LATVIJAS BIOZINĀTŅU UN TEHNOLOĢIJU UNIVERSITĀTE

Meža un vides zinātņu fakultāte

Būvniecības un kokapstrādes institūts

Mg.sc.ing. **ANETE MEIJA**

promocijas darbs

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

zinātnes doktora grāda

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

iegūšanai

Promocijas darba vadītāji:
LBTU asoc. prof., vad. pētn.
Dr.sc.ing. Uldis SPULLE _____

RTU doc., vad. pētn.
Dr.oec. Evija KOPEIKA _____

Promocijas darba autore _____

Jelgava
2026

ANOTĀCIJA

Meija A. (2026) Termiski modificētu bērza, apses un papeles finieru izpēte videi draudzīgāