

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte  
Latvia University of Life Sciences and Technologies

Meža un vides zinātņu fakultāte  
Faculty of Forest and Environmental Sciences



*Mg.sc.ing.* **Anete MELJA**

**TERMISKI MODIFICĒTU BĒRZA, APSES UN PAPELES FINIERU  
IZPĒTE VIDEI DRAUDZĪGĀKU SAPLĀKŠŅU RAŽOŠANAI**

***INVESTIGATION OF THERMALLY MODIFIED BIRCH, ASPEN, AND  
POPLAR VENEERS FOR THE PRODUCTION OF MORE  
ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PLYWOOD***

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

Zinātnes doktora grāda

zinātnes doktors (*Ph.D.*) inženierzinātnēs un tehnoloģijās iegūšanai

SUMMARY

of the doctoral thesis for acquiring Doctoral degree of Science (*Ph.D.*)  
in Engineering Science and Technology

Jelgava  
2026

## INFORMĀCIJA/ SYNOPSIS

### **Promocijas darba zinātniskie vadītāji/ Academic supervisors:**

Asoc.prof., *Dr.sc.ing.* Uldis SPULLE, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte (LBTU)

Doc. *Dr.oec.* Evija KOPEIKA, Rīgas Tehniskā universitāte (RTU)

**Promocijas darbs izstrādāts** Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Meža un vides zinātņu fakultātes Būvniecības un kokapstrādes institūtā, Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūtā un Bioekonomikas institūtā Itālijā laika posmā no 2013. līdz 2025. gadam.

*The research was carried out at the Institute of Civil Engineering and Woodworking of the Faculty of Forest and Environmental Sciences of the Latvian University of Life Sciences and Technologies, the Latvian State Institute of Wood Chemistry, and the Bioeconomy Institute in Italy from 2013 to 2025.*

### **Pētījumi veikti sekojošu projektu ietvaros/ Research was carried out within the framework of the following projects:**

1. Saplāksnis ar uzlabotu izturību pret apkārtējās vides ietekmi (P5). Pētījumu programmas īstenošana Latvijas Lauksaimniecības universitātē. 2018.-2021./ *Plywood with improved resistance to environmental impact (P5). Implementation of the research programme at the Latvia University of Agriculture. 2018.-2021.*
2. Inovācijas meža apsaimniekošanā un koksnes apstrādes pievienotās vērtības ķēdē Latvijas izaugsmei: jauni pakalpojumi, produkti, tehnoloģijas (Forest4LV). Nr.VPP-ZM-VRIIILA-2024/2-0002", LR LZP, 2024.-2025./ *Innovation in Forest Management and Value Chain for Latvia's Growth: New Forest Services, Products and Technologies (Forest4LV). Nr.VPP-ZM-VRIIILA-2024/2-0002", LR LZP, 2024.-2025.*



**Oficiālie recenzenti/ *Official reviewers:***

1. *Dr.sc.ing.* Uģis CĀBULIS, Vadošais pētnieks, Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūts/ Leading Researcher, Latvian State Institute of Wood Chemistry.
2. *Dr.sc.ing.* Zane ZELČA, Asoc. prof., Rīgas Tehniskā universitāte/ Associate Professor, Riga Technical university.
3. *Ph.D.* Paola CETERA, Pētniece, University of Padua, Itālija/ Researcher, University of Padua, Italy

**Promocijas darba aizstāvēšana paredzēta** Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes (LBTU) Materiālzinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Būvniecības un kokapstrādes institūta Prof. (*Emeritus*), *Dr.habil.sc.ing.* Henn TUHERM auditorijā, 2026. gada 24. aprīlī pl.10:00.

*The defense of the doctoral thesis is scheduled at the open session of the Materials Science doctoral council of the Latvia University of Life Sciences and Technologies, in the Institute of Civil Engineering and Woodworking, Prof. (Emeritus), Dr.habil.sc.ing. Henn TUHERM auditorium, 24th of April, 2026 at 10:00 am.*

Ar promocijas darbu var iepazīties LBTU Fundamentālajā bibliotēkā Jelgavā, Lielā ielā 2 un interneta vietnē <https://lbtufb.lbtu.lv/lv/> / *The doctoral thesis can be viewed at the LBTU Fundamental Library in Jelgava, Liela street 2, and at the website <https://lbtufb.lbtu.lv/en>*

© 2026 Anete MEIJA

© 2026 Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte

## SATURS/ CONTENTS

<b>SAĪSINĀJUMI/ ABBREVIATIONS</b>	<b>6</b>
<b>ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA/ APPROBATION OF SCIENTIFIC WORK</b>	<b>8</b>
<b>1. ZINĀTNISKĀ DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS</b>	<b>11</b>
<b>2. MATERIĀLI UN METODES</b>	<b>13</b>
2.1. FINIERU IZGATAVOŠANA, ATLASE UN TERMISKĀ MODIFIKĀCIJA	13
2.2. TERMISKI MODIFICĒTO FINIERU ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANA	15
2.3. SAPLĀKŠŅU SAGATAVOŠANA UN ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANA	16
2.4. DZĪVES CIKLA NOVĒRTĒJUMS	18
2.5. LABORATORISKI IZVEIDOTO SAPLĀKŠŅU TUVINĀTIE EKONOMISKIE APRĒĶINI	18
2.6. IEGŪTO DATU MATEMĀTISKĀ APSTRĀDE	19
<b>3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS</b>	<b>20</b>
3.1. TERMISKI MODIFICĒTU FINIERU RAKSTUROJUMS	20
3.1.1. FINIERU MASAS ZUDUMI	20
3.1.2. FINIERU OPTISKĀ MIKROSKOPIJA	21
3.1.3. FINIERU VIRSMAS KONTAKTLENĶIS	22
3.1.4. FINIERU VIRSMAS RAUPJUMS	22
3.1.5. FURJĒ TRANSFORMĀCIJAS INFRASARKANĀ SPEKTROSKOPIJA (FTIR)	22
3.1.6. FINIERU BIOIZTURĪBA	24
3.1.7. FINIERU ROBEŽSTIPRĪBA STIEPĒ	24
3.2. SAPLĀKŠŅU LĪMĒŠANA	25
3.2.1. LĪMES ADHĒZIJAS IZTURĪBA PERPENDIKULĀRI ŠĶIEDRAI (ATRAUŠANAS TESTS)	25
3.2.2. SAPLĀKŠŅU LĪMĒŠANA AR KOMERCIĀLAJĀM LĪMĒM UN SUBERĪNSKĀBJU SAISTVIELU	26
3.3. DZĪVES CIKLA NOVĒRTĒJUMS	27
3.4. IZMAKSU APRĒĶINS	30
<b>SECINĀJUMI UN PRIEKŠĻIKUMI</b>	<b>32</b>
<b>PATEICĪBAS</b>	<b>33</b>
<b>1. GENERAL CHARACTERIZATION OF THE SCIENTIFIC WORK</b>	<b>34</b>
<b>2. MATERIALS AND METHODS</b>	<b>36</b>
2.1. VENEER PRODUCTION, SELECTION, AND THERMAL MODIFICATION	36
2.2. DETERMINATION OF THE PROPERTIES OF THERMALLY MODIFIED VENEERS	38
2.3. PREPARATION OF PLYWOOD AND DETERMINATION OF ITS PROPERTIES	39
2.4. LIFE CYCLE ASSESSMENT	41

2.5. APPROXIMATE ECONOMIC CALCULATIONS FOR LABORATORY- MANUFACTURED PLYWOOD	42
2.6. MATHEMATICAL PROCESSING OF THE OBTAINED DATA	42
<b>3. RESULTS AND EVALUATION</b>	<b>43</b>
3.1. CHARACTERISATION OF THERMALLY MODIFIED VENEERS	43
3.1.1. VENEER MASS LOSS	43
3.1.2. OPTICAL MICROSCOPY OF VENEERS	44
3.1.3. VENEER SURFACE CONTACT ANGLE	45
3.1.4. VENEER SURFACE ROUGHNESS	45
3.1.5. FOURIER-TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY	46
3.1.6. BIOLOGICAL DURABILITY OF VENEERS	47
3.1.7. VENEER TENSILE STRENGTH	48
3.2. PLYWOOD BONDING	49
3.2.1. ADHESIVE BOND STRENGTH PERPENDICULAR TO THE GRAIN (PULL-OFF TEST)	49
3.2.2. PLYWOOD BONDING USING COMMERCIAL ADHESIVES AND THE SUBERINIC ACIDS ADHESIVE	50
3.3. LIFE CYCLE ASSESSMENT	52
3.4. COST CALCULATION	54
<b>CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS</b>	<b>56</b>
<b>ACKNOWLEDGEMENTS</b>	<b>58</b>

## SAĪSINĀJUMI/ ABBREVIATIONS

### Saīsinājumi/abbreviations

ADP -	abiotiskā noplicināšanās/ <i>abiotic depletion</i>
ADPE -	abiotiskās noplicināšanās potenciāls – metāli un minerāli/ <i>abiotic depletion potential – metals and minerals</i>
ADPF -	abiotiskās noplicināšanās potenciāls – fosilie resursi/ <i>abiotic depletion potential -fossil</i>
AP -	paskābināšanās potenciāls/ <i>acidification potential</i>
CR -	sapresēšanās pakāpe/ <i>compression ratio</i>
CRF -	kapitāla atgūšanas koeficients/ <i>capital revenue factor</i>
EAC -	ekvivalentās gada izmaksas/ <i>equivalent annual costs</i>
Ekspluatācijas klase -	salīmējamības klase/ <i>bonding class</i>
EP -	saldūdens eutrofikācija/ <i>eutrophication potential</i>
EP-freshwater -	eutrofikācijas potenciāls – saldūdens/ <i>eutrophication potential-freshwater</i>
EP-marine -	eutrofikācijas potenciāls – jūras ūdens/ <i>eutrophication potential-marine</i>
EP-terrestrial -	eutrofikācijas potenciāls – sauszeme/ <i>eutrophication potential-terrestrial</i>
ESS -	aprēķinātā dispersija/ <i>explained sum of squares</i>
FF -	fenola - formaldehīda sveķu līme/ <i>phenol-formaldehyde resin</i>
FPMP -	sīko daļiņu formēšanās potenciāls/ <i>fine particulate matter formation potential</i>
FTIR -	Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija/ <i>Fourier transform infrared spectroscopy</i>
GWP -	globālās sasilšanas potenciāls/ <i>global warming potential</i>
GWP-biogenic -	globālās sasilšanas potenciāls - biogēniskais/ <i>global warming potential-biogenic</i>
GWP-fossil -	globālās sasilšanas potenciāls – fosilais/ <i>global warming potential-fossil</i>
GWP-luluc -	globālās sasilšanas potenciāls – zemes lietojums un zemes lietojuma izmaiņas/ <i>global warming potential land use and land use changes</i>
GWP-total -	globālās sasilšanas potenciāls – kopējais/ <i>global warming potential-total</i>
HB -	hibrīdā polimēra līme/ <i>hybrid polymer glue</i>
IRP -	jonizējošās radiācijas potenciāls/ <i>ionized radiation potential</i>
IRR -	iekšējā peļņas norma/ <i>internal rate of return</i>
LBTU -	Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte/ <i>Latvia University of Life Sciences and Technologies</i>
LCA -	dzīves cikla novērtējums/ <i>life cycle assessment</i>
LCIA -	dzīves cikla ietekmes uz vidi novērtējums/ <i>life cycle impact assessment</i>
LF -	A/S “Latvijas Finieris”/ <i>JSC “Latvijas Finieris”</i>
MC -	relatīvais gaisa mitruma saturs/ <i>relative moisture content of air</i>

MEE -	līdzsvara mitrums un mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte/ <i>moisture exclusion efficiency</i>
ML -	masas zudumi/ <i>mass loss</i>
MUF -	melamīna-urīnvielas-formaldehīda līme/ <i>melamine-urea-formaldehyde glue</i>
NPV -	neto pašreizējā vērtība/ <i>net present value</i>
ODP -	stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls/ <i>ozone depletion potential</i>
PED -	pirmējās enerģijas noplicināšanās/ <i>primary energy depletion</i>
POCP -	fotoķīmiskais ozona rašanās potenciāls/ <i>photochemical ozone creation potential</i>
PT -	priekšapstrāde/ <i>pre-treatment</i>
PU -	poliuretāna līme/ <i>polyurethane glue</i>
RI -	daļiņu skaits/ <i>potential ecological risk index</i>
RSS -	novērtētā dispersija/ <i>residual sum of squares</i>
SA -	suberīnskābju saistviela/ <i>suberinic acids adhesive</i>
SD -	standartnovirze/ <i>standard deviation</i>
TAP -	zemes paskābināšanās potenciāls/ <i>terrestrial acidification potential</i>
TSS -	kopējā dispersija/ <i>total sum of squares</i>
VT -	termiskā modifikācija vakuumā (termovuoto)/ <i>thermal modification at reduced pressure (termovuoto)</i>
WDP -	ūdens izsīkšanas potenciāls/ <i>water depletion potential</i>
WTT -	termiskā modifikācija ūdens tvaika vidē/ <i>thermal modification in a water vapour environment at elevated pressure</i>

## ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA/ APPROBATION OF SCIENTIFIC WORK

Promocijas darbā iekļauti divi pētījumi, kuru nozīmīgākie rezultāti publicēti 9 tematiski saistītās zinātniskās publikācijas. Publikācijas publicētas starptautiskos recenzējamos rakstu krājumos un ir pieejamas datu bāzēs.

*The doctoral thesis includes two studies, the most significant results of which have been published in nine thematically related scientific publications. The publications have been published in international peer-reviewed journals and are accessible in databases.*

### Zinātniskās publikācijās par darba tēmu/ *Scientific publication related to the subject of the thesis*

1. **Meija A.**, Spulle U., Cuccui I., Paze A., Rizikovs J. 2026. Life Cycle Assessment of Plywood Production Using Thermally Modified Birch Veneers Bonded with Suberinic Acids Adhesive. Resources, 15(3), 34, pp. 2-16, <https://doi.org/10.3390/resources15030034>
2. **Meija A.**, Spulle U., Šillers H. 2025. Gluability of thermally modified birch (*Betula pendula* Roth.), aspen (*Populus tremula* L.), and poplar (*Populus x canadensis* Moench) veneers using commercial adhesives. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering, Vol. 18(67), No. 3 Special Issue, p.27-38. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2025.18.67.3.3>
3. **Meija A.**, Spulle U., Ramata L., Cuccui I., Allegretti O., Paze A., Rizikovs J. 2025. Gluability of Thermally Modified Aspen, Birch, and Poplar Rotary Cut Veneers with Suberinic Acids Adhesive. Sustainability, 17(5), 1990. <https://doi.org/10.3390/su17051990>
4. Spulle U., **Meija A.**, Kūliņš L., Kopeika E., Liepa K.H., Šillers H., Zudrags K. Influence of hot pressing technological parameters on plywood bending properties. BioResources. Vol 16(4), 2021., pp. 7550-7561., <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7550-7561>
5. Kūliņš L., **Meija A.**, Roziņš R., Liepa K.H., Spulle U. Influence of veneer density on plywood thickness and some mechanical properties. Rural Sustainability Research. Scientific Journal of Latvia University of Life Sciences and Technologies. Warsaw: De Gruyter Open. Nr. 46(341), 2021., pp 66-74., <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0018>
6. **Meija A.**, Irbe I., Morozovs A., Spulle U. 2020. Properties of *Populus* genus veneers thermally modified by two modification methods: wood treatment technology and vacuumthermal treatment. Agronomy Research, 18 (3) pp. 2138-2147 DOI: <https://doi.org/10.15159/ar.20.184>
7. **Meija-Feldmane A.**, Cuccui I., Irbe I., Morozovs A., Spulle U. 2020. Properties of modified wood according to treatment technology and thermo-

- vacuum process for birch (*Betula pendula* Roth.) veneers. *BioResources*, 15(2), pp. 4150-4164., <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.4150-4164>
8. **Meija-Feldmane A.**, Morozovs A., Spulle U. 2019. Chemical alterations of hardwood veneers due to thermal treatment. *Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources*, 1, pp. 159-163. <http://dx.doi.org/10.17770/etr2019vol1.4147>
  9. **Meija-Feldmane A.**, Sansonetti E., Morozovs A., Spulle U. 2019. Thermal modification as tool to increase hydrophobicity of veneers. *Engineering for Rural Development*, 18, pp. 1059-1064. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N395>

**Promocijas darba pētījumu rezultātu prezentācija zinātniskajās konferencēs/  
*Research of the thesis presented at the scientific conferences***

1. Spulle U., **Meija A.**, Kopeika E., Pāže A., Rižikovs J. Videi draudzīgu un bioizturīgu saplākšņu izveide. Valsts pētījumu programmas zinātnisko projektu "GreenAgroRes" un "Forest4LV" noslēguma konference, 10. decembris, 2025, Jelgava, Latvija
2. **Meija A.**, Spulle U., Šillers H. Gluability of Thermally Modified Birch (*Betula Pendula* Roth.), Aspen (*Populus tremula* L.), and Poplar (*Populus x canadensis* Moench) Veneers Using Commercial Adhesives. International Conference “Wood Science and Engineering in the Third Millennium”– ICWSE 2025”, 06.-08. novembris, 2025, Brašova, Rumānija
3. **Meija A.**, Spulle U., Šillers H. Gluability of Thermally Modified Birch (*Betula Pendula* Roth.), Aspen (*Populus tremula* L.), and Poplar (*Populus x canadensis* Moench) Veneers Using Commercial Adhesives. Starptautiskā zinātniskā un praktiskā konference “Vide. Tehnoloģijas. Resursi 19.-20. jūnijs, 2025, Rēzekne, Latvija
4. **Meija A.**, Spulle U., Cuccui I., Allegretti O., Pāže A., Rižikovs J. Gluability of the thermally modified aspen, birch, and poplar rotary cut veneers with suberinic acids adhesive. *Materials* 2025, 10.-12. marts, 2025, Roma, Itālija
5. **Meija-Feldmane A.** Irbe I., Morozovs A., Spulle U. Properties of Wood Treatment Technology and vacuum - thermal treatment of Populus genus veneers. *Biosystems Engineering*, 6. maijs, 2020, Tartu, Igaunija
6. **Meija-Feldmane A.**, Morozovs A., Spulle U. Chemical alterations of hardwood veneers due to thermal treatment. 12. konference Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources, 20.-22. jūnijs, 2019, Rēzekne, Latvija
7. **Meija-Feldmane A.**, Sansonetti E., Morozovs A., Spulle U. Thermal modification as tool to increase hydrophobicity of veneers. 18. konference Engineering for Rural Development, 22.-24. Maijs 2019, Jelgava, Latvija

8. **Meija-Feldmane, A.** Environmental aspects of biocide treated (*Pinus sylvestris* L.) wood. Mežzinātne un prakse nozares attīstībai, 14.-17. marts, 2016, Jelgava, Latvija
9. **Meija-Feldmane, A.** “Leaching and durability of copper treated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood”. Proceedings of 21st Annual International Scientific Conference "Research for Rural Development 2015, 13th-15th May 2015, Jelgava, Latvija
10. **Meija-Feldmane, A.,** Cīrule, D., Kuka, E., Andersons, B. Colour changes of thermally modified hardwood under different conditions. 10th meeting “Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)”, 13-14 October 2014, Edinburg, Skotija

# 1. ZINĀTNISKĀ DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Promocijas darba tēmas izvēles pamatojums un aktualitāte

Koksne ir dabisks materiāls, un tās dzīves cikls ietver noārdīšanos, ko veicina sēnes, baktērijas un kukaiņi. Materiāla spēju pretoties bioloģiskai noārdīšanai sauc par bioizturību. Tādas koku sugas kā apse (*Populus tremula* L.) un bērzs (*Betula pendula* L.) pieder pie bioloģiski neizturīgām koku sugām.

Pasaulē pieaugot pieprasījumam pēc koksnes resursiem, bioizturīgo sugu piedāvājums sarūk. Tādēļ ir būtiski rast pielietojumu arī bioloģiski ne tik izturīgām koku sugām, paaugstinot to bioizturību ar dažādiem paņēmieniem. Koksnes modifikācija ir process, kura mērķis ir uzlabot fizikālās, mehāniskās vai estētiskās īpašības, piemēram, novērst zemu bioizturību, izmēru nestabilitāti un jutību pret mitruma satura izmaiņām. Modifikācijas nozīmi palielina arī pieaugošā izpratne un pastiprinātais likumiskais regulējums koksnes aizsardzības līdzekļu pielietošanas jomā.

Koksnes termiskā modifikācija ir modifikācijas veids, kurā tiek izmantota tikai temperatūra, kas veicina izmaiņas koksnes ķīmiskajā sastāvā un koksnes šūnas sienīgas struktūrā. Šī apstrāde paaugstina koksnes bioizturību, samazina ūdens uzsūkšanos jeb higroskopiskumu un uzlabo formas stabilitāti, padarot to piemērotu lietošanai āra apstākļos. Termiskā modifikācija vakuumā (VT) jeb THERMOVUOTO® ir patentēta tehnoloģija, kas samazina skābekļa koncentrāciju un ar vakuuma palīdzību aizvada gaistošos organiskos savienojumus, tādējādi nodrošinot mazākus masas zudumus procesā un mazāk samazinātas mehāniskās īpašības.

Saplākšnis ir daudzpusīgs materiāls ar plašu pielietojumu. Tā īpašības padara to par svarīgu materiālu celtniecībā, slodzēm pakļautās konstrukcijās, betona veidņu plātnēs, mēbeļu ražošanā, iekšējā apdarē, grīdas segumos, transportā, un citās nozarēs. 2024. gadā Eiropas Savienības valstīs saražoti 2.7 miljoni m<sup>3</sup> splākšņu un pasaulē pieaug pieprasījums pēc splākšņu materiāliem un produktiem. Izejmateriālu izvēle, kas nosaka splākšņu cenu un īpašības, ir ļoti būtiska.

**Promocijas darba mērķis:** iegūt jaunas zināšanas par Termovuoto procesā termiski modificētiem bērza, apses un papeles finieriem, un to potenciālo pielietojumu splākšņu ražošanā.

**Pētnieciskā hipotēze:** no Termovuoto procesā termiski modificētiem finieriem ir iespējams iegūt nišas produktu – āra apstākļiem piemērotus splākšņus.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti sekojoši **uzdevumi:**

1. raksturot finiera modificēšanas procesu un iegūtā materiāla īpašības;

2. izpētīt saplākšņu iegūšanas iespējas;
3. novērtēt jaunā materiāla ietekmi uz vidi;
4. izvēlēties optimālu un ekonomiski pamatotu saplākšņu kompozīciju.

#### **Promocijas darba hipotēze ir aizstāvama ar sekojošām tēzēm:**

1. termovuoto procesā termiski modificēti finieri ir labāk piemēroti saplākšņu ražošanai nekā WTT procesā modificēti finieri;
2. no bērza saplākšņu ražošanas blakusprodukta – bērza tāss iegūta suberīnskābes saistviela ir piemērota 3. lietojuma klasei atbilstošu saplākšņu ražošanai;
3. saplākšņiem no Termovuoto procesā termiski modificētiem finieriem, līmētiem ar suberīnskābes saistvielu, ir mazāka ietekme uz vidi nekā ar fenola-formaldehīda līmi līmētiem bērza saplākšņiem;
4. saplākšņi no Termovuoto procesā termiski modificētiem finieriem, līmēti ar suberīnskābes saistvielu, ir ekonomiski pamatots nišas produkts.

#### **Zinātniskā novitāte:**

- jauna nišas produkta izpēte;
- inovatīvas līmvielas izmantošana;
- termiskās modifikācijas procesu salīdzinājums plāniem finieriem;
- ietekmes uz vidi novērtējums jaunajam produktam.

#### **Pienesums nozares attīstībā:**

jauna nišas produkta izpēte, produkta vides deklarāciju salīdzinājums ar nemosificētiem un ar fenola-formaldehīda sveķiem līmētiem tradicionālajiem bērza saplākšņiem.

#### **Darba struktūra un apjoms:**

Promocijas darbs sastāv no 3 nodaļām:

1. literatūras apskats;
2. materiāli un metodes;
3. rezultāti un to izvērtējums.

Darbs noformēts uz 115 lappusēm, ar 66 attēliem, 44 tabulām un 28 formulām. Izmantoto informācijas avotu sarakstā ietilpst: 126 literatūras avoti, 20 standarti un normatīvi. Promocijas darba kopsavilkumā iekļautos literatūras avotus skatīt promocijas darbā.

## 2. MATERIĀLI UN METODES

### 2.1. Finieru izgatavošana, atlase un termiskā modifikācija

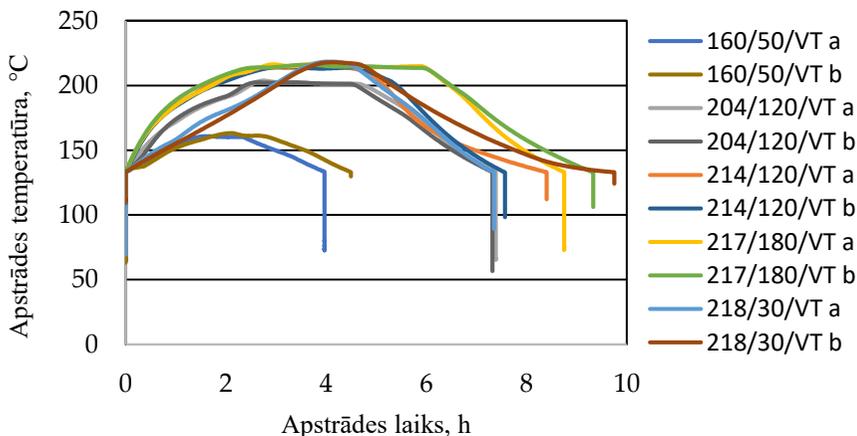
Ekspperimentu veikšanai izmantoti lobīta bērza (*Betula pendula* Roth) 1.5 mm biezi finieri, kas sagatavoti A/S "Latvijas Finieris", apses (*Populus tremula* L.) 2.5 mm biezi finieri, kas sagatavoti SIA "Rīga Veneer", un papeles (*Populus x canadensis* Moench) 1.5 mm biezi finieri, kas sagatavoti "Toro Compensanti" rūpnīcā Itālijā. Izmantotie finieri raksturo materiālu, kāds ir pieejams ražošanā un pārbaudēm, paraugu izgatavošanai izvēlēti finieri bez redzamām koksnes vainām un ražošanas defektiem.

Izmantotas divas termiskās modificēšanas metodes:

1. Termo – vakuuma tehnoloģija TERMOVOUTO® (VT) pēc klasifikācijas uzskatāma par atvērtu sistēmu sausos modifikācijas apstākļos, ar pazeminātu spiedienu 25 kPa tiek nodrošināta gan skābekļa, gan procesa laikā radušos koksnes destrukcijas produktu aizvadīšana. Finieru sildīšana notiek konvektīvi caur alumīnija plāksnēm (skat. 2.1. att.) Kopējais modifikācijas laiks no 13 līdz 24 stundām. Šis termiskās apstrādes veids veikts visu trīs sugu finieriem piecos modifikācijas režīmos (skat. 2.2. att.). Modifikācijas režīmi izvēlēti, lai vispirms atkārtotu WTT optimālo režīmu 160/50, kā arī, lai atkārtotu šī režīma masas zudumus (214/120), iegūtu par 2% lielākus (217/180) un par 2% mazākus (204/120) masas zudumus.



2.1. att. Finieri starp alumīnija plāksnēm modificēšanai VT procesā

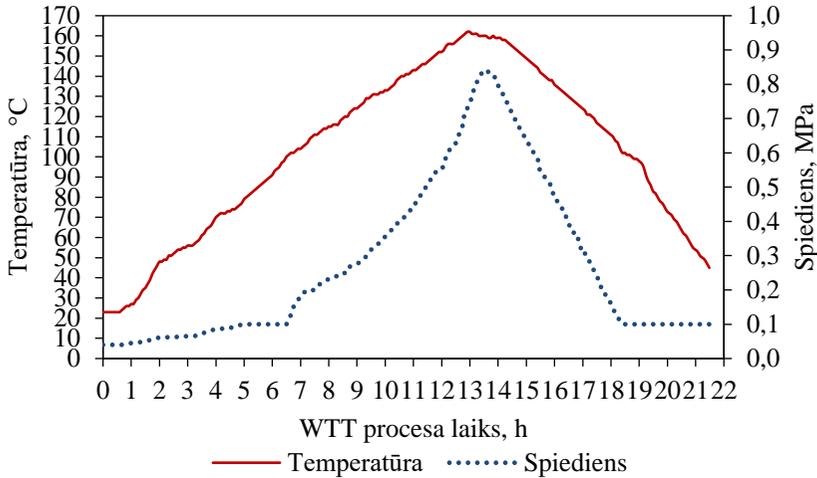


2.2. att. **VT termiskās modifikācijas grafiki:**  
a un b modifikācijas paralēlās reizes

2. WTT tehnoloģija - Koksnes termiskā modifikācija paaugstināta mitruma apstākļos – ūdens tvaika vidē veikta Wood Thermal Technology (WTT) iekārtā (skat. 2.3. att.) iepriekš noteiktā optimālā režīmā ar maksimālās termiskās apstrādes temperatūras 160 °C nodrošināšanu 50 min. Sākotnēji koksnes materiāls tiek vakuumēts, lai samazinātu skābekļa daudzumu iekārtā, modifikācija noris ūdens tvaika vidē ~ 0.6 MPa spiedienā, procesā tiek patērēti 15.6 l ūdens. Kopējais termiskās modifikācijas procesa laiks ir no 26 līdz 27 stundām. Līdz 100 °C temperatūras celšanas ātrums ir no 0.16 līdz 0.22 °C minūtē, savukārt no 100 °C līdz maksimālajai temperatūrai temperatūras celšanas ātrums ir lēnāks - no 0.12 līdz 0.16 °C min<sup>-1</sup> (skat. 2.4. att.). Finieru pakas biežums 10 loksnes, kopējais paraugu skaits 60 finieri.



2.3. att. **WTT termiskajai apstrādei sagatavoti bērza finieri**

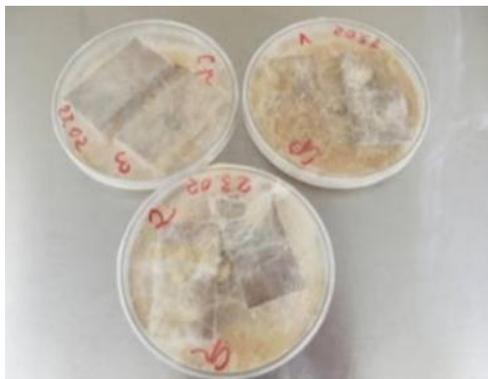


2.4. att. **WTT termiskās apstrādes procesa līkne** (Juris Grīniņš, 2016)

Spiediena paaugstināšanās slēgtajā procesā notiek pēc vairāk nekā 6 stundām, sasniedzot ūdens vārīšanās temperatūru.

## 2.2. Termiski modificēto finieru īpašību noteikšana

Lai analizētu iegūto finieru īpašības, noteikti to masas zudumi termiskās modifikācijas procesa laikā, finieru blīvums pirms un pēc modifikācijas (ISO 13061-2:2014), finieru krāsas izmaiņas CIEL\*a\*b krāsu sistēmā gan pirms, gan pēc modificēšanas, gan dabiskās novecināšanas laikā āra apstākļos (ISO/CIE 11664:2019). Noteikts arī finieru līdzsvara mitrums un mitruma adsorbcijas samazināšanās efektivitāte (ISO 13061-1:2014), uzņemti optiskās mikroskopijas attēli, noteikts finieru virsmas kontaktleņķis un finieru virsmas profils, pēc kura aprēķināts 10 punktu vidējais raupjums. Noskaidroti Furjē transformācijas infrasarkanās spektroskopijas spektri paraugiem pēc modificēšanas un pēc dabiskās novecināšanas (EN 927-3:2019). Noteikta finieru bioizturība laboratorijas apstākļos pret brūnās trapes sēni *Coniophora puteana* (skat. 2.5. att.) (EN 12038:2002). Noteikta finieru robežstiprība stiepē (GOST 20800-75:1976) un noteikta finieru līmes adhēzija perpendikulāri šķiedrām ar atraušanas testu (ISO 4624:2023).



2.5. att. Apses finieri 214/120/VT pēc 6 nedēļu bioizturības testa

### 2.3. Saplākšņu sagatavošana un īpašību noteikšana

Pēc termiskās apstrādes finiera loksnes kondicionētas pie relatīvā mitruma  $65 \pm 5\%$  un  $20 \pm 3$  °C. Līmēšanai izmantota suberīnskābju saistviela. Suberīnskābes saistvielas raksturlielumi:

- frakcijas lielums mazāks vai vienāds ar 1 mm;
- sausnes saturs - 20 masas %;
- pelnu saturs - 5 masas %;
- pH-2;
- krāsa - brūna.

Saistviela ir izstrādāta un patentēta Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūtā. Izgatavoto saplākšņu izmērs –  $290 \times 290 \times 4.5$  mm. Līmēšanas procesā tiek noteikta saplākšņu sapsesēšanās pakāpe. Lai salīdzinātu suberīnskābes līmes izturību ar komerciāli lietotajām līmēm, izveidoti arī saplākšņi, izmantojot tādas tirgū pieejamās līmes kā fenola-formaldehīda sveķi (SFŽ-3014), melamīna-formaldehīda-urīnvielas līme (Casco Adhesives MUF system 1257/7557), hibrīdā polimēra līme (Soudal HB Construct) un vienkomponenta poliuretāna līme (PURBOND HB S159). Saplākšņu līmēšanas parametri attēloti tabulā 2.1.

Saplākšņu šuves stiprība noteikta atbilstoši standartu EN 314-1:2004 un EN 314-2:1993 prasībām 3. lietojuma klasei āra apstākļos.

Paraugi robežstiprībai stiepē - bīdē izgatavoti no salīmētajiem saplākšņiem, kuru garums un platums attiecīgi  $290 \times 290$  mm. Katram saplākšņu veidam izgatavoti 4 saplākšņi un no viena saplākšņa izgatavoti 20 paraugi jeb kopā vienam saplākšņu veidam 80 paraugi.

2.1. tabula

Līme	Temperatūra, °C	Spiediens, MPa	Laiks, min
Fenola-formaldehīda sveķi (FF) (SFŽ-3014)	145	1.8	7
HB Construct līme (HB) (Soudal)	20	1.8	20
Melamīna – urīnvielas-formaldehīda līme (MUF) (CASCO adhesives 1257/7557)	20	1.8	116
Vienkomponenta poliuretāna līme (PU) (PURBOND HB S159)	20	1.8	90
Suberīnskābju saistviela (SA)	215	1.8	5

Paraugi iepriekš apstrādāti saskaņā ar standarta EN 314-1:2004 prasībām atbilstoši lietošanas klasei, kas sevī ietver dažādus priekšapstrādes veidus:

1. 24h iemērķšanu ūdenī pie temperatūras  $(20 \pm 3)$  °C;
2. 6 h vārīšanu ūdenī, tad atdzesēšanu  $(20 \pm 3)$  °C ūdenī vismaz vienu stundu;
3. 4 h vārīšanu ūdenī, tad žāvēšanu krāsnī  $(60 \pm 3)$  °C temperatūrā 16 h, tad atkārtotu 4 h vārīšanu un pēc tam 1 h atdzesēšanu  $(20 \pm 3)$  °C ūdenī;
4.  $(72 \pm 1)$  h vārīšanu, tad atdzesēšanu  $(20 \pm 3)$  °C ūdenī vismaz vienu stundu.

Konkrēta priekšapstrādes veidu kombinācija noteikta atbilstoši EN 314-2:1993 standartam (skat. 2.2. tabulu).

2.2. tabula

### Priekšapstrāde, nosakot atbilstību līmēšanas klasēm

Līmēšanas klase	Priekšapstrāde, atbilstoši EN 314-2 standartam			
	1.	2.	3.	4.
1. klase – iekštelpām	×			
2. klase – aizsargātos āra apstākļos	×	×		
3. klase – āra apstākļos	×		×	×

Piezīme: × - jāveic izturēšana pirms pārbaudes

## 2.4. Dzīves cikla novērtējums

Dzīves cikla novērtējums veikts, lai novērtētu termiski modificētu un ar suberīnskābju saistvielu līmētu bērza saplākšņu ietekmi uz vidi. Deklarētā vienība ir definēta kā 1 m<sup>3</sup> trīsšķāņu saplākšnis.

Saplākšņu ražošanas sistēmas robežas ietver bērza mizas iegūvi kā mizošanas blakusproduktu, bērza mizas ekstrakciju, bērza mizas depolimerizāciju, suspensijas paskābināšanu un filtrāciju, lai iegūtu suberīnskābju līmvielu, visu izejvielu transportēšanu, finieru termisko modificēšanu un gala saplākšņu ražošanu, kā arī gatavā produkta iepakojšanu, nogādāšanu pie klienta un dzīves beigu posmu, kurā modelēts, ka 50% lietoto saplākšņu tiek apglabāti poligonā, un 50% tiek sadedzināti.

Primārie dati par suberīnskābju līmes ražošanu iegūti laboratorijas mēroga eksperimentos Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūtā. Dati par termiski modificētu finieru ražošanu iegūti laboratorijas mēroga eksperimentos, kuri veikti Itālijas Nacionālās pētniecības padomes Bioekonomikas institūtā. Savukārt dati par saplākšņu presēšanu iegūti LBTU Meža un vides zinātņu fakultātes Būvniecības un kokapstrādes institūtā. Kā sekundāro datu avots izmantota datubāze Ecoinvent 3.11. Iepakojšanas materiāli un to daudzums modelēts, balstoties uz A/S "Latvijas Finieris" bērza saplākšņu produktu vides deklarācijas datiem. Pieņemtā ražotnes atrašanās vieta - Dzērbenes iela 27, Rīga.

Aprēķini veikti ar brīvpieejas dzīves cikla aprēķinu programmu openLCA, kā ietekmes uz vidi novērtējuma metode izvēlēta ReCiPe 2016 (H) midpoint, lai pēc tam būtu iespējams aprēķināt vides izmaksas, balstoties uz vides cenu rokasgrāmatas datiem Eiropas Savienībai.

## 2.5. Laboratoriski izveidoto saplākšņu tuvinātie ekonomiskie aprēķini

Saplākšņu cenas aprēķinam izmantoti finanšu vadības pamatprincipi, cenu veidojot, ņemot vērā materiālu izmaksas, darbaspēka izmaksas, ieskaitot nodokļus un riska nodevu, fiksētās izmaksas, tādas kā iekārtu nolietojums, ražošanas telpu īre un komunālie pakalpojumi, kā arī netiešās izmaksas, kurās iekļauta atkritumu apsaimniekošana. Administratīvās izmaksas rēķinātas kā 10% no ražošanas izmaksām. Iekļautais peļņas procents - 10% no kopējām izmaksām.

Eko-izmaksas ir uz LCA balstīts rādītājs, kas pārvērš ietekmi uz vidi naudas izteiksmē, izmantojot vienkāršu formulu, kurā ietekmes uz vidi rādītājs tiek reizināts ar vides cenu konkrētajā ietekmes uz vidi kategorijā. Aprēķināta arī pašreizējā neto vērtība (NPV), lietojot diskonta likmi 4%, projekta iekšējā peļņas norma un ekvivalentās gada izmaksas.

## 2.6. Iegūto datu matemātiskā apstrāde

Datu kopām aprēķināti vidējie aritmētiskie, standartnovirze, dažiem parametriem arī variācijas koeficients. Finieru robežstiprībai stiepē veikta datu matemātiskā analīze - pārbaudīta datu atbilstība Normālajam sadalījumam ar Šapiro - Vilka testu, datu kopu Dispersiju salīdzināšana ar Lēvena testu, atkarībā no iegūtā novērtējuma, tālākā datu analīze veikta izmantojot Kolgomorova - Smirnova testu (datiem, kuri neatbilst Normālajam sadalījumam), ar Bofferoni testa palīdzību salīdzināti robežstiprības rezultāti pa termiskās apstrādes režīmu pāriem, lai izvēlētos piemērotāko (ja dati atbilst Normālajam sadalījumam, pie tam salīdzināmajām datu kopām dispersijas ir statistiski vienādas), visi testi veikti ar 95% ticamību. Noteikta masas zudumu un saplākšņa stiprības stiepē – bīdē izmaiņu korelācija. Datu apstrādei veikta ar programmām MS EXCEL un SPSS.

### 3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

#### 3.1. Termiski modificētu finieru raksturojums

Lai varētu novērtēt eksperimentāli iegūto finieru piemērotību saplākšņu ražošanai, nepieciešams iegūt informāciju par to īpašībām, raksturojot vairākus to parametrus.

##### 3.1.1. Finieru masas zudumi

Masas zudumi ir galvenais parametrs, kas raksturo termiskās apstrādes intensitāti. Masas zudumus izraisa galvenokārt hemiceluložu sadalīšanās, jo tas ir koksni veidojošais polimērs ar vismazāko polimerizācijas pakāpi un augstāko reaģētspēju tā amorfās struktūras dēļ. Iepriekš veiktos pētījumos noskaidrots, ka masas zudumi rodas galvenokārt acetilētā glikuronksilāna deacetilācijas dēļ, kā rezultātā veidojas etiķskābe, kas savukārt katalizē mazāk sakārtotu ogļhidrātu depolimerizāciju. Masas zudumu koksnes termiskās apstrādes procesā atkarība no koksnes sugas, procesa norises vides, temperatūras un tās iedarbības laika ir plaši pētīta. Masas zudumi ļauj savstarpēji salīdzināt dažādus procesus ar dažādām apstrādes temperatūrām un dažādiem apstrādes laikiem.

Masas zudumi dažādos termiskās apstrādes procesos redzami tabulā 3.1. WTT – tvaika process, VT – sausais process. Termiskās apstrādes procesa režīmi izvēlēti tā, lai režīms 214/120 VT atkārtotu 160/50 WTT masas zudumus, kas arī ir izdevies, ņemot vērā kļūdu izkliedes robežas. 217/180 režīma masas zudumi ir par ~2% lielāki nekā 214/120, bet 204/120 ~2% zemāki kā 214/120. VT un WTT modifikācijas metodes ir būtiski atšķirīgas, par ko liecina pie vienādas apstrādes temperatūras un laika 160/50 iegūtie atšķirīgie rezultāti no 5.2 līdz 6.7% masas zudumi 160/50 WTT procesā, kamēr 160/50 VT procesā masas zudumi bija minimāli no 0.1 līdz 1.2%.

3.1. tabula

**Masas zudumi termiskās apstrādes procesos**

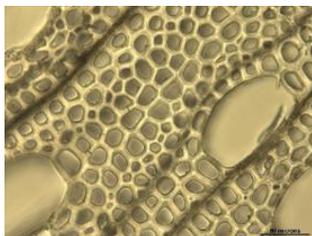
Režīms	Vidējie masas zudumi, %	Standartnovirze, %	Variācijas koeficients, %
Bērzs 160/50 WTT	6.66	0.87	13.0
Apse 160/50 WTT	5.28	1.15	21.7
Papele 160/50 WTT	5.58	0.74	13.3
Bērzs 160/50 VT	1.08	0.24	22.1
Apse 160/50 VT	1.24	1.89	153

### 3.1. tabulas nobeigums

Režims	Vidējie masas zudumi, %	Standartnovirze, %	Variācijas koeficients, %
Papele 160/50 VT	0.10	0.69	530
Bērzs 204/120 VT a	2.77	0.46	16.7
Apse 204/120 VT b	2.29	0.99	43.2
Papele 204/120 VT a	2.88	0.81	28.1
Papele 204/120 VT b	2.99	0.42	14.0
Bērzs 214/120 VT a	5.70	0.51	9.04
Apse 214/120 VT b	4.77	1.28	26.7
Papele 214/120 VT a	6.17	0.85	13.9
Papele 214/120 VT b	6.71	1.70	25.4
Bērzs 217/180 VT a	7.77	1.13	14.6
Apse 217/180 VT b	6.61	0.97	14.6
Papele 217/180 VT a	8.67	0.54	6.25
Papele 217/180 VT b	8.54	0.83	9.74
Bērzs 218/30 VT a	4.72	0.57	12.2
Apse 218/30 VT b	4.24	0.90	21.2
Papele 218/30 VT a	4.60	0.39	8.54
Papele 218/30 VT b	6.17	0.57	9.19

#### 3.1.2. Finieru optiskā mikroskopija

Bērzs pieder pie difūzi-poraino koku sugām un to var novērot šķērsgriezumā. Pēc termiskās apstrādes šūnu sieniņu biezums samazinās, pieaugot termiskās apstrādes procesa temperatūrai un ilgumam. Termiski apstrādāti koksnes paraugi ir trauslāki nekā neapstrādāti, ko secinājis arī Ahmed et.al. Termiskās apstrādes laikā vismazāk ir ietekmētas poras, visvairāk sarukušas celulozes šķiedras, kas šūnām piešķir ovālu formu. Nemodificēta bērza un 218/30/VT bērza parauga optiskās mikroskopijas rezultāti apskatāmi 3.1. attēlā.



Nemodificēts bērzs



218/30/ VT bērzs

3.1. att. Bērza paraugu optiskās mikroskopijas attēli

### 3.1.3. Finieru virsmas kontaktleņķis

Neapstrādātu, VT un WTT procesā apstrādātu finieru kontaktleņķa mērījumi ļauj novērtēt termiskās apstrādes ietekmi uz virsmas hidrofobitāti. Saplākšņu ražošanā labu adhēziju veido saistība starp koksnes virsmu un līmi molekulārā līmenī, ko ietekmē līmes plūstamība pa virsmu. Kontaktleņķa vērtība virs  $90^\circ$  liecina par virsmas hidrofobitāti un zemu slapinājamību. Par hidrofilēm ir uzskatāmi tikai nemodificētas apses, nemodificētas papeles un 160/50/VT režīmā apstrādātas apses finieri. Paaugstinātas hidrofobitātes pozitīvais faktors ir tas, ka šāda koksne mazāk absorbē lietus ūdeni, to lietojot āra apstākļos.

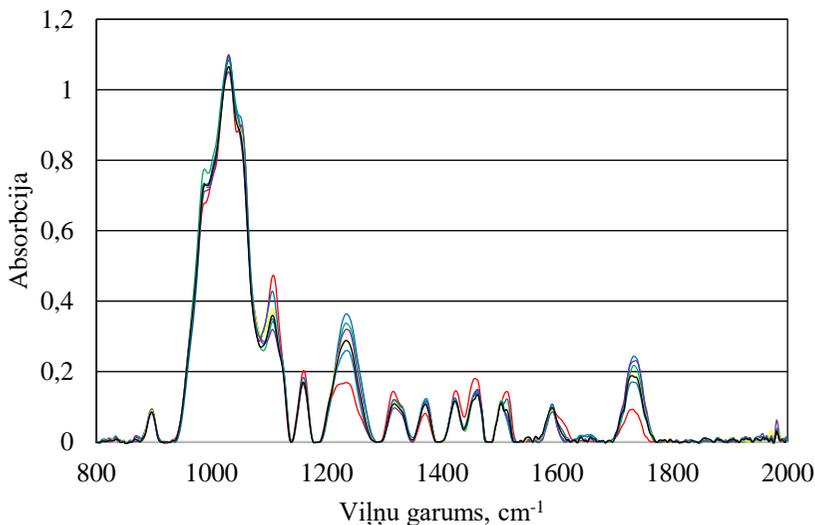
### 3.1.4. Finieru virsmas raupjums

Virsmas profilu raksturošanai izvēlēts 10 punktu vidējais raupjums  $R_{zjis}$ . Virsmas raupjums ir īpašība, kas tieši ietekmē finieru virsmas salīmējamību, kas būtiska saplākšņu ražošanā. Savstarpēji salīdzinot sugas, nemodificētiem bērza finieriem ir mazāks virsmas raupjums nekā apses un papeles finieriem. Bērza termiskā apstrāde visos režīmos, izņemot 160/50/VT samazina virsmas raupjumu, vērojama diezgan liela raupjuma rezultātu izkliede. Apses termiskā apstrāde pazemina virsmas raupjumu visos režīmos, visgludāko virsmu nodrošinot pēc apstrādes bargākajos režīmos – 160/50/WTT un 218/30/VT. Režīmā 217/180/VT virsmas raupjums ir izteiktāks, kas liecina par lielāku apstrādes temperatūras nevis laika ietekmi uz šo parametru. Arī papeles gadījumā visi apstrādes režīmi samazina virsmas raupjumu. Paaugstināts virsmas raupjums samazina kontaktleņķi uz hidrofilas virsmas un tādējādi palielina ūdens uzsūktspēju.

### 3.1.5. Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija (FTIR)

Būtiskākās izmaiņas bērza FTIR spektrā novērojamas bērza paraugiem termiskās modifikācijas dēļ (skat. 3.2. att.). Novērojamas absorbcijas joslas no  $1732$  līdz  $1740\text{ cm}^{-1}$  intensitātes zudums, kas attēlo C=O grupas izmaiņas karbonil, uronil un acetil grupu izmaiņas hemicelulozēs un ksilānā. Straujākais intensitātes zudums ir paraugam, kas apstrādāts 160/50/WTT režīmā, līdzīgi rezultāti redzami arī otrajā izmaiņas hemicelulozēs raksturojošajā absorbcijas joslā no  $1231$  līdz  $1235\text{ cm}^{-1}$ , kas liecina par hemiceluložu destrukciju termiskās apstrādes laikā, turklāt WTT process izraisa lielāku hemiceluložu sadalīšanos nekā VT process. Absorbcijas joslā no  $1108$  līdz  $1051\text{ cm}^{-1}$  turpretī vērojams intensitātes pieaugums, kas raksturo celulozes C-O saites otrējos spirtos un liecina par celulozes satura

palielināšanos.



- |                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| — Nemodificēts bērzs | — Bērzs 160/50/WTT |
| — Bērzs 160/50/VT    | — Bērzs 204/120/VT |
| — Bērzs 214/120/VT   | — Bērzs 217/180/VT |
| — Bērzs 218/30/VT    |                    |

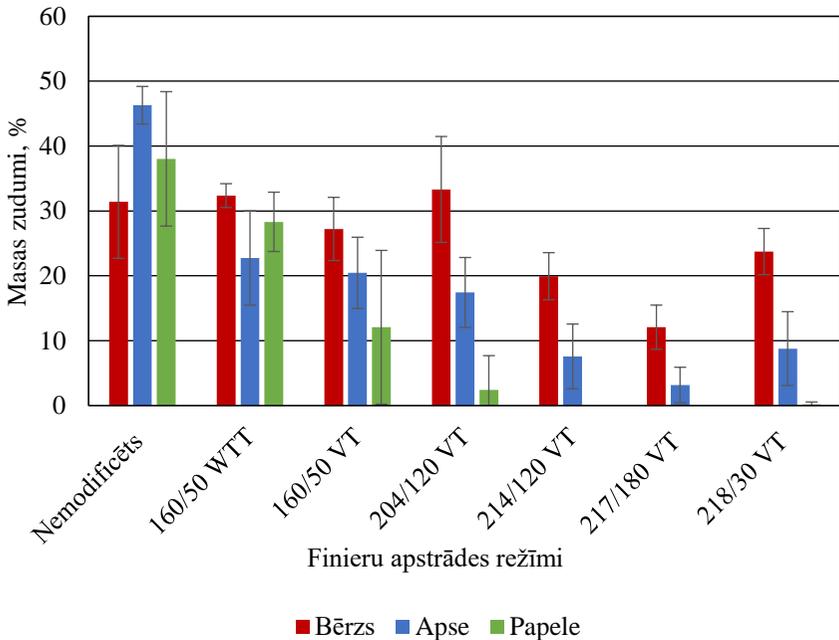
### 3.2. att. Bērza FTIR spektru raksturojošais apgabals

Aplūkojot izmaiņas apses FTIR spektros, novērojamas tās pašas tendences, kas bērza FTIR spektru gadījumā – intensitātes kritums absorbcijas joslās no 1732 līdz 1740  $\text{cm}^{-1}$  un no 1231 līdz 1235  $\text{cm}^{-1}$  ir visizteiktākais režīmam 160/50/WTT, kas liecina par to, ka termiskās apstrādes procesā notiekošās izmaiņas finieru ķīmiskajā sastāvā ir līdzīgas visām pētītajām lapkoku sugām. Apses 160/50/WTT apstrādātiem finieriem vērojams arī absorbcijas joslas no 1159 līdz 1166  $\text{cm}^{-1}$  intensitātes pieaugums, kas liecina par lignīna satura pieaugumu, raksturojot C=O konjugētās esteru grupas lignīnā.

Papeles FTIR spektros straujākais absorbcijas joslas no 1231 līdz 1235  $\text{cm}^{-1}$  intensitātes zudums ir režīmam 217/180/VT, kam seko 160/50/WTT, 218/30/VT, 214/120/VT un 204/120/VT, un 160/50/VT. Šī absorbcijas josla raksturo hemiceluložu sadalīšanos un iegūtie rezultāti sakrīt ar masas zudumu rezultātiem, kas liecina, ka masas zudumi termiskās apstrādes procesā parādās galvenokārt hemiceluložu sadalīšanās dēļ.

### 3.1.6. Finieru bioizturība

Finieru bioizturības indikatīvā testa rezultāti būtiski atšķiras atkarībā no koksnes sugas (skat. 3.3. att.). Bērza finieru izturība pret brūnās trupes sēni *Coniophora puteana* termiskās apstrādes rezultātā pieaug nedaudz no 30% masas zudumiem nemodificētam bērzam līdz 25% VT bērzam, izņemot apstrādes režīmus 214/120/VT un 217/180/VT. Tomēr pat labākais rezultāts nesasniedz standartā noteikto 3% robežu. Savukārt uz apses finieriem termiskās apstrādes ietekme ir nozīmīga un 217/180/VT režīmā apse sasniedz standartā EN 12038:2002 noteikto biorezistences robežvērtību. Uz papeli šī ietekme ir vēl būtiskāka nekā apsei un 214/120/VT un 217/180/VT režīmos netika novēroti masas zudumi bazīdijsēnes *Coniophora puteana* ietekmē.

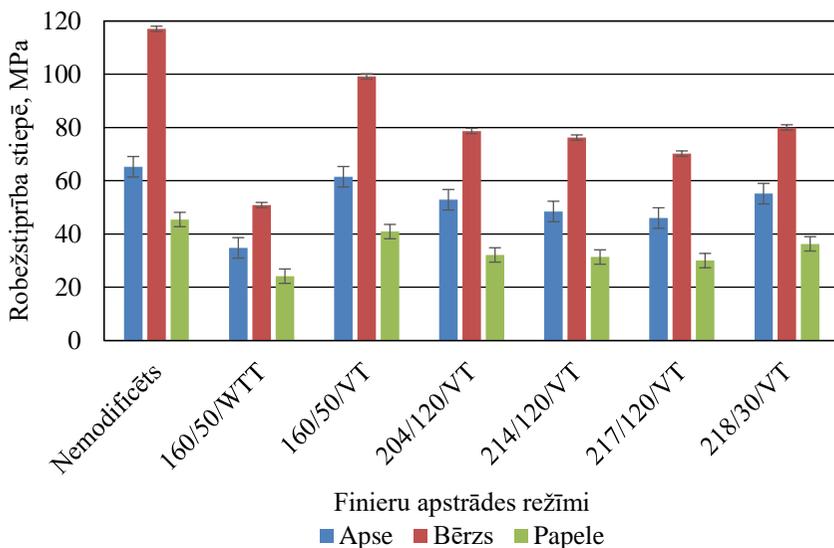


3.3.att. Masas zudumi bazīdijsēnes *Coniophora puteana* ietekmē

### 3.1.7. Finieru robežstiprība stiepē

Finieru robežstiprība ir viens no būtiskākajiem rādītājiem, kas ietekmē saplākšņu stiprību (skat. 3.4. att.). Kā redzams, bērza finieru robežstiprība stiepē

ir būtiski augstāka, nekā apses un papeles finieriem gan nemodificētam materiālam, gan pēc visiem termiskās apstrādes režīmiem, kas padara tos piemērotākus saplākšņu ražošanai.



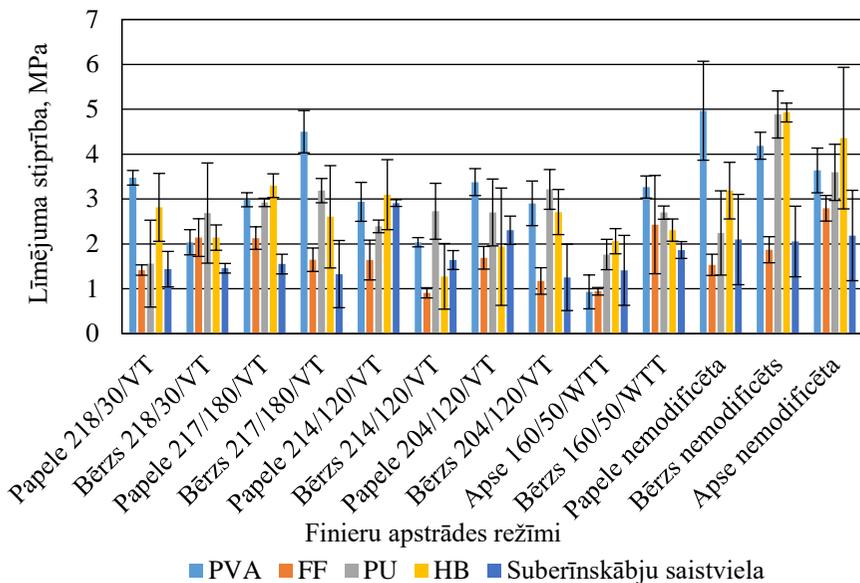
3.4. att. Finieru robežstiprība stiepē

### 3.2. Saplākšņu līmēšana

Lai noskaidrotu iespējas termiski modificētos finierus izmantot saplākšņu ražošanai, vispirms veikts indikatīvais tests par dažādu komerciālo un inovatīvās suberīnskābju saistvielas pielietojšanas iespējām. Pēc tam veikti pilnie testi saskaņā ar standartu EN 314-1 un EN 314-2 prasībām.

#### 3.2.1. Līmes adhēzijas izturība perpendikulāri šķiedrai (atraušanas tests)

Vājākā līmējuma stiprība ir finieru un fenola - formaldehīda (FF) sveķu savstarpējai adhēzijai, kas sakrīt ar Grīniņa iegūtajiem rezultātiem 160/50/WTT režīma bērza finieru līmēšanā, kur apstrādēm pie 160 °C līmējuma kvalitāte ar FF sveķiem samazinājās par 70%. Samērā vājus rezultātus uzrāda arī adhēzija starp termiski modificētiem finieriem un suberīnu. Labāku līmējuma stiprību uzrāda polivinilacetāta līme (PVA), poliuretāna līme (PU) un *HB Construct* līme (HB). Rezultāti redzami 3.5. attēlā.



3.5. att. Līmējuma stiprība

### 3.2.2. Saplākšņu līmēšana ar komerciālajām līmēm un suberīnskābju saistvielu

Termiskās modificēšanas metode TERMOVUOTO® izrādījās piemērotāka saplākšņu līmēšanai, salīdzinot ar WTT, jo tā ir saudzīgāka un labāk saglabā koksnes strukturālo integritāti. Tas atbilst iepriekšējiem pētījumiem, kuros secināts, ka TERMOVUOTO® rada mazāku masas zudumu un saglabā augstākas materiāla mehāniskās īpašības nekā WTT. Turklāt poliuretāna un fenola - formaldehīda līmju savietojamība ar termiski modificētiem finieriem ir piemērotāka izmantošanai rūpnieciskajā ražošanā. Pastāv arī videi draudzīgākas alternatīvas komerciāli pieejamajām līmēm, piemēram, suberīnskābju līme (SA).

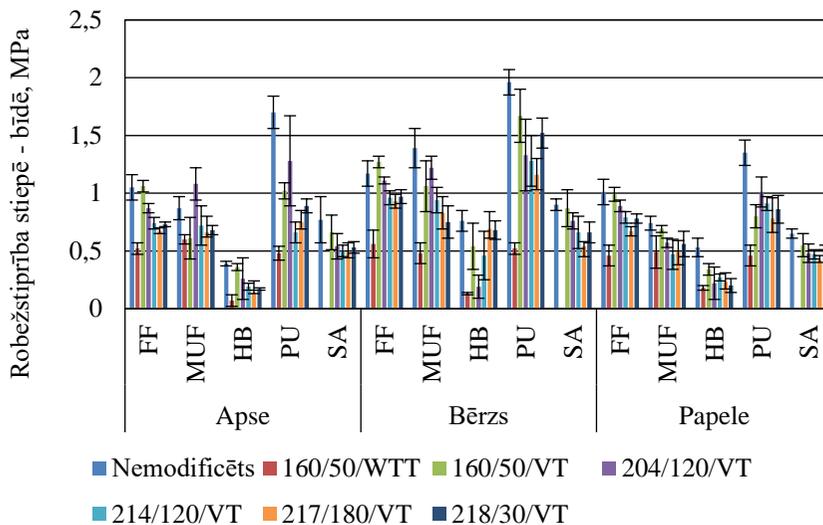
Darbā secināts, ka, izmantojot WTT modificēšanas metodi, modificētie finieri pēc salīmēšanas delaminējas un nav piemēroti saplākšņu ražošanai. Salīdzinot SA līmes veiktspēju ar komerciāli pieejamo līmju rezultātiem, redzams, ka SA stiepes – bīdes tests uzrāda rezultātus, kas ir salīdzināmi ar MUF līmes rezultātiem papelei ( $0.74 \pm 0.06$  un  $0.65 \pm 0.04$  MPa nemodificētiem paraugiem;  $0.69 \pm 0.03$  un  $0.55 \pm 0.10$  MPa 160/50/VT;  $0.57 \pm 0.04$  un  $0.48 \pm 0.08$  MPa 204/120/VT;  $0.47 \pm 0.13$  un  $0.47 \pm 0.04$  MPa 214/120/VT;  $0.49 \pm 0.10$  un  $0.42 \pm 0.04$  MPa 217/180/VT;  $0.56 \pm 0.11$  un  $0.53 \pm 0.02$  MPa 218/30/VT). Līdzīga tendence vērojama arī apses gadījumā ( $0.87 \pm 0.10$  un  $0.77 \pm 0.20$  MPa nemodificētiem

paraugiem;  $0.61 \pm 0.18$  un  $0.66 \pm 0.15$  MPa 160/50/VT;  $1.08 \pm 0.14$  un  $0.54 \pm 0.11$  MPa 204/120/VT;  $0.72 \pm 0.17$  un  $0.66 \pm 0.09$  MPa 214/120/VT;  $0.66 \pm 0.14$  un  $0.49 \pm 0.08$  MPa 217/180/VT;  $0.68 \pm 0.14$  un  $0.53 \pm 0.05$  MPa 218/30/VT).

Tomēr bērza koksnes līmēšanas kvalitāte ar MUF ir labāka nekā ar SA ( $1.39 \pm 0.17$  un  $0.90 \pm 0.05$  MPa nemodificētiem paraugiem;  $1.06 \pm 0.22$  un  $0.87 \pm 0.16$  MPa 160/50/VT;  $1.22 \pm 0.10$  un  $0.76 \pm 0.07$  MPa 204/120/VT;  $0.94 \pm 0.11$  un  $0.66 \pm 0.14$  MPa 214/120/VT;  $0.83 \pm 0.14$  un  $0.54 \pm 0.04$  MPa 217/180/VT;  $0.75 \pm 0.14$  un  $0.66 \pm 0.09$  MPa 218/30/VT).

Visām pētītajām koksnes sugām FF un PU līmju veiktspēja ir labāka nekā MUF un SA, savukārt HB ir vissliktākā (skat. 3.6. attēlu).

