremaid ehitisi on hakatud täiesti või osaliselt puitkarkassil. Ameerika Ühendriikides Minneapolis on ehitatud seitsmekorruseline hoone, (mis on linna ehitusnõuete tõttu piiratud maksimaalne kõrgus), naelutatud liimkihtpuidust, mis on

sarnane ristkihtliimpuidule. Puud, millest ehitusmaterjal toodeti, olid suuresti mardikate (*Dendroctonus ponderosae*) rünnakute tõttu surnud [77]. Kanadas Vancouveris ehitati 70 päevaga Briti Columbia Ülikooli tellimusel 18-korruseline üliõpilaste ühiselamu, millel on tule tõrje ohutusreeglite pärast ainult esimene korrus ja tule tõrje väljapääsu trepikojad betoonist [78].

Puidul on tagasitulek olnud ka autotööstuses, sest selle kaalu-tugevuse suhe on paranenud ning eelistused on muutumas looduslike materjalide suunas, isegi kui nende hinnad on hetkel kõrgemad [72]. Näidisenä on firma Morgan automudel Aero Coupe, millel on puidust raamistik kerekonstruktsioonile tugevust andva osana, mitte lihtsalt dekoratsioon [79].

Tuulegeneraatorite tiivikud on ka üks potentsiaalseid turge puidule [72]. Tänapäeval on puidu ja epoksüvaikudest valmistatud puitkomposiididel piisav kaalu-tugevuse suhe, et neid kasutada tiiviku labadena [80]. Osad tiivikute labad on valmistatud komposiidist, mis sisaldab balsa puitu, mis on oma kerge kaalu ja tugevuse tõttu populaarne puiduliik olnud juba sajandeid [81, 82]. Probleemiks on balsa puidu nappus, sest maailma toodangust 95% kasvatatakse Ecuadoris [82]. Igas labas on keskmiselt 15 m<sup>3</sup> balsa puitu ning on uuritud võimalusi selle kätte saamiseks ning ümbertöötlemiseks [81]. 2012. aastal ehitas Saksa firma TimberTower Hannoveri lähedale 100 meetri kõrguse puidust torniga tuulegeneraatori [83]. Rootsis on ehitatud täispuitkonstruktsiooniga 30 meetri kõrgune tuulegeneraator Göteborgi lähedal, ning plaanis on ka 110 ning 150 meetri kõrgused mudelid. Kommertsmudelite müügiga on lubatud alustada juba 2022. aastal [84, 85].

Austria firma Beck on Lignoloc nimelise tooteperega välja tulnud, mis koosneb puidust naeltest ning nende kinnitamiseks soovitatud naelapüssidest. Tegu on naeltega, mida valmistatakse kuni 90 mm pikkustena ning on valmistatud survetöödeldud pöögist. Neid on võimalik puitu kinnitada ilma eelnevalt auku ette puurimata ja on oma tugevuselt alumiiniumnaeltega võrreldavad. Becki poolt valmistatud naelapüssid on erikonstruktsiooniga, et naelutamisel tekitada lisasoojust, millega naelad keevitada puiduga kokku. See tekitab lisasidemeid ning annab juurde tugevust, mida haamriga lüües ei tule. Erinevalt metallnaeltest ei ole neid näha pärast kinnitamist ning võrreldes puidust seibide kasutamisega, on nende kinnitamine palju lihtsam. Viini Ülikooli hinnangul on nende süsiniku jalajälg negatiivne, mis tähendab, et tootmisel eralduv süsinik dioksiidi hulk on väiksem kui naeltes kinni hoitav ja hiljem ümbertöötlemisel ei ole vajalik nende eemaldamine [86, 87].



Üks täiesti uus tulevikuperspektiiv on puitu klaasi asemel kasutada, et valgust majadesse tuua või katta päikesepaneelide fotoelemente. Rootsi KTH Kuningliku Tehnoloogia Instituudis töötati välja meetod, kus eemaldades rakuseintes oleva ligniini saadi hägune valget värvi materjal, mis polnud veel läbi paistev aga eelpolümeriseeritud metüülmetakrülaadi (PMMA) lisamisel muutus see läbipaistvaks. Uurimise all on puidu ja PMMA omavahelise lisamise suhe, et läbipaistvust kontrollida [88, 89].

## 6. KOKKUVÕTE

Puidul ning spoonist valmistatud esemetel on ajalooliselt tähtis roll olnud inimeste jaoks, olles kergesti kättesaadav, kasutatav ning taastuv ressurss. Algselt tehnoloogiate ja meetodite puudumise tõttu oli sellest valmistatud tooted kallid ning piiratud kasutusvõimalustega, mistõttu olid need peaaegu täiesti ainult siseruumides võimalik kasutada. Tänapäeval on need piirangud aga suuresti uute tootmismeetoditega eemaldatud, tänu 19. sajandil leiutatud pöörlevalle treimasinale ja 20. sajandil avastatud fenoolvaikudele ja seepärast on vineeri ning teiste materjalide kasutusvaldkonnad väga laiad, sobides sealhulgas ka välitingimustes olevate eesmärkide täitmiseks.

Puidu kasutamisel ja inimeste sotsiaalmajanduslikul arengul on pikaajaliselt olnud omavahelised seosed. Ennekoike seostub see keskmise saetud palgi diameetri kahanemisest ning tööjõu kulude suurenemisest, mis sunnib puidutööstust arenema, et hoida töö efektiivsust ning kasumlikkust. Kõige paremini on võimalik automatiseerida, standardiseerida ja skaleerida tööstuslikule tasemele protsessid, kus puitu lõigatakse väikseteks tükkideks või kiududeks. Seetõttu on toimunud loomulik üleminek täispuit materjalidest puitkomposiitmaterjalidest valmistatud toodetele [10].

Spoonist on võimalik toota väga erinevaid materjale, mis on oma omaduste ja kasutusvaldkondade järgi spetsiifiliselt valmistatud. Antud töö skoobis vaadeldi vineeri ning LVLi, mis on mõlemad spoonide kihiliselt kokku liimides valmistatud. Tegemist on samas aga kahe vägagi erineva materjaliga, mistõttu kasutatakse neid ka vastavalt nende erinevaid tugevusi ja nõrkusi arvestades. Vineeri on mitmekülgsuse poolest ja vanuse tõttu laiemalt kasutatud erinevate toodete ja ehitusprojektide osana. LVLil on suurepärase vastupidavuse paindumisele spoonide puidusüü suunas, andes sellele suurepäraseid tugiomadused.

Puidu loodusliku päritolu tõttu on see halva vastupidamisega kahjuritele ning lagunemisele ja pehme. Seetõttu modifitseeritakse puitu erinevate meetoditega, et parandada vajalikke omadusi. Üldiselt jaotuvad need aktiivse ja passiivse modifitseerimiseks, kus passiivsel ei muudeta puidu keemilist koostist ning aktiivsel seda tehakse. Aktiivsed meetodid on keemiline töötlemine, kus puidu koostist muudetakse kemikaalidega – atsetüleerimine, furfurüülimine, DMDHEUga modifitseerimine ja termotöötlus. Passiivselt on võimalik puitu modifitseerida näiteks survetöötlusel. Tänapäeval paljuski kasutatakse erinevate modifitseerimismeetodite kombinatsioone, näiteks termo-hügro-mehaaniline töötlemine, kus on kombineeritud

termo- ja surve töötlus ning veega töötlemine, mis aitavad iga eraldi oleva meetodi nõrkusi vähendada.

Uueks väljakutseks puidu keemilisel töötlemisel varasemalt ilmastikukindluse parandamiseks kasutatud ning nüüd kantserogeensete mõju tõttu põlu alla sattunud fenoolühenditel põhinevate liimainete asendamine uute loodussõbralikema ja inimeste tervisele ohutumate ainete leidmine. Erinevaid sobivaid alternatiive on leitud, aga veel ei ole ühelgi nende kasutamisel võimalik saada nii universaalseid kasutuseeliseid kui fenoolidega. Probleemideks on veel puudulik arusaamine, kuidas erinevad töötlemisel kasutatud ained reageerivad ja kaitsevad puitu mikrotasandil erinevate ohtude vastu.

Tänu moodsate tootmismeetoditele on vineeri ja liimkihtpuidu omadused nii palju paranenud, et need on hakanud tagasi tulema tööstustesse, kus need asendati sünteetiliste materjalidega 19. ja 20. sajanditel. Puitu on hakatud kasutama laialdaselt suurte ehitusprojektide osana, asendades terast ja betooni, olles kaalu ja tugevuse suhtes parem nendest materjalidest, mis lubab puidust ehitatud projekte kiiremini ja odavamalt ellu viia. Mõned autotootjad on samuti puidust osadega autosid tootma hakanud ning tuleviku perspektiivides on täispuit tuulegeneraatorid. Seetõttu on puit oma vanusest hoolimata aktiivselt kasutuses ja arenduses materjal.

## 7. SUMMARY

Being easily gather, use and a renewable resource, products made of wood and veneer have had an important historic impact on humanity. In the beginning there were severe limitations placed on these materials due to a lack of technologies and methods that made the materials weatherproof and thus they were used mostly indoors. Today, those hurdles have been overcome, due to the invention of the rotary peeler in the 19<sup>th</sup> century and discovery phenolic resins in the 20<sup>th</sup> century. This has allowed to use plywood and other such materials almost anywhere, including outdoors.

The use of wood and the socio-economic development of humanity is closely linked. This due to the average diameter of the logs used constantly shrinking and the increase of expenditure on the human workers. This has made necessary for the wood industry to innovate, to stay ahead of the curve, keeping up productivity and costs down. The best processes that can be automated, standardised and are scalable, are those where wood is made into fibres or very small pieces. Thus, there has been a natural transition from solid wood based to plywood and other such wood composites [10].

Veneer is a capable raw material, from which a variety of products can be produced, tailored to their specific end needs. This paper describes two primary veneer-based products – plywood and laminated wood lumber (LVL). Those materials may look similar, but are two very different products, that are used accordingly with their respective strengths and weaknesses.

Due to its natural origin, wood is susceptible to different pests and natural decay. This has made it necessary to modify wood, to overcome these limitations and improve necessary attributes. These modifications are categorised as active and passive. Active modification entails that there occurs a permanent chemical change in the composition of the wood during the process and passive methods on keep it the same. Chemical modification, such as acetylation, furfurylation, modification with DMDEHU change the woods composition by chemically reacting with the wood and thermal modification changes the composition with high temperatures. Passive modification includes densification mechanically. Modern methods employ several of these methods together, to allow to overcome the weaknesses of using only one of these methods, such as thermo-hydro-mechanical modification. An issue is that it is poorly understood how these modifications interact with the wood on a cellular level.

A new challenge is to improve the all-weather capability of wood with new glues, due to the popular and very capable phenolic resin-based ones being carcinogenic. This has led to an effort to replace them with new, more environmentally friendly and safer for human use compounds. There are many potential candidates, but currently none possess the universal usability of the phenol-based glues.

Due to modern production methods and technologies, these products are making a comeback in areas they were phased out in 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> century for synthetic materials. Large buildings are being almost entirely built from these engineered wood products, replacing concrete and steel. Having a better strength-to-weight ratio than those materials, projects utilizing wood in large parts, are being finished faster and thus more cheaply. Some car manufacturers are also adding wood details to their car frames and there are plans for wind turbines that are made entirely of wood. Despite being known to humanity for a long time, wood still holds surprises and is actively being used and researched.

## 8. VIITED

- [1] G. Savage, "Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing.," Juuli 2008. [Online]. Available: <https://www.formula1-dictionary.net/Big/Composite%20Materials%20Technology%20in%20Formula%201%20Motor%20Racing.pdf>. [Accessed 2 Detsember 2019].
- [2] Plywood Pioneers Association, "AIRCRAFTPLYWOOD COMPANY," November 1975. [Online]. Available: <https://apawood.org/data/Sites/1/documents/monographs/15-aircraft-plywood-co.pdf>. [Accessed 12 Jaanuar 2020].
- [3] J. H. Taylor, *Death and the Afterlife in Ancient Egypt*, Chicago: University of Chicago Press, 2001.
- [4] M. Hughes and M. Ansell, "Plywood and other veneer-based products," in *Wood Composites, 1st Edition*, Woodhead Publishing, 2015.
- [5] R. Wilson and K. Snodgrass, "Early 20th-Century Building Materials: Fiberboard and Plywood," United States Department of Agriculture Forest Service, Märts 2007. [Online]. Available: <https://www.fs.fed.us/t-d/pubs/pdfpubs/pdf07732308/pdf07732308dpi72.pdf>. [Accessed 4 January 2020].
- [6] C. S. Ricker, "Mosquito draft," JL McClellan, 2005. [Online]. Available: [http://legendsintheirowntime.com/LiTOT/Mosquito/Mosquito\\_draft.pdf](http://legendsintheirowntime.com/LiTOT/Mosquito/Mosquito_draft.pdf). [Accessed 3 Veebruar 2020].
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Forestry Production and Trade," [Online]. Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. [Accessed 8 Detsember 2019].
- [8] Federation of the Finnish Woodworking Industries, "LVL Handbook," 2019. [Online]. Available: <http://proofer.faktor.fi/epaper/LVLHandbook/#1>. [Accessed 3 Veebruar 2020].
- [9] Klavis OÜ, "Kuidas see tehtud on? – Palgi keetmisest spooni tootmiseni," Klavis OÜ, August 2016. [Online]. Available:

<https://www.vineerimaailm.ee/blog/kuidas-see-tehtud-on-palgi-keetmisest-spooni-tootmiseni>. [Accessed 1 Detsember 2019].

- [10] S. Shi and J. Walker, "Wood-based composites: plywood and veneer-based products," in *Primary wood processing: Principles and practice*, Canterbury, New Zealand, Springer, Dordrecht, 2006.
- [11] Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, "About BauBuche," Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, [Online]. Available: <https://www.pollmeier.com/products/baubuche-about>. [Accessed 28 November 2019].
- [12] J. F. Lutz, "WOOD AND LOG CHARACTERISTICS AFFECTING VENEER PRODUCTION," Forest Products Laboratory, 1971. [Online]. Available: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp150.pdf>. [Accessed 29 Mai 2020].
- [13] J. Passard, V. Placet and P. Perre, "5," *Holzforschung*, vol. 61, no. 5, 2007.
- [14] A. Dupleix, S. A. A. Saleck, L. Bleron, F. Rossi and M. Hughes, "Rational production of veneer by IR-heating of green wood during peeling: Modeling experiments," *Holzforschung*, vol. 67, no. 1, 2013.
- [15] C. L. Forbes, "Understanding and Minimizing Veneer Checking on Furniture Panels," NC State Extension Publications, 1 Jaanuar 1997. [Online]. Available: <https://content.ces.ncsu.edu/understanding-and-minimizing-veneer-checking-on-furniture-panels>. [Accessed 22 November 2019].
- [16] "Naturaalne spoon," AS Mass, [Online]. Available: <https://www.mass.ee/spoon>. [Accessed 3 Märts 2020].
- [17] T. S. Jr, *Plywood and adhesive technology*, New York: Dekker, 1985.
- [18] Environmental Protection Agency, "AP-42: Compilation of Air Emissions Factors - Chapter 10.5: Plywood Manufacturing," EPA, [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch10/final/c10s05.pdf>. [Accessed 11 Mai 2020].
- [19] "Experiences with new veneer drying method," vol. 3, no. 1, 2012.

- [20] Food and Agriculture organisation of the United Nations, Energy conservation in the mechanical forest industries. Forestry paper 93., Rooma: Food and Agriculture organisation of the United Nations, 1990.
- [21] O. Paajanen, H. Holmberg, P. Lahti and M. Kairi, "Experiences with new veneer drying method," *International Wood Products Journal*, vol. 3, no. 1, 2012.
- [22] R. F. Bladwin, Plywood and veneer-based products: manufacturing practices, Backbeat Books, 1995.
- [23] Solenis LLC, "SOYAD™ PLUS ADHESIVES," Solenis LLC, [Online]. Available: <https://solenis.com/application/files/5615/4838/5779/180093-PC-SoyadPlusHardwoodWB.pdf>. [Accessed 15 Märts 2020].
- [24] D. D. Stokke, Q. Wu and G. Han, Introduction to Wood and Natural Fiber Composites, New York: John Wiley & Sons, Ltd , 2013.
- [25] UPM Plywood, "UPM Grada® 2000," UPM Plywood, Juuni 2018. [Online]. Available: [https://www.upmgrada.com/siteassets/documents/upm\\_grada2000\\_en\\_0618\\_lr.pdf](https://www.upmgrada.com/siteassets/documents/upm_grada2000_en_0618_lr.pdf). [Accessed 15 Märts 2020].
- [26] N. M. Stark, Z. Cai and C. Carli, "Wood-Based Composite Materials-Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials," ResearchGate, Aprill 2010. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/281452250\\_Wood-Based\\_Composite\\_Materials-Panel\\_Products\\_Glued-Laminated\\_Timber\\_Structural\\_Composite\\_Lumber\\_and\\_Wood-Nonwood\\_Composite\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/281452250_Wood-Based_Composite_Materials-Panel_Products_Glued-Laminated_Timber_Structural_Composite_Lumber_and_Wood-Nonwood_Composite_Materials). [Accessed 29 November 2019].
- [27] J. E. Winandy and F. A. Kamke, "Fundamentals of Composite Processing," U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 2003.
- [28] Klavis OÜ, "Vineeri ABC," Klavis OÜ, [Online]. Available: <https://www.vineerimaailm.ee/vineeri-abc>. [Accessed 19 Detsember 2019].