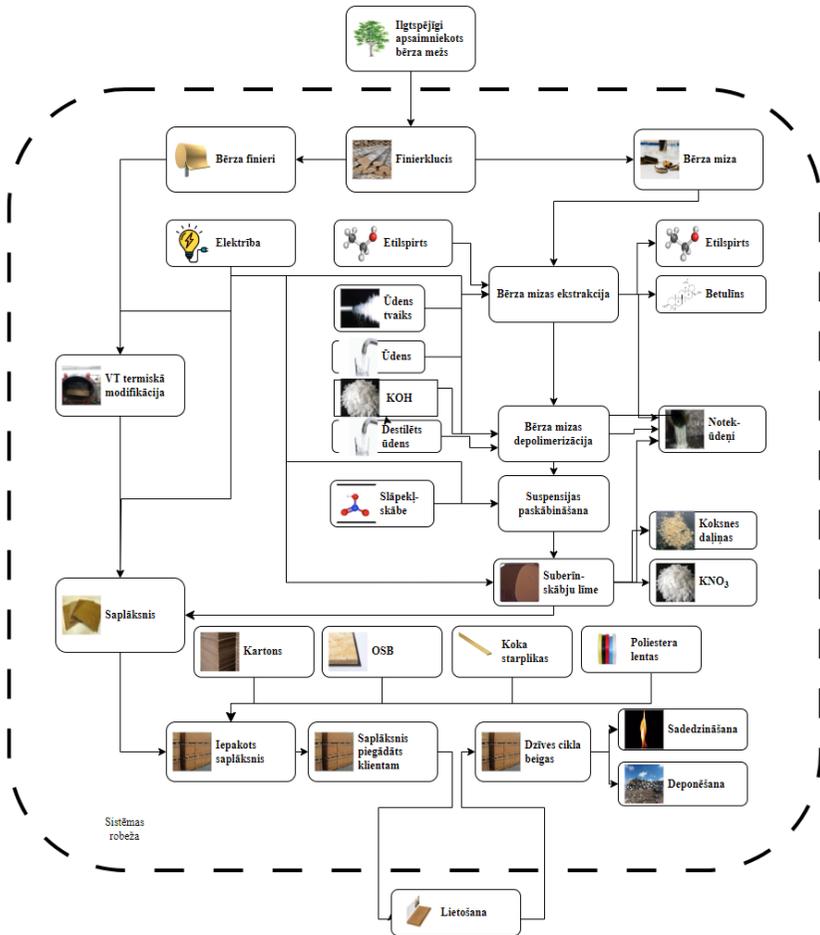
Tomēr joprojām izaicinājums ir termiski modificētas koksnes mehānisko īpašību samazināšanās, īpaši WTT gadījumā. Nepieciešami turpmāki pētījumi, lai pilnveidotu EN 314 metodiku plīsuma pa koksni rakstura noteikšanai, tostarp izstrādājot soļus koksnes lūzuma precīzai noteikšanai tieši termiski modificētiem finieriem, kas ir trauslāki.



3.6. att. **Saplākšņu robežstiprība stiepē - bīdē pēc 72h + 1h priekšapstrādes**

### 3.3. Dzīves cikla novērtējums

Dzīves cikla novērtējums veikts jaunajam nišas produktam – splākšnim, kas presēts no 217/180/VT režīmā modificētiem finieriem un līmēts ar suberīnskābju saistvielu. Dzīves cikla novērtējumā ietvertā sistēmas robeža ir attēlota 3.7. attēlā. Dzīves cikla novērtējuma rezultāti, kas izmantoti vides izmaksu aprēķinam, ir atspoguļoti 3.2. tabulā.



3.7. att. Dzīves cikla novērtējuma sistēmas robeža

**Ietekmes uz vidi novērtējums pēc ReCiPe 2016 (H) midpoint metodes**

<b>Ietekmes uz vidi kategorija</b>	<b>Mērvienība</b>	<b>Rezultāts</b>
Sauszemes paskābināšanās	kg SO <sub>2</sub> -ekviv.	44.51
Klimata pārmaiņas	kg CO <sub>2</sub> -ekviv.	5593.76
Saldūdens ekotoksicitāte	kg 1,4-DCB-ekviv.	376.06
Jūras ekotoksicitāte	kg 1,4-DCB-ekviv.	345.90
Sauszemes ekotoksicitāte	kg 1,4-DCB-ekviv.	26003.26
Energoresursi: neatjaunojamie, fosilie	kg naftas-ekviv.	1363.96
Saldūdens eitrofikācija	kg P-ekviv.	2.63
Jūras eitrofikācija	kg N-ekviv.	8.87
Cilvēku toksicitāte: kancerogēna	kg 1,4-DCB-ekviv.	852.79
Cilvēku toksicitāte: nekancerogēna	kg 1,4-DCB-ekviv.	11216.54
Jonizējošais starojums	kBq Co-60-ekviv.	250.28
Zemes izmantošana	m <sup>2</sup> *graudu-ekviv.	4434.81
Materiālie resursi: metāli/minerāli	kg Cu-ekviv.	125.14
Ozona slāņa noārdīšanās	kg CFC-11-ekviv.	0.03
Cieto daļiņu veidošanās	kg PM2.5-ekviv.	9.89
Fotoķīmisko oksidantu veidošanās: ietekme uz cilvēku veselību	kg NO <sub>x</sub> -ekviv.	17.71
Fotoķīmisko oksidantu veidošanās: ietekme uz sauszemes ekosistēmām	kg NO <sub>x</sub> -ekviv.	18.31
Ūdens izmantošana	m <sup>3</sup>	722.54

Galvenais ietekmes uz vidi veidojošais faktors eksperimentālajam saplāksnim, kas līmēts ar suberīnskābju saistvielu un veidots no 217/180/VT režīmā modificētiem bērza finieriem, ir kartupeļu audzēšana, pielietojot tradicionālās lauksaimniecības metodes, lai no kartupeļiem fermentācijas procesā iegūtu etilspirtu, kas nepieciešams bērza tāss ekstrakcijai suberīnskābes saistvielas iegūšanas procesā.

### 3.4. Izmaksu aprēķins

Aprēķinātā tirgus cena eksperimentālajam saplāksnim ir 2176.85 EUR par 1 m<sup>3</sup>. Izmaksu sadalījums tabulā 3.3. Viegļākai uztveramībai, veikts arī pārrēķins uz 9 mm biezu saplākšņu 1 m<sup>2</sup>.

3.3. tabula

#### Ekspiermentālo saplākšņu cena

Pozīcija	Izmaksas, EUR·m <sup>-3</sup>	Izmaksas, EUR·m <sup>-2</sup> (9 mm)
<b>Ražošanas izmaksas</b>	<b>1799.05</b>	<b>16.19</b>
Materiālu izmaksas	641.96	5.78
Darba spēka izmaksas	1004.20	9.04
Fiksētās izmaksas	131.67	1.19
Netiešās izmaksas	21.22	0.19
Administratīvās izmaksas	179.90	1.62
<b>Kopējās izmaksas</b>	<b>1978.95</b>	<b>17.81</b>
Peļņa	197.90	1.78
Iekārtu iegāde	125 289.00	125 289.00
<b>Cena</b>	<b>2176.85</b>	<b>19.59</b>

Rēķinot saplākšni ar dzīves ciklu - 30 gadi, kura laikā bērza saplākšnis būs jānomaina pēc 25 gadiem, bet jākrāso reizi 3 gados, kamēr eksperimentālo saplākšņu dzīves laiks būs 30 gadi un tas būs jākrāso reizi 4 gados. Neto pašreizējās vērtības (NPV) aprēķini rāda, ka eksperimentālo saplākšņu kopējās izmaksas 30 gadu periodā, ņemot vērā diskonta likmi 4% būs 4803.40 EUR, kamēr nemodificēta bērza saplākšnim tās būs 5636.49 EUR. Ņemot vērā naudas plūsmu, aprēķinātā iekšējā peļņas norma (IRR) ir 12%, kas ir lielāks par diskonta likmi 4%. Pārdodot 35 m<sup>3</sup> eksperimentālo saplākšņu gadā, kapitālieguldījumi atmaksāsies astoņos gados. Tabulā 3.4. var redzēt vides izmaksu aprēķinu, kāds būtu jāiegulda katrā no vides kategorijām, to radītās ietekmes dzēšanai.

3.4. tabula

#### Ietekmes uz vidi izmaksas

Nr.p.k.	Ietekmes uz vidi kategorija	Summa, EUR
1	Sauszemes paskābināšanās	234.99
2	Klimata pārmaiņas	727.19
3	Saldūdens ekotoksicitāte	7.86

## 3.4. tabulas nobeigums

<b>Nr.p.k.</b>	<b>Ietekmes uz vidi kategorija</b>	<b>Summa, EUR</b>
4	Jūras ekotoksicitāte	1.11
5	Sauszemes ekotoksicitāte	16.64
6	Energoresursi: neatjaunojamie, fosilie	38.19
7	Saldūdens eitrofikācija	9.83
8	Jūras eitrofikācija	126.46
9	Cilvēku toksicitāte: kancerogēna	3402.62
10	Cilvēku toksicitāte: nekancerogēna	796.37
11	Jonizējošais starojums	1.05
12	Zemes izmantojums	439.05
13	Materiāli resursi:metāli/minerāli	1.75
14	Ozona noārdīšanās	0.74
15	Cieto daļiņu veidošanās	837.70
16	Fotoķīmisko oksidantu veidošanās: cilvēku veselība	32.94
17	Fotoķīmisko oksidantu veidošanās: sauszemes ekosistēma	7.62
18	Ūdens lietošana	294.08

Kopā eksperimentālo saplākšņu ietekmes uz vidi dzēšanai būtu jāiegulda 6976.19 EUR (3.4. tabulas rādītāju summa) uz 1 saražoto m<sup>3</sup> saplākšņu jeb 62.79 EUR uz 1 m<sup>2</sup> 9 mm eksperimentālo saplākšņu. Papildus informācija par dzīves cikla novērtējuma un dzīves cikla izmaksu aprēķiniem, kā arī sociālā dzīves cikla novērtējums promocijas darba 1. pielikumā.

## SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

### Secinājumi

1. Termiskā apstrāde pazeminātā spiedienā (VT) ir saudzīgāka nekā apstrāde tvaika vidē (WTT). Vienādos apstrādes režīmos (160/50) WTT režīmā masas zudumi bija divas reizes lielāki nekā VT. Masas zudumi termiskās apstrādes procesā rodas galvenokārt hemiceluložu sadalīšanās dēļ. No sistēmas aizvadot hemiceluložu sadalīšanās produktus, to tālāka noārdīšanās noris lēnāk.
2. Izmantojot suberīnskābju saistvielu saplākšņu līmēšanai, gan nemodificētie, gan visos VT režīmos modificētie finieri (apse, bērzs, papele) atbilst trešajai ekspluatācijas klasei, kas nozīmē, ka saplākšni, kas līmēts ar šo saistvielu, var lietot āra apstākļos.
3. Iegūto eksperimentālo saplākšņu ietekme uz vidi ir mazāka nekā nemodificētiem bērza saplākšņiem visās ietekmes uz vidi kategorijās, taču jāņem vērā darbā apskatītā LCA tvērums.
4. Eksperimentāli iegūtais saplākšnis ir saimnieciski izdevīgs projekts, jo aprēķinātā projekta iekšējā peļņas norma (IRR) ir 12%, kas pārsniedz diskonta likmi 4%.

### Priekšlikumi turpmākiem pētījumiem

1. Darbā neapskatītas ir saplākšņu no termiski modificētas koksnes akustiskās īpašības, tā kā ir publikācijas, kas uzrāda akustisko īpašību uzlabojumu koksnē, arī šis potenciāli varētu būt viens no izveidotā materiāla izmantošanas veidiem, kas ir izpētes vērts.
2. Ar eksperimentāliem datiem būtu jāpamato ar suberīnskābju saistvielu līmēta bērza saplākšņu izmaiņas novēdinot āra apstākļos, lai varētu precīzāk prognozēt tā paredzamo dzīves laiku un nepieciešamā uzturēšanas darbības.
3. Iespējams, ka iemesls, kāpēc ar suberīnskābes saistvielu neizdevās salīmēt WTT finierus, slēpjas līmēšanas procesa tehniskajos parametros, kas šajā darbā nav papildus pētīti.
4. Papildus pētījumi būtu nepieciešami, lai skrupulozi izpētītu jaunā materiāla ietekmi uz vidi tā dzīves cikla laikā. Darbā izmantoti dati no publiski pieejamās datubāzes Ecoinvent 3.11. un to aprobācija, piemērojot termiski modificētai koksnē, taču vēl aizvien trūkst precīzi dati par ar suberīnskābi salīmēto saplākšņu emisijām gaisā, ūdenī un augsnē un ar tiem saistītajiem vides riskiem, kā arī iekārtu ražošana netika iekļauta darbā apskatītā LCA tvērumā, kas ir tālākas izpētes vērts jautājums.

## PATEICĪBAS

Mans ceļš pretī *Ph.D.* grādam ir bijis ilgs, un tāpēc arī garš ir to cilvēku saraksts, kas mani šajā ceļā (vai kādā no tā posmiem) ir pavadījuši. Vispirms vēlos teikt paldies *Dr.chem.* Jurim Zoldneram, kura vadībā spēru savus pirmos soļus zinātnes jomā. Paldies kolēģiem no Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūta Koksnes aizsardzības un noārdīšanās laboratorijas *Dr.chem.* Bruno Andersonam, *Dr.sc.ing.* Dacei Cīrulei, *Dr.biol.* Ilzei Irbei, *Ph.D.* Errj Sansonetti un *Dr.sc.ing.* Jurim Grīniņam par iepazīstināšanu ar termiski modificētas koksnes pasauli. Paldies ***Dr.habil.sc.ing.* Hennam Tuhermam** un *Dr.chem.* Andrim Morozovam par izpratnes veidošanu, ko nozīmē zinātne Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē. Paldies *Ph.D.* Ottaviano Allegretti un *Ph.D.* Ignaziai Cuccui no Itālijas Bioekonomikas institūta par iepazīstināšanu ar Termovuoto koksnes modificēšanas tehnoloģiju. Paldies *Mg.sc.ing.* Luīzei Ramatai un *Mg.sc.ing.* Haraldam Šilleram par palīdzību saplākšņu līmēšanas praktiskajos darbos. Paldies *Dr.sc.ing.* Jānim Rižikovam un *Dr.sc.ing.* Aigaram Pāžem no Latvijas Valsts Koksnes ķīmijas institūta Biorafinēšanas laboratorijas par iepazīstināšanu ar suberīnskābes saistvielu. Paldies *Dr.phil.* Gunāram Lācim no LBTU par atbalstu virsmas raupjuma noteikšanā. Paldies *Ph.D.* Viktoriai Voronovai un *Ph.D.* studentam Pavlo Lyshtvam no Tallinas Tehniskās universitātes par izglītošanu dzīves cikla novērtējuma jautājumos. Paldies LBTU administratīvā centra kolēģēm *Dr.oec.* Ilzei Stokmanei un *Dr.sc.ing.* Vitai Šteinbergai par priekšzīmi un sapratni. Paldies darba vadītājam Rīgas Tehniskās universitātes docentei *Dr.oec.* Evijai Kopeikai par iepazīstināšanu ar matemātikas pasauli. Paldies maniem vecākiem - Aldim Meijam un Ingai Meijai, manām meitām Norai Feldmanei un Rasai Feldmanei, kā arī draugiem par nerimstošu atbalstu. Un vislielākais paldies promocijas darba vadītājam *Dr.sc.ing.* Uldim Spullem par to, ka viņš ticēja man tajos brīžos, kad es neticēju pati sev.

## 1. GENERAL CHARACTERIZATION OF THE SCIENTIFIC WORK

### **Rationale for the selection and relevance of the *Ph.D* thesis topic**

Wood is a natural material, and its life cycle inherently involves degradation processes facilitated by fungi, bacteria, and insects. The material's ability to resist biological degradation is referred to as biological durability. Tree species such as aspen (*Populus tremula* L.) and birch (*Betula pendula* L.) are classified as biologically non-durable species.