- [29] National Institute of Science and Technology, "Voluntary Product Standard PS 1-19," National Institute of Standards and Technology, Detsember 2019. [Online]. Available:  
<https://www.nist.gov/system/files/documents/2019/12/16/PS%201%2019%20final%20WERB-approved%20%28NIST%20vers%2011-18-2019%29%2B.pdf>.  
[Accessed 26 Jaanuar 2020].
- [30] "Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Технические условия," [Online]. Available:  
<http://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=125260&pageK=50705A66-909D-4162-AEFB-A3BF3F37BA89>. [Accessed 26 Jaanuar 2020].
- [31] D. Jones, D. Sandberg, G. Goli and L. Todaro, Wood Modification in Europe: a state-of-the-art about processes, products, Firenze: Firenze University Press, 2020.
- [32] W. Fuchs, "Genuine lignin. I. Acetylation of pine wood," *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, no. 61B, 1928.
- [33] O. Horn, "Acetylation of beech wood," *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, no. 61B, 1928.
- [34] H. Tarkow, "A new approach to the acetylation of wood," USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA, 1946.
- [35] H. S. A. J. E. Tarkow, "Acetylated wood," USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA, 1946.
- [36] R. Rowell, Chemical modification of wood: A review, Oxford, England: Commonwealth Forestry Bureau, 1983.
- [37] R. Rowell, The Chemistry of Solid Wood, Washington DC: American Chemical Society, 1984.
- [38] G. I. Mantanis, "Chemical modification of wood by acetylation or furfurylation: A review of the present scaled-up technologies," *NC State University BioResources*, no. 12(2), 2017.

- [39] R. Rowell, *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, 2nd Ed, Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylorand Francis Group, 2012.
- [40] H. Militz, "The improvement of dimensional stability and durability of wood through treatment with non-catalysed acetic acid anhydride," *Holz als Roh- und Werkstoff*, no. 49, 1991.
- [41] E. P. J. M. H. Beckers, "Acetylation of solid wood. Initial trials on lab and semi-industrial scale," *Proc. of Second Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*, 1994.
- [42] P. Larsson Brelid, "Benchmarking and state-of-the-art report for modified wood," Swedish Institute of Wood Technology SP, Stockholm, Sweden, 2013.
- [43] M. Schwanninger, B. Stefke and B. Hinterstoisser, "Qualitative assessment of acetylated wood with infrared spectroscopic methods," *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol. 19, no. 5, 2011.
- [44] D. Sandberg, A. Kutnar and G. I. Mantanis, "Wood modification technologies - A review," Detsember 2017. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/321528965\\_Wood\\_modification\\_technologies\\_-\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/321528965_Wood_modification_technologies_-_A_review). [Accessed 12 Mai 2020].
- [45] S. R. B. O. N. T. Larsson-Brelid P, "Resistance of acetylated wood to biological degradation," *Holz als Roh- und Werkstoff*, no. 58, 2000.
- [46] C. A. S. Hill, *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [47] M. Westin, P. Larsson Brelid, T. Nilsson, A. O. Rapp, J. Dickerson, S. Lande and S. M. Cragg, "Marine Borer Resistance of Acetylated and Furfurylated Wood – Results from up to 16 years of Field Exposure Marine Borer Resistance of Acetylated and Furfurylated Wood – Results from up to 16 Years of Field Exposure," Mai 2016. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/304379835\\_Marine\\_Borer\\_Resistance\\_of\\_Acetylated\\_and\\_Furfurylated\\_Wood\\_-\\_Results\\_from\\_up\\_to\\_16\\_years\\_of\\_Field\\_Exposure\\_Marine\\_Borer\\_Resistance\\_o](https://www.researchgate.net/publication/304379835_Marine_Borer_Resistance_of_Acetylated_and_Furfurylated_Wood_-_Results_from_up_to_16_years_of_Field_Exposure_Marine_Borer_Resistance_o)

f\_Acetylated\_and\_Furfurylated\_Wood\_-\_Results\_from\_up\_to\_16\_Years\_of.  
[Accessed 13 Mai 2020].