As global demand for wood resources continues to increase, the availability of naturally durable wood species is declining. Consequently, it is essential to identify ways to utilise less biologically durable wood species by enhancing their durability through various methods. Wood modification is a process aimed at improving the physical, mechanical, or aesthetic properties of wood, for example, by mitigating low biological durability, dimensional instability, and sensitivity to moisture content changes. The importance of wood modification is further reinforced by growing environmental awareness and increasingly stringent legal regulations governing the use of wood preservatives.

Thermal modification of wood is a modification method that relies solely on elevated temperature, inducing changes in the chemical composition of wood and in the structure of the wood cell wall. This treatment enhances biological durability, reduces water absorption (hygroscopicity), and improves dimensional stability, thereby making wood suitable for outdoor applications. Vacuum thermal modification (VT), the Termovuoto process, is a patented technology that reduces oxygen concentration and removes volatile organic compounds under vacuum, resulting in lower mass losses and less pronounced degradation of mechanical properties.

Plywood is a versatile material with a wide range of applications. Its properties make it an essential material in construction, load-bearing structures, concrete formwork panels, furniture manufacturing, interior finishing, flooring, transportation, and other industries. In 2024, 2.7 million m<sup>3</sup> of plywood were produced in the European Union, and global demand for plywood products continues to grow. The selection of raw materials, which determines both the cost and the properties of plywood, is therefore of critical importance.

***Ph.D. thesis aim:*** to produce knowledge regarding birch, aspen, and poplar veneers thermally modified using the Termovuoto process and to evaluate their potential applications in plywood production.

***Research hypothesis:*** veneers thermally modified in the Termovuoto process can be used to develop a niche product—plywood suitable for outdoor conditions.

To achieve the thesis aim, the following **research tasks** are set:

- to characterise the veneer modification process and the properties of the obtained material;
- to determine the possibilities for plywood production;
- to evaluate the environmental impact of the new material;
- to select an optimal and economically justified plywood composition.

#### **Research theses:**

- veneers thermally modified using the Termovuoto process are more suitable for plywood production than veneers modified using the WTT process.
- a suberinic acids adhesive derived from birch bark, a by-product of birch plywood production, is suitable for manufacturing plywood in Use Class 3.
- plywood made from veneers thermally modified by the Termovuoto process and bonded with a suberinic acids adhesive has a lower environmental impact than birch plywood bonded with phenol-formaldehyde resin.
- plywood produced from Termovuoto-processed thermally modified veneers and bonded with a suberinic acids adhesive is an economically justified niche product.

#### **Scientific novelty of the thesis:**

- exploration of a new niche product;
- use of an innovative adhesive;
- comparison of thermal modification processes for thin veneers;
- environmental impact assessment of the new product.

**Contribution to industry development:** investigation of a novel niche product, including a comparative analysis of environmental product declarations in relation to conventional birch plywood manufactured from unmodified wood and bonded with phenol–formaldehyde resins.

#### **The thesis is structured into chapters:**

1. literature review;
2. materials and methods;
3. results and evaluation.

The thesis comprises 115 pages, including 66 figures, 44 tables, and 28 equations. The list of references consists of 126 literature sources and 20 standards and normative sources. The literature sources cited in the summary of the *Ph.D* thesis are provided in the *Ph.D* thesis.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Veneer production, selection, and thermal modification

For the experiments, rotary-cut birch (*Betula pendula* Roth) veneers with a thickness of 1.5 mm produced by JSC Latvijas Finieris, aspen (*Populus tremula* L.) veneers with a thickness of 2.5 mm produced by Riga Veneer Ltd., and poplar (*Populus × canadensis* Moench) veneers with a thickness of 1.5 mm produced at the Toro Compensati plant in Italy were used. The raw material employed—veneers—represents material typically available for industrial production and testing. Veneers selected for specimen preparation were free from visible wood defects and manufacturing imperfections.

Two thermal modification methods were employed:

1. **Thermal–vacuum technology TERMOVOUTO (VT)** is classified as an open system under dry modification conditions. Reduced pressure of 25 kPa ensures the removal of both oxygen and wood degradation products generated during the process. Veneer heating is performed by convection via aluminium plates (see Fig. 2.1). The total modification duration ranges from 13 to 24 hours. This thermal modification method was applied to veneers of all three wood species under five modification regimes (see Fig. 2.2). The regimes were selected first to reproduce the optimal WTT regime of 160/50, as well as to replicate the mass loss associated with this regime (214/120), to obtain a 2% higher mass loss (217/180), and a 2% lower mass loss (204/120).



Fig. 2.1. Veneers placed between aluminium plates for modification in the VT process

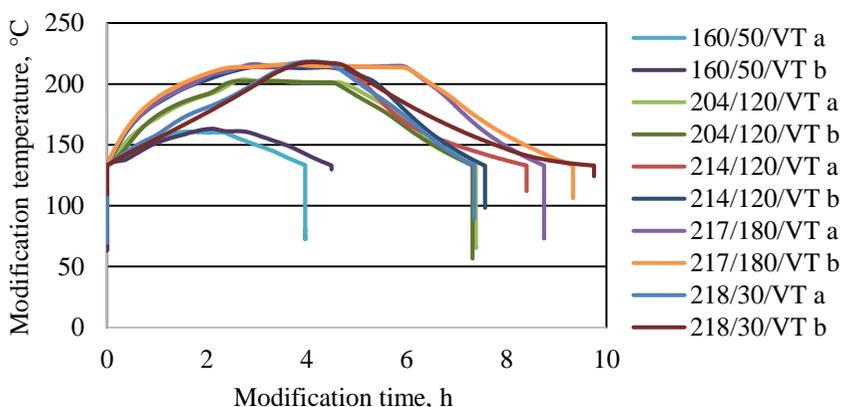


Fig. 2.2. **VT thermal modification graphs:**  
 (a) and (b) parallel modification runs

- WTT technology** – thermal modification of wood under elevated moisture conditions, in a water vapour environment, was carried out using a Wood Thermal Technology (WTT) unit (see Fig. 2.3) under a previously determined optimal regime, ensuring a maximum treatment temperature of 160 °C maintained for 50 minutes. Initially, the wood material is subjected to a vacuum to reduce the oxygen content within the unit; the modification itself proceeds in a water-vapour environment at approximately 0.6 MPa, with 15.6 L of water consumed during the process. The total duration of the thermal modification process is 26 to 27 hours. Up to a temperature of 100 °C, the heating rate ranges from 0.16 to 0.22 °C min<sup>-1</sup>, whereas from 100 °C to the maximum temperature, the heating rate is lower, at 0.12 to 0.16 °C min<sup>-1</sup> (see Fig. 2.4). Veneer packs consisted of 10 sheets, with a total of 60 veneer sheets processed.



Fig. 2.3. **Birch veneers prepared for WTT thermal treatment.**

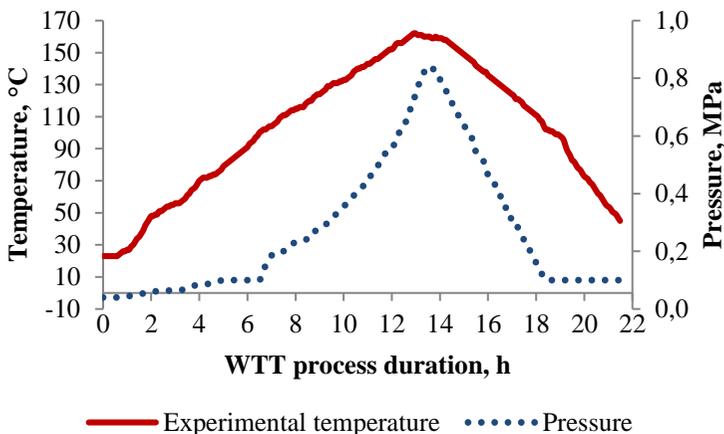


Fig. 2.4. **WTT thermal modification process graph** (Juris Grīniņš, 2016.)

The increase in pressure in the closed process occurs after more than 6 hours, when the water reaches its boiling temperature

## 2.2. Determination of the properties of thermally modified veneers

To analyse the properties of the obtained veneers, mass loss during the thermal modification process and veneer density before and after modification were determined (ISO 13061-2:2014). Changes in veneer colour were evaluated in the CIEL\*a\*b colour system before and after modification and during natural weathering under outdoor conditions (ISO/CIE 11664:2019). In addition, equilibrium moisture content and the moisture adsorption reduction efficiency of the veneers were determined (ISO 13061-1:2014). Optical microscopy images were recorded, the surface contact angle and surface profile of the veneers were measured, and the ten-point mean roughness was calculated.

Fourier-transform infrared (FTIR) spectra were recorded for samples after modification and after natural weathering (EN 927-3:2019). The biological durability of the veneers under laboratory conditions against the brown-rot fungus *Coniophora puteana* (see Fig. 2.5) was determined in accordance with EN 12038:2002. Tensile strength of the veneers was measured (GOST 20800-75:1976), and adhesive bond strength perpendicular to the grain was determined using a pull-off test (ISO 4624:2023).

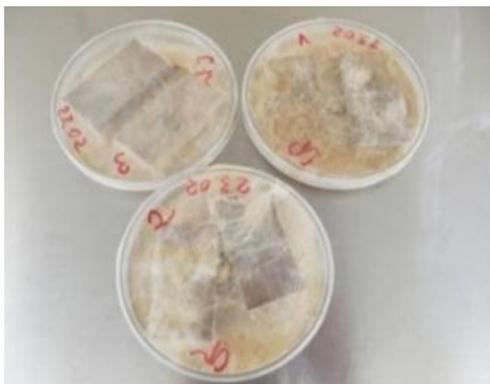


Fig. 2.5. Aspen veneers 214/120/VT after a 6-week biological durability test

### 2.3. Preparation of plywood and determination of its properties

After thermal modification, the veneer sheets were conditioned at a relative humidity of  $65 \pm 5\%$  and a temperature of  $20 \pm 3$  °C. A suberinic acids adhesive was used for bonding. The characteristics of the suberinic acids adhesive were as follows:

- particle size:  $\leq 1$  mm;
- solids content: 20 wt%;
- ash content: 5 wt%;
- pH: 2;
- colour: brown.

The adhesive was developed and patented at the Latvian State Institute of Wood Chemistry. The dimensions of the manufactured plywood panels were  $290 \times 290 \times 4.5$  mm. During the bonding process, the compression ratio of the plywood panels was determined. To compare the performance of the suberinic acids adhesive with commercially used adhesives, plywood panels were also manufactured using market-available adhesives, including phenol–formaldehyde resin (SFŽ-3014), melamine–urea–formaldehyde adhesive (Casco Adhesives MUF system 1257/7557), a hybrid polymer adhesive (Soudal HB Construct), and a one-component polyurethane adhesive (PURBOND HB S159). The plywood bonding parameters are presented in Table 2.1.

The tensile-shear strength of the plywood bond line was determined in accordance with the requirements of EN 314-1:2004 and EN 314-2:1993 for Bonding Class 3 under outdoor conditions.

Specimens for tensile-shear strength testing were prepared from the bonded plywood panels, each measuring 290 × 290 mm. For each plywood type, four panels were manufactured, and 20 specimens were cut from each panel, resulting in a total of 80 specimens per plywood type.

Table 2.1.

**Plywood bonding parameters**

<b>Glue</b>	<b>Temperature, °C</b>	<b>Pressure, MPa</b>	<b>Time, min</b>
phenol–formaldehyde resin ( <b>FF</b> ) (SFŽ-3014)	145	1.8	7
HB Construct glue ( <b>HB</b> ) (Soudal)	20	1.8	20
melamine–urea–formaldehyde adhesive ( <b>MUF</b> ) (CASCO adhesives 1257/7557)	20	1.8	116
one-component polyurethane adhesive ( <b>PU</b> ) (PURBOND HB S159)	20	1.8	90
suberinic acids adhesive ( <b>SA</b> )	215	1.8	5

The specimens were pre-treated in accordance with the requirements of EN 314-1:2004 for the relevant bonding class, which includes several types of pre-treatment:

1. 24 h immersion in water at a temperature of  $(20 \pm 3)$  °C;
2. 6 h boiling in water, followed by cooling in water at  $(20 \pm 3)$  °C for at least 1 hour;

3. 4 h boiling in water, followed by oven drying at  $(60 \pm 3)$  °C for 16 h, then a second 4 h boiling period, and subsequently cooling in water at  $(20 \pm 3)$  °C for 1 hour;
4.  $(72 \pm 1)$  h boiling, followed by cooling in water at  $(20 \pm 3)$  °C for at least 1 hour.

The specific combination of pre-treatment methods was determined in accordance with EN 314-2:1993 (see Table 2.2), whereby for Bonding Class 1, qualitative and quantitative results after 24 h of pre-treatment were considered; for Bonding Class 2, results after 24 h and after 6 h + 1 h pre-treatment were evaluated; and for Bonding Class 3, results after 24 h, 4 h + 16 h + 4 h + 1 h, and 72 h + 1 h pre-treatment were taken into account.

Table 2.2.

### Pre-treatment for the determination of compliance with bonding classes

Bonding class	Pre-treatment in accordance with EN 314-2			
	1.	2.	3.	4.
Class 1 – indoor use	×			
Class 2 – protected outdoor conditions	×	×		
Class 3 – outdoor conditions	×		×	×

Note – “×” pre-treatment must be conducted before the testing

## 2.4. Life cycle assessment

The life cycle assessment was conducted to evaluate the environmental impact of thermally modified birch plywood bonded with a suberinic acids adhesive. The declared unit was defined as 1 m<sup>3</sup> of three-layer plywood.

The system boundaries of the plywood production include the recovery of birch bark as a by-product of debarking, birch bark extraction, depolymerisation of birch bark, acidification and filtration of the suspension to obtain the suberinic acids adhesive, transportation of all raw materials, thermal modification of veneers, and final plywood manufacturing, as well as packaging of the finished product, delivery to the customer, and the end-of-life stage. At the end-of-life stage, it was modelled that 50% of the used plywood is disposed of in a landfill and 50% is incinerated.

Primary data on the production of the suberinic acids adhesive were obtained from laboratory-scale experiments conducted at the Latvian State Institute of Wood Chemistry. Data on the production of thermally modified veneers were obtained from laboratory-scale experiments carried out at the Institute of Bioeconomy of the Italian National Research Council. Data on plywood pressing

were obtained at the Institute of Construction and Wood Processing of the Faculty of Forest and Environmental Sciences, Latvia University of Life Sciences and Technologies. The Ecoinvent 3.11 database was used as a secondary data source. Packaging materials and their quantities were modelled using environmental product declaration data for birch plywood products from JSC Latvijas Finieris. The assumed location of the production facility was Dzērbenes iela 27, Riga.

Calculations were performed using the open-access life cycle assessment software openLCA. The ReCiPe 2016 (H) midpoint method was selected for environmental impact assessment to subsequently calculate environmental costs using data from the European Union environmental prices handbook.

## **2.5. Approximate economic calculations for laboratory-manufactured plywood**

The plywood price calculation was based on fundamental financial management principles, with pricing determined by considering material costs, labour costs including taxes and a risk premium, fixed costs such as equipment depreciation, production facility rent and utilities, as well as indirect costs, including waste management. Administrative costs were calculated as 10% of the production costs. The included profit margin was 10% of the total costs.

Eco-costs are an LCA-based indicator that converts environmental impacts into monetary terms using a simple formula in which the environmental impact indicator is multiplied by the environmental price for the respective impact category. In addition, the net present value (NPV) was calculated using a 4% discount rate, along with the project's internal rate of return (IRR) and equivalent annual costs.

## **2.6. Mathematical processing of the obtained data**

Arithmetic means and standard deviations were calculated for the datasets, and for some parameters, the coefficient of variation was also determined.

A mathematical analysis of the veneer tensile strength was performed, including testing the data for normality using the Shapiro–Wilk test and comparing variances using Levene's test.

Depending on the evaluation results, further data analysis was conducted using the Kolmogorov–Smirnov test (for data that did not follow a normal distribution). The Bonferroni test was used to compare strength results across pairs of thermal treatment regimes to determine the most suitable one (provided the data conform to a normal distribution and the datasets being compared have statistically equal variances). All tests were conducted with a 95% confidence level. The correlation between mass loss and changes in plywood tensile–shear strength was determined.