- [48] J. Alexander, J. Hague, F. Bongers, Y. Imamura and M. Roberts, "The resistance of Accoya® and Tricoya® to attack by wood-destroying fungi and termites," *Jabruar* 2014. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/270048077\\_The\\_resistance\\_of\\_Accoya\\_and\\_Tricoya\\_to\\_attack\\_by\\_wood-destroying\\_fungi\\_and\\_termites](https://www.researchgate.net/publication/270048077_The_resistance_of_Accoya_and_Tricoya_to_attack_by_wood-destroying_fungi_and_termites). [Accessed 13 Mai 2020].
- [49] A. Papadopoulos and G. I. Mantanis, "Vapour Sorption Studies of Belmadur Wood," *Advances in Forestry Letter (AFL)*, vol. 1, no. 1, 2012.
- [50] Y. H. L. L. F. C. Jie Yuan, "The Mechanical Strength Change of Wood Modified with DMDHEU," 2013. [Online]. Available: [https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/download/BioRes\\_08\\_1\\_1076\\_Yuan\\_Mechanical\\_Strength\\_Wood\\_DMDHEU/1947](https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/download/BioRes_08_1_1076_Yuan_Mechanical_Strength_Wood_DMDHEU/1947). [Accessed 18 Mai 2020].
- [51] A. J. D. v. d. Z. M. M. H. Krause, "Interlace treatment - wood modification with N-methylol compounds.," 2003. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/292702217\\_Interlace\\_treatment-wood\\_modification\\_with\\_N-methylol\\_compounds](https://www.researchgate.net/publication/292702217_Interlace_treatment-wood_modification_with_N-methylol_compounds). [Accessed 18 Mai 2020].
- [52] H. Militz, S. Schaffert, B. C. Peters and C. J. Fitzgerald, "Termite resistance of DMDHEU-treated wood," 2011. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00226-010-0345-3>. [Accessed 18 Mai 2020].
- [53] Y. Xie and A. Krause, "Weathering of wood modified with the N-methylol compound 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyleneurea," August 2005. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Klaus\\_Richter8/publication/222073423\\_Weathering\\_of\\_wood\\_modified\\_with\\_the\\_N-methylol\\_compound\\_13-dimethylol-45-dihydroxyethyleneurea/links/5a82ebe10f7e9bda86a02049/Weathering-of-wood-modified-with-the-N-methylol-compou](https://www.researchgate.net/profile/Klaus_Richter8/publication/222073423_Weathering_of_wood_modified_with_the_N-methylol_compound_13-dimethylol-45-dihydroxyethyleneurea/links/5a82ebe10f7e9bda86a02049/Weathering-of-wood-modified-with-the-N-methylol-compou). [Accessed 18 Mai 2020].
- [54] A. Pfeffer, C. Mai and H. Militz, "Weathering characteristics of wood treated with water glass, siloxane or DMDHEU," 28 Jabruar 2011. [Online]. Available:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-011-0520-8>. [Accessed 18 Mai 2020].