### 3. RESULTS AND EVALUATION

#### 3.1. Characterisation of thermally modified veneers

To assess the suitability of the experimentally obtained veneers for plywood production, it is necessary to characterise a range of relevant parameters.

##### 3.1.1. Veneer mass loss

Mass loss is the primary parameter characterising the intensity of the thermal modification process. The degradation of hemicelluloses mainly causes mass loss, as they are the wood-forming polymers with the lowest degree of polymerisation and the highest reactivity due to their amorphous structure. Previous studies have shown that mass loss occurs predominantly through the deacetylation of acetylated glucuronoxytan, leading to the formation of acetic acid, which, in turn, catalyses the depolymerisation of less-ordered carbohydrates. The dependence of mass loss during the thermal modification of wood on wood species, process environment, temperature, and treatment duration has been extensively investigated.

Mass loss is the primary parameter characterising the intensity of the thermal treatment and enables direct comparison of different processes employing different treatment temperatures and durations.

Mass losses observed in the various thermal modification processes are presented in Table 3.1, where WTT denotes the steam-based process, and VT denotes the dry process. The thermal modification regimes were selected so that the 214/120 VT regime would reproduce the mass loss observed under the 160/50 WTT regime, which was achieved within experimental error. The mass loss of the 217/180 regime was approximately 2% higher than that of 214/120, whereas the mass loss of the 204/120 regime was approximately 2% lower than that of 214/120. The VT and WTT modification methods differ substantially, as evidenced by the markedly different results obtained at identical treatment temperature and duration (160/50). Mass losses of 5.2% to 6.7% were observed in the 160/50/WTT process, whereas in the 160/50/VT process, mass losses were minimal, ranging from 0.1% to 1.2%.

Table 3.1.

**Mass loss during the thermal modification process**

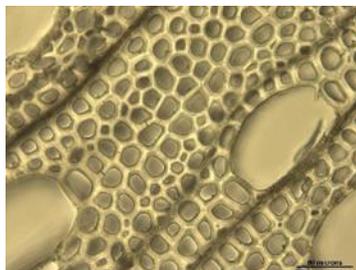
<b>Regime</b>	<b>Mean mass loss, %</b>	<b>Standard deviation, %</b>	<b>Coefficient of variation, %</b>
Birch 160/50 WTT	6.66	0.87	13.0

End of Table 3.1

<b>Regime</b>	<b>Mean mass loss, %</b>	<b>Standard deviation, %</b>	<b>Coefficient of variation, %</b>
Aspen 160/50 WTT	5.28	1.15	21.7
Poplar 160/50 WTT	5.58	0.74	13.3
Birch160/50 VT	1.08	0.24	22.1
Aspen160/50 VT	1.24	1.89	153
Poplar 160/50 VT	0.10	0.69	530
Birch 204/120 VT a	2.77	0.46	16.7
Aspen 204/120 VT b	2.29	0.99	43.2
Poplar 204/120 VT a	2.88	0.81	28.1
Poplar 204/120 VT b	2.99	0.42	14.0
Birch 214/120 VT a	5.70	0.51	9.04
Aspen 214/120 VT b	4.77	1.28	26.7
Poplar 214/120 VT a	6.17	0.85	13.9
Poplar 214/120 VT b	6.71	1.70	25.4
Birch 217/180 VT a	7.77	1.13	14.6
Aspen217/180 VT b	6.61	0.97	14.6
Poplar 217/180 VT a	8.67	0.54	6.25
Poplar 217/180 VT b	8.54	0.83	9.74
Birch 218/30 VT a	4.72	0.57	12.2
Aspen 218/30 VT b	4.24	0.90	21.2
Poplar 218/30 VT a	4.60	0.39	8.54
Poplar 218/30 VT b	6.17	0.57	9.19

### 3.1.2. Optical microscopy of veneers

Birch belongs to the diffuse-porous wood group, as shown in cross-sectional view. After thermal modification, cell wall thickness decreases as thermal modification intensity increases. Thermally modified wood samples are more brittle than unmodified ones, as also reported by Ahmed et al. During thermal modification, the pores are the least affected structural elements, whereas the cellulose fibres exhibit the most significant shrinkage, resulting in an oval-shaped cell morphology. Optical microscopy images of unmodified birch and birch modified under the 218/30/VT regime are presented in Fig. 3.1.



Unmodified birch



218/30/ VT birch

**Fig. 3.1. Optical microscopy images of birch specimens**

### **3.1.3. Veneer surface contact angle**

Contact angle measurements of unmodified veneers and veneers modified using the VT and WTT processes enable assessment of the effect of thermal modification on surface hydrophobicity. In plywood production, good adhesion is achieved through molecular-level interactions between the wood surface and the adhesive, which are influenced by the adhesive's ability to spread over the surface. A contact angle exceeding  $90^\circ$  indicates surface hydrophobicity and low wettability. Only unmodified aspen veneers, unmodified poplar veneers, and aspen veneers treated under the 160/50/VT regime can be considered hydrophilic. An advantage of increased hydrophobicity is that such wood absorbs less rainwater when used under outdoor conditions; however, thermally modified timber also dries more slowly.

### **3.1.4. Veneer surface roughness**

The ten-point mean roughness ( $R_{zjis}$ ) was selected to characterise the surface profile. Surface roughness directly affects the bondability of veneer surfaces, a critical factor in plywood production. When comparing wood species, unmodified birch veneers exhibit lower surface roughness than those of aspen and poplar. Thermal modification of birch reduces surface roughness in all regimes except 160/50/VT, although a relatively wide scatter of roughness values was observed. Thermal modification of aspen decreases surface roughness across all regimes, with the smoothest surfaces obtained under the most severe regimes, namely 160/50/WTT and 218/30/VT. Under the 217/180/VT regime, surface roughness is more pronounced, indicating that treatment temperature has a greater influence on this parameter than duration

In the case of poplar, all treatment regimes also resulted in reduced surface roughness. Increased surface roughness reduces the contact angle on hydrophilic surfaces, thereby improving water absorption capacity.

### 3.1.5. Fourier-transform infrared spectroscopy

The most significant changes in the FTIR spectra of birch resulting from thermal modification (see Fig. 3.2) are observed as a reduction in intensity of the absorption band at 1732–1740  $\text{cm}^{-1}$ , which reflects changes in C=O groups associated with carbonyl, uronyl, and acetyl groups in hemicelluloses and xylan. The most pronounced decrease in intensity occurs in the 160/50/WTT regime. Similar trends are observed in another absorption band characteristic of hemicelluloses, at 1231–1235  $\text{cm}^{-1}$ , indicating hemicelluloses degradation during thermal treatment. Moreover, the WTT process induces greater degradation of hemicelluloses than the VT process. In contrast, an increase in intensity is observed in the absorption band at 1108–1051  $\text{cm}^{-1}$ , which is associated with C–O bonds in secondary alcohols of cellulose and indicates an increase in the relative cellulose content.

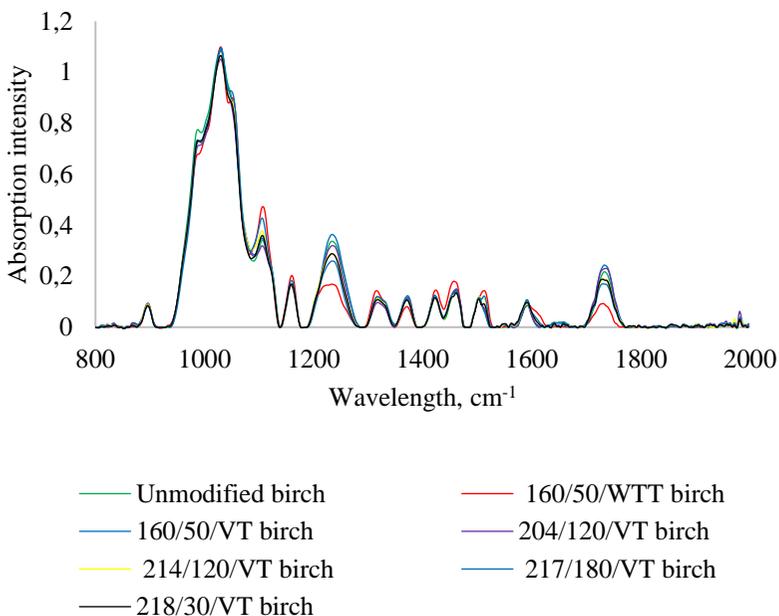


Fig. 3.2. Characteristic region of birch FTIR spectra

Examination of the changes in the FTIR spectra of aspen reveals the same trends as observed for birch FTIR spectra. The most pronounced decrease in absorption intensity occurs in the bands at 1732–1740  $\text{cm}^{-1}$  and 1231–1235  $\text{cm}^{-1}$ , most notably for the 160/50/WTT regime. This indicates that the changes in the chemical composition of veneers occurring during thermal modification are similar across hardwood species. For aspen veneers treated under the 160/50/WTT regime, an increase in intensity is also observed in the absorption band at 1159–1166  $\text{cm}^{-1}$ , indicating an increase in lignin content, as this band is associated with conjugated C=O ester groups in lignin.

In the FTIR spectra of poplar, the most pronounced decrease in absorption intensity of the band at 1231–1235  $\text{cm}^{-1}$  is observed for the 217/180/VT regime, followed by 160/50/WTT, 218/30/VT, 214/120/VT, 204/120/VT, and 160/50/VT. This absorption band is associated with hemicellulose degradation, and the results are consistent with the mass-loss data, indicating that the mass loss during thermal modification is primarily attributable to this degradation.

### 3.1.6. Biological durability of veneers

The results of the indicative biological durability test of veneers differ substantially depending on the wood species (see Fig. 3.3). The resistance of birch veneers to the brown-rot fungus *Coniophora puteana* increases only marginally as a result of thermal modification, except for the 214/120/VT and 217/180/VT modification regimes. However, even the best result does not reach the 3% threshold specified in the standard. In contrast, the effect of thermal modification on aspen veneers is significant, and aspen treated under the 217/180/VT regime reaches the bioresistance limit defined in EN 12038:2002. The effect is even more pronounced for poplar, as no mass loss due to the activity of the basidiomycete *Coniophora puteana* was observed for veneers treated under the 214/120/VT and 217/180/VT regimes.

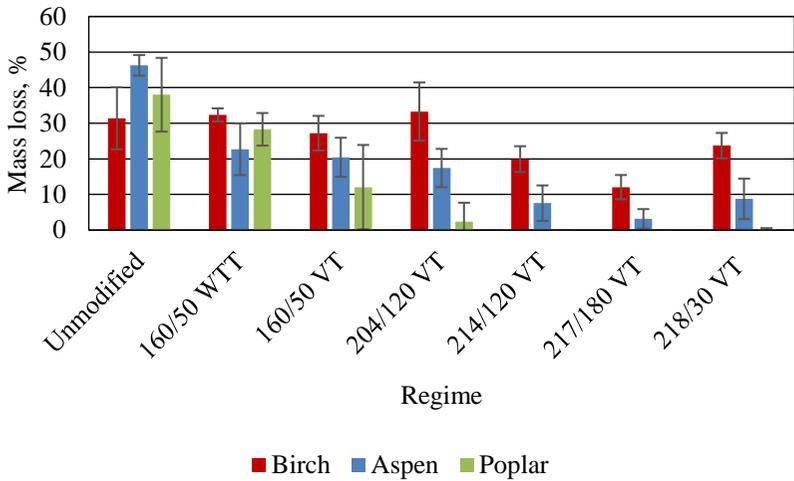


Fig. 3.3. Mass loss due to the activity of the basidiomycete *Coniophora puteana*

### 3.1.7. Veneer tensile strength

Veneer tensile strength is one of the most important parameters influencing plywood strength (see Fig. 3.4). As shown, the tensile strength of birch veneers is significantly higher than that of aspen and poplar veneers, both for unmodified material and after all thermal modification regimes, making birch veneers more suitable for plywood production.

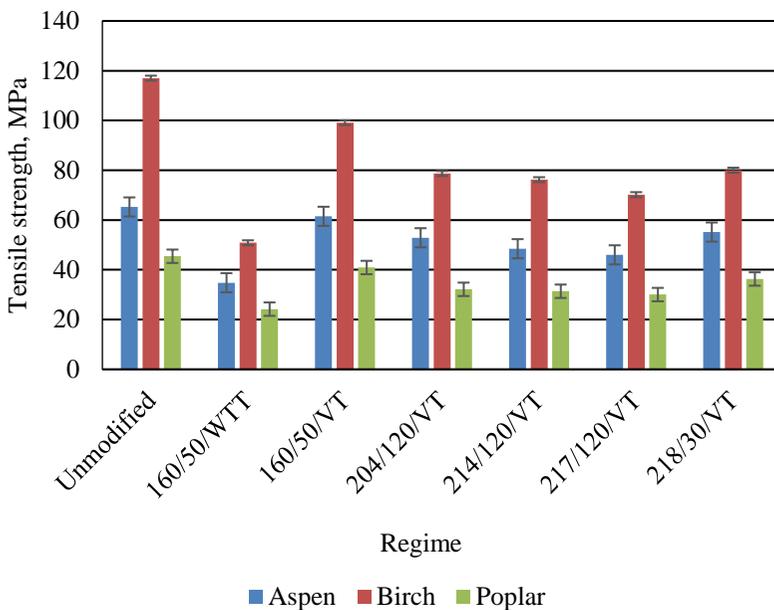


Fig. 3.4. Veneer tensile strength

### 3.2. Plywood bonding

To determine the feasibility of using thermally modified veneers in plywood production, an indicative test was first carried out to assess the applicability of various commercial adhesives and the innovative suberinic acids adhesive. Subsequently, full-scale tests were performed in accordance with EN 314-1 and EN 314-2.

#### 3.2.1. Adhesive bond strength perpendicular to the grain (pull-off test)

The weakest bond strength was observed for the adhesion between veneers and phenol–formaldehyde resins, which is consistent with the results reported by Grīniņš for the bonding of birch veneers modified under the 160/50/WTT regime, where treatment at 160 °C led to a 70% reduction in bond quality with phenol–formaldehyde resins compared to unmodified veneers. Relatively low bond strength values were also observed for adhesion between thermally modified veneers and suberinic acids adhesive. Higher bond strength was achieved with

polyvinyl acetate (PVA), polyurethane (PU), and HB Construct (HB) adhesives. The results are presented in Fig. 3.5.

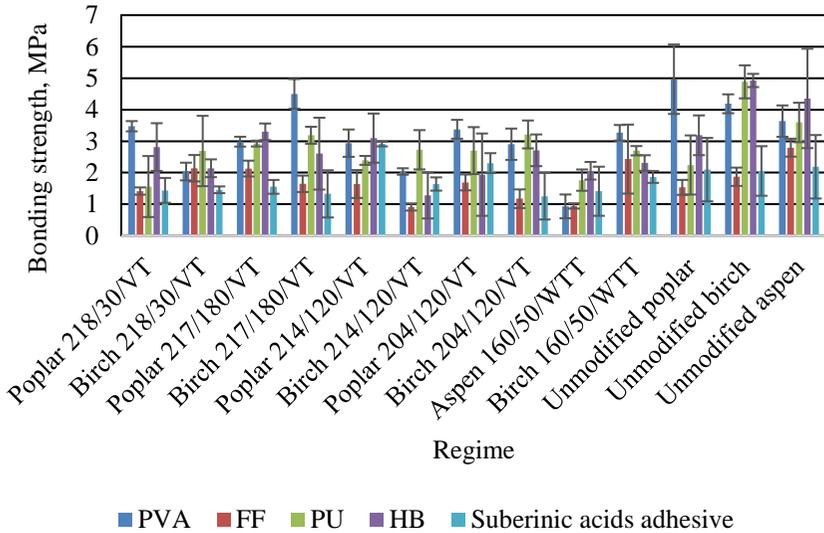


Fig. 3.5. Bonding strength

### 3.2.2. Plywood bonding using commercial adhesives and the suberinic acids adhesive

The TERMOVUOTO thermal modification method proved to be superior to WTT, as it is less aggressive and better preserves the structural integrity of wood. This is consistent with previous studies, which have concluded that TERMOVUOTO results in lower mass loss and higher mechanical properties compared with WTT. Furthermore, the compatibility of polyurethane and phenol–formaldehyde adhesives with thermally modified veneers supports their use in industrial production. At the same time, more environmentally friendly alternatives to commercially available adhesives exist, such as suberinic acids adhesive.

The study concluded that when the WTT modification method is applied, the modified veneers delaminate after bonding and are therefore unsuitable for plywood production. When comparing the performance of the suberinic acids (SA) adhesive with that of commercially available adhesives, the tensile–shear test results obtained with the SA adhesive are comparable to those of the MUF

adhesive for poplar veneers ( $0.74 \pm 0.06$  and  $0.65 \pm 0.04$  MPa for unmodified samples;  $0.69 \pm 0.03$  and  $0.55 \pm 0.10$  MPa for 160/50/VT;  $0.57 \pm 0.04$  and  $0.48 \pm 0.08$  MPa for 204/120/VT;  $0.47 \pm 0.13$  and  $0.47 \pm 0.04$  MPa for 214/120/VT;  $0.49 \pm 0.10$  and  $0.42 \pm 0.04$  MPa for 217/180/VT;  $0.56 \pm 0.11$  and  $0.53 \pm 0.02$  MPa for 218/30/VT). A similar trend was also observed for aspen veneers ( $0.87 \pm 0.10$  and  $0.77 \pm 0.20$  MPa for unmodified samples;  $0.61 \pm 0.18$  and  $0.66 \pm 0.15$  MPa for 160/50/VT;  $1.08 \pm 0.14$  and  $0.54 \pm 0.11$  MPa for 204/120/VT;  $0.72 \pm 0.17$  and  $0.66 \pm 0.09$  MPa for 214/120/VT;  $0.66 \pm 0.14$  and  $0.49 \pm 0.08$  MPa for 217/180/VT;  $0.68 \pm 0.14$  and  $0.53 \pm 0.05$  MPa for 218/30/VT).

However, the bonding quality of birch wood with MUF adhesive is superior to that achieved with the SA adhesive ( $1.39 \pm 0.17$  and  $0.90 \pm 0.05$  MPa for unmodified samples;  $1.06 \pm 0.22$  and  $0.87 \pm 0.16$  MPa for 160/50/VT;  $1.22 \pm 0.10$  and  $0.76 \pm 0.07$  MPa for 204/120/VT;  $0.94 \pm 0.11$  and  $0.66 \pm 0.14$  MPa for 214/120/VT;  $0.83 \pm 0.14$  and  $0.54 \pm 0.04$  MPa for 217/180/VT;  $0.75 \pm 0.14$  and  $0.66 \pm 0.09$  MPa for 218/30/VT).

For all investigated wood species, the performance of phenol–formaldehyde (FF) and polyurethane (PU) adhesives is superior to that of MUF and SA adhesives. In contrast, the hybrid polymer adhesive (HB) exhibits the poorest performance (see Fig. 3.6).

Nevertheless, the reduction in mechanical properties of thermally modified wood remains a challenge, particularly for WTT. Further research is required to refine the EN 314 methodology for determining the mode of wood failure, including developing procedures for accurate identification of wood fracture, particularly in thermally modified veneers, which are more brittle.

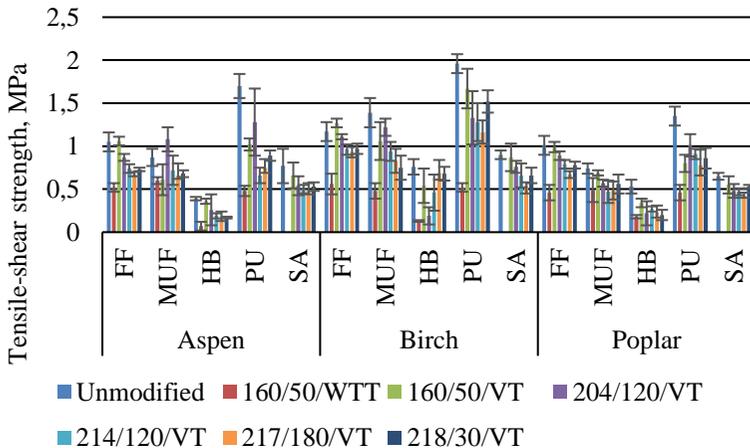


Fig. 3.6. Plywood tensile–shear strength after 72 h + 1 h pre-treatment

### 3.3. Life cycle assessment

The life cycle assessment was carried out for a new niche product—plywood manufactured from veneers modified under the 217/180/VT regime and bonded with a suberinic acids adhesive. The system boundary applied in the life cycle assessment is illustrated in Fig. 3.7. The life cycle assessment results used for the calculation of environmental costs are presented in Table 3.2.

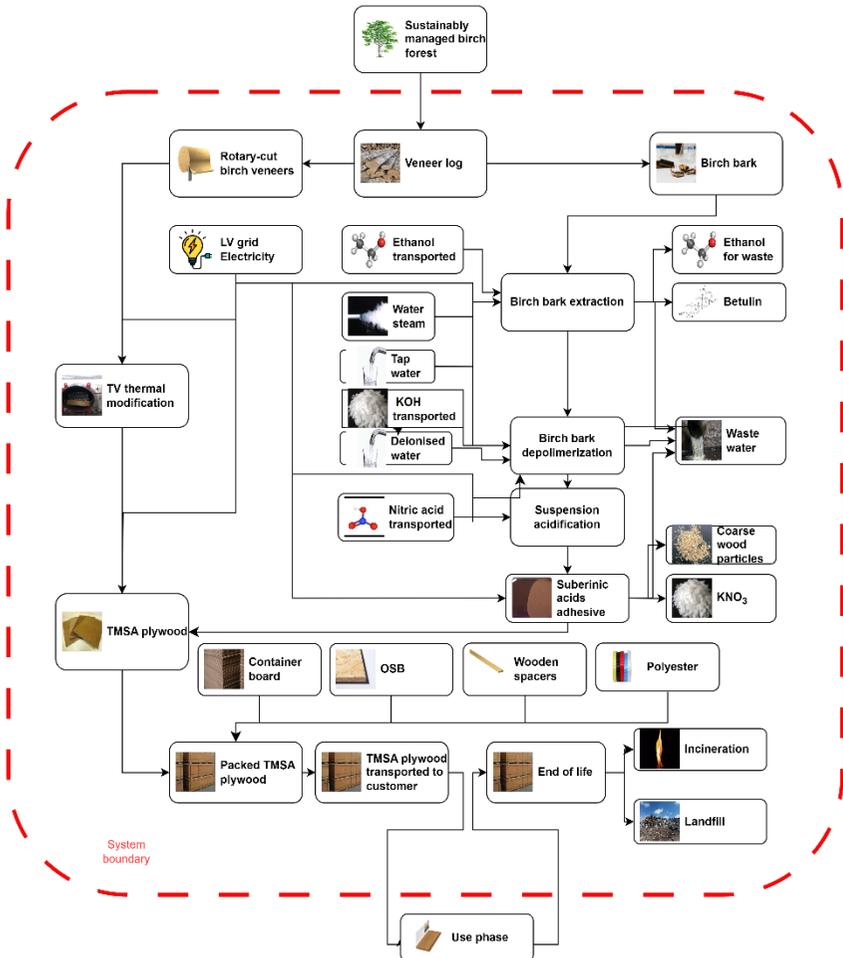


Fig. 3.7. Life cycle assessment system boundary

Table 3.2.

**Environmental impact assessment using the ReCiPe 2016 (H) midpoint method**

<b>Environmental impact category</b>	<b>Unit</b>	<b>Result</b>
Terrestrial acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	44.51
Climate change	kg CO <sub>2</sub> eq	5,593.76
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	376.06
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	345.90
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	26,003.26
Energy resources: non-renewable, fossil	kg oil eq	1,363.96
Freshwater eutrophication	kg P eq	2.63
Marine eutrophication	kg N eq	8.87
Human toxicity: carcinogenic	kg 1,4-DCB eq	852.79
Human toxicity: non-carcinogenic	kg 1,4-DCB eq	11,216.54
Ionising radiation	kBq Co-60 eq	250.28
Land use	m <sup>2</sup> -crop eq	4,434.81
Material resources: metals/minerals	kg Cu eq	125.14
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.03
Particulate matter formation	kg PM2.5 eq	9.89
Photochemical oxidant formation: human health	kg NO <sub>x</sub> eq	17.71
Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems	kg NO <sub>x</sub> eq	18.31
Water use	m <sup>3</sup>	722.54

The primary contributor to environmental impact for the experimental plywood bonded with a suberinic acids adhesive and manufactured from birch veneers modified under the 217/180/VT regime is potato cultivation using conventional agricultural practices. Potatoes are utilised to produce ethanol via a fermentation process, which is required for birch bark extraction in the production of the suberinic acids adhesive. Additional information is provided in Annex 1 of the Ph.D thesis.

### 3.4. Cost calculation

The calculated market price of the experimental plywood is EUR 2176.85 per 1 m<sup>3</sup>. The cost breakdown is presented in Table 3.3. For ease of interpretation, the costs were also recalculated on a per-square-metre basis for 9 mm plywood.

Table 3.3.

#### Price of the experimental plywood

Item	Costs, EUR·m <sup>3</sup>	Costs, EUR·m <sup>2</sup> (9 mm)
<b>Production costs</b>	<b>1799.05</b>	<b>16.19</b>
Material costs	641.96	5.78
Labour costs	1004.20	9.04
Fixed costs	131.67	1.19
Indirect costs	21.22	0.19
Administrative costs	179.90	1.62
<b>Total costs</b>	<b>1978.95</b>	<b>17.81</b>
Profit	197.90	1.78
Equipment acquisition	125 289.00	125 289.00
<b>Price</b>	<b>2176.85</b>	<b>19.59</b>

Assuming a 30-year service life, during which conventional birch plywood would need to be replaced after 25 years and repainted every 3 years, whereas the experimental plywood would have a 30-year service life and require repainting every 4 years, the net present value (NPV) calculations show that the total discounted cost of the experimental plywood over the 30 years, using a discount rate of 4%, would be EUR 4803.40. In comparison, the corresponding price for unmodified birch plywood would be EUR 5636.49.

Based on the cash-flow analysis, the calculated internal rate of return (IRR) is 12%, which exceeds the 4% discount rate. If 35 m<sup>3</sup> of experimental plywood are sold per year, the capital investment would be recovered within eight years. Table 3.4 presents the environmental cost calculation, indicating the monetary investment required in each impact category to offset the associated environmental impacts.

Table 3.4.

#### Environmental costs of impacts

No.	Environmental impact category	Amount, EUR
1	Terrestrial acidification	234.99
2	Climate change	727.19
3	Freshwater ecotoxicity	7.86

End of Table 3.4

<b>No.</b>	<b>Environmental impact category</b>	<b>Amount, EUR</b>
4	Marine ecotoxicity	1.11
5	Sauszemes ekotoksicitāte	16.64
6	Energy resources: non-renewable, fossil	38.19
7	Freshwater eutrophication	9.83
8	Marine eutrophication	126.46
9	Human toxicity: carcinogenic	3402.62
10	Human toxicity: non-carcinogenic	796.37
11	Ionising radiation	1.05
12	Land use	439.05
13	Material resources: metals/minerals	1.75
14	Ozone depletion	0.74
15	Particulate matter formation	837.70
16	Photochemical oxidant formation: human health	32.94
17	Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems	7.62
18	Water use	294.08

In total, EUR 6976.19 would be required to offset the environmental impacts of the experimental plywood (the sum of the values presented in Table 3.4) per 1 m<sup>3</sup> of plywood produced, corresponding to EUR 62.79 per 1 m<sup>2</sup> of 9 mm experimental plywood. Additional information on the life cycle assessment and life cycle costing calculations, as well as the social life cycle assessment, is provided in Annex 1 of the Ph.D thesis.

ChatGPT was used to translate the summary.

## **CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS**

### **Conclusions**

1. Thermal modification under reduced pressure (VT) is less aggressive than treatment in a steam environment (WTT). Under identical treatment regimes (160/50), mass loss in the WTT process was approximately twice that observed in the VT process. Mass loss during thermal modification occurs primarily through hemicellulose degradation. By removing hemicellulose degradation products from the system, their further decomposition proceeds more slowly.
2. When using a suberinic acids adhesive for plywood bonding, both unmodified veneers and veneers modified under all VT regimes (aspen, birch, and poplar) comply with Bonding Class 3, indicating that plywood bonded with this adhesive is suitable for outdoor applications.
3. The environmental impact of the developed experimental plywood is lower than that of unmodified birch plywood across all environmental impact categories; however, the scope of the LCA considered in this study must be taken into account.
4. The experimentally developed plywood represents an economically viable project, as the calculated internal rate of return (IRR) of 12% exceeds the applied discount rate of 4%.

### **Recommendations for further research**

1. The acoustic properties of plywood manufactured from thermally modified wood were not addressed in this study. As existing publications indicate improvements in the acoustic performance of wood following thermal modification, this aspect represents a potential application of the developed material and merits further investigation.
2. Changes in birch plywood bonded with a suberinic acids adhesive during outdoor weathering should be substantiated with experimental data to predict its service life and the required maintenance measures more accurately.
3. It is possible that the inability to bond WTT-modified veneers using the suberinic acids adhesive is related to the technical parameters of the bonding process, which were not investigated in detail in this study.

4. Further research is required to comprehensively assess the environmental impact of the new material throughout its life cycle. This study utilised data from the publicly available Ecoinvent 3.11 database and adapted them for thermally modified wood; however, precise data on air, water, and soil emissions from plywood bonded with suberinic acids adhesive, as well as the associated environmental risks, are still lacking. In addition, equipment manufacturing was not included within the LCA scope considered in this study, representing another vital area for future research

## ACKNOWLEDGEMENTS

My path towards a PhD degree has been long, and consequently so is the list of people who have accompanied me along this journey (or at particular stages of it). First and foremost, I would like to express my gratitude to Dr. chem. Juris Zoldners, under whose supervision I took my first steps in the field of science. I would also like to thank my colleagues from the Laboratory of Wood Degradation and Protection at the Latvian State Institute of Wood Chemistry — *Dr.chem.* Bruno Andersons, *Dr.sc.ing.* Dace Cīrule, *Dr.biol.* Ilze Irbe, *Ph.D.* Errj Sansonetti, and *Dr.sc.ing.* Juris Grīniņš — for introducing me to the world of thermally modified wood. I am grateful to *Dr.habil.sc.ing.* Henn Tuherm and *Dr. chem.* Andris Morozovs for shaping my understanding of what science means at the Latvia University of Life Sciences and Technologies. My sincere thanks go to *Ph.D.* Ottaviano Allegretti and *Ph.D.* Ignazia Cuccui from the Institute of Bioeconomy (Italy) for introducing me to the TERMOVUOTO wood modification technology. I would also like to thank *Mg.sc.ing.* Luīze Ramata and *Mg.sc.ing.* Haralds Šillers for their assistance with the practical aspects of plywood bonding. My thanks extend to *Dr.sc.ing.* Jānis Rīžikovs and *Dr.sc.ing.* Aigars Pāže from the Biorefinery Laboratory of the Latvian State Institute of Wood Chemistry for introducing me to the suberinic acids adhesive. I am grateful to *Dr.phil.* Gunārs Lācis from LBTU for his support in surface roughness measurements. I would also like to thank *Ph.D.* Viktoria Voronova and *Ph.D.* student Pavlo Lyshtva from Tallinn University of Technology for their guidance in life cycle assessment. My sincere appreciation goes to colleagues from the LBTU Administrative Centre, *Dr.oec.* Ilze Stokmane and *Dr.sc.ing.* Vita Šteinberga, for their example and understanding. I would like to thank my supervisor at Riga Technical University, Associate Professor *Dr.oec.* Evija Kopeika, for introducing me to the world of mathematics. Finally, I am deeply grateful to my parents, Aldis Meija and Inga Meija, to my daughters, Nora Feldmane and Rasa Feldmane, and to my friends for their unwavering support. My most excellent thanks go to my *Ph.D.* supervisor, *Dr.sc.ing.* Uldis Spulle, for believing in me at times when I did not believe in myself.