- [55] J. Yuan, Y. Hu, L. Li and F. Cheng, "The Mechanical Strength Change of Wood Modified with DMDHEU," NC State University, 2013. [Online]. Available: [https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes\\_08\\_1\\_1076\\_Yuan\\_Mechanical\\_Strength\\_Change\\_Wood\\_DMDHEU\\_3463.pdf](https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_08_1_1076_Yuan_Mechanical_Strength_Change_Wood_DMDHEU_3463.pdf). [Accessed 18 Mai 2020].
- [56] W. C. L. Li and X. Li, "Comparison of physical-mechanical and mould-proof properties of furfurylated and DMDHEU-modified wood," NC State University, 2019. [Online]. Available: [https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/10/BioRes\\_14\\_4\\_9628\\_Li\\_CL\\_Compar\\_PhysMechan\\_Mould\\_Props\\_Furfurylated\\_DMDHEU\\_Mod\\_Wood\\_16356.pdf](https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/10/BioRes_14_4_9628_Li_CL_Compar_PhysMechan_Mould_Props_Furfurylated_DMDHEU_Mod_Wood_16356.pdf). [Accessed 18 Mai 2020].
- [57] M. H. Schneider, "New cell wall and cell lumen wood polymer composites," *Wood Science and Technology*, no. 29, 1995.
- [58] M. Westin, "Development and evaluation of new alternative wood preservation treatments," Final report to The Swedish Council for Forestry and Agri. Res. (SJFR), 1996.
- [59] P. Gerardin, "New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood— a review," *Annals of Forest Science*, no. 73, 2016.
- [60] A. Pilgard, A. Treu, A. N. T. v. Zeeland, R. J. A. Gosselink and M. Westin, "Toxic hazard and chemical analysis of leachates from furfurylated wood," *Environmental Toxicology and Chemistry*, no. 29, 2010.
- [61] A. Kutnar and M. Sernek, "Densification of wood," *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, no. 82, 2007.
- [62] M. B. Süleyman Şenol, "Mechanical wood modification methods," *Mugla Journal of Science and Technology*, vol. 1, no. 2, 2016.

- [63] M. a. L. C. Gong, "Improvement of surface properties of low density wood: Mechanical modification with heat treatment," *Natural Resources Canada*, 2007.
- [64] M. C. J. a. F. I. Garcia-Romeu, "Springback," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 1, no. 191, 2007.
- [65] K. R. L. H. M. a. K. A. Laine, "Reducing the set-recovery of surface densified solid Scots pine wood by hydrothermal post-treatment," *European Journal of Wood and Wood Products*, no. 71, 2013.
- [66] T. a. C. Y. Tabarsa, "Effects of hot-pressing on properties of white spruce," *Forest Products Journal*, no. 47, 1997.
- [67] K. Laine, K. Segerholm, M. Walinder, L. Rautkari and M. Hughes, "Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology," *Wood Science and Technology*, no. 50, 2016.
- [68] J. Blomberg, B. Persson and A. Blomberg, "Effects of semiisostatic densification of wood on the variation in strength properties with density," *Wood Science and Technology*, no. 39, 2005.
- [69] F. G. M. G. F. W. C. R. A. Heger and P. Navi, "Mechanical and durability performance of THM-densified wood," 23 Märts 2004. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/268011700\\_Mechanical\\_and\\_Durability\\_Performance\\_of\\_THM-Densified\\_Wood](https://www.researchgate.net/publication/268011700_Mechanical_and_Durability_Performance_of_THM-Densified_Wood). [Accessed 13 Mai 2020].
- [70] S. Liu, "A kinetic model on autocatalytic reactions in woody biomass hydrolysis," ResearchGate, Juuni 2008. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/233642584\\_A\\_Kinetic\\_Model\\_on\\_Autocatalytic\\_Reactions\\_in\\_Woody\\_Biomass\\_Hydrolysis](https://www.researchgate.net/publication/233642584_A_Kinetic_Model_on_Autocatalytic_Reactions_in_Woody_Biomass_Hydrolysis). [Accessed 27 Mai 2020].
- [71] P. Navi and F. Girardet, "Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood," *Holzforschung*, vol. 3, no. 54, 2000.
- [72] F. A. Kamke, "Modified Wood for New Product Opportunities," FWPA, 2014. [Online]. Available: <https://www.fwpa.com.au/images/news/EWP-Presentations/Fred-Kamke-Modified-wood-for-new-product-opportunities.pdf>. [Accessed 25 Mai 2020].

- [73] M. C. L. G. F. J. N. P. a. P. C. M. Popescu, "Evaluation of the thermal stability and set recovery of thermo-hydro-mechanically treated lime (*Tilia cordata*) wood," *Wood Science and Technology*, no. 48, 2014.
- [74] E. Dunningham and R. Sargent, "Review of new and emerging international wood," Forest & Wood Products Australia, 2015. [Online]. Available: [https://www.fwpa.com.au/images/marketaccess/Review\\_of\\_wood\\_modification\\_technologies\\_FWPA\\_2015\\_final.pdf](https://www.fwpa.com.au/images/marketaccess/Review_of_wood_modification_technologies_FWPA_2015_final.pdf). [Accessed 25 Mai 2020].
- [75] W. R. J. Sutton, "The Future for Wood - Will there be Demand for Wood in the Future?," [Online]. Available: [https://a01.warrenforestry.com/a/pdfs/the\\_future\\_for\\_wood.pdf](https://a01.warrenforestry.com/a/pdfs/the_future_for_wood.pdf). [Accessed 26 Mai 2020].
- [76] FAO töötajad, "Fast-growing tree species for industrial plantations in developing countries," FAO, Märts 1965. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/30289e/30289e02.htm>. [Accessed 27 Mai 2020].
- [77] J. Stamp, "Is Timber the Future of Urban Construction?," *Smithsonian Magazine*, 2016. [Online]. Available: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/timber-future-wood-construction-180960455/>. [Accessed 25 Mai 2020].
- [78] Z. G. Hasan, "Inside Vancouver's Brock Commons, the World's Tallest Mass Timber Building," *Arch Daily*, 2017. [Online]. Available: <https://www.archdaily.com/879625/inside-vancouvers-brock-commons-the-worlds-tallest-timber-structured-building/>. [Accessed 25 Mai 2020].
- [79] R. Hutton, "Morgan Aero 8," *Car and Driver*, 1 Aprill 2001. [Online]. Available: <https://www.caranddriver.com/reviews/a15139262/morgan-aero-8-first-drive-review/>. [Accessed 25 Mai 2020].
- [80] National Research Council; Division on Engineering and Physical Sciences; Commission on Engineering and Technical Systems; Committee on Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology, "Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology," *The National Academis of Sciences, Engineering, Medicine*, 1991. [Online]. Available: <https://www.nap.edu/read/1824/chapter/6>. [Accessed 26 Mai 2020].

- [81] Fraunhofer-Gesellschaft, "Intelligently recovering and recycling balsa wood," Science X, 2 Märts 2020. [Online]. Available: <https://phys.org/news/2020-03-intelligently-recovering-recycling-balsa-wood.html>. [Accessed 26 Mai 2020].
- [82] B. Esler, "Balsa Wood Substitute Developed for Wind Turbine Blades," Woodworking Network, 21 Desember 2014. [Online]. Available: <https://www.woodworkingnetwork.com/wood/lumber-data-trends/Balsa-Wood-Substitute-Developed-for-WInd-Turbine-Blades-286518311.html>. [Accessed 26 Mai 2020].
- [83] TimberTower, "TIMBERTOWER, Special construction," Timber Composite Technology, 2012. [Online]. Available: <https://ticomtec.de/en/referenz/timbertower/>. [Accessed 26 Mai 2020].
- [84] M. Lewis, "Sweden erects the first wooden wind turbine tower," Electrek, 7 Mai 2020. [Online]. Available: <https://electrek.co/2020/05/07/sweden-erects-first-wooden-wind-turbine/>. [Accessed 26 Mai 2020].
- [85] Renewable Energy Magazine editorial team, "First Wooden Wind Power Tower Erected In Sweden," Renewable Energy Magazine, 29 Aprill 2020. [Online]. Available: <https://www.renewableenergymagazine.com/wind/first-wooden-wind-power-tower-erected-in-20200429/>. [Accessed 26 Mai 2020].
- [86] Material District, "LIGNOLOC: THE FIRST COLLATED NAILS MADE OF WOOD," Material District, 10 Oktoober 2017. [Online]. Available: <https://materialdistrict.com/article/lignoloc-nails-wood/#moved>. [Accessed 27 Mai 2020].
- [87] Beck, "LIGNOLOC® - THE SYSTEM," BECK, [Online]. Available: <https://www.beck-lignoloc.com/en/lignoloc>. [Accessed 27 Mai 2020].
- [88] B. Coxworth, "Look out, glass – Scientists develop "transparent wood"," New Atlas, 30 Märts 2016. [Online]. Available: <https://newatlas.com/transparent-wood/42560>. [Accessed 27 Mai 2020].
- [89] Y. Li, Q. Fu, S. Yu, M. Yan and L. Berglund, "Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance," ACS Publication, 4 Märts 2016. [Online]. Available:

<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.biomac.6b00145>. [Accessed 27 Mai 2020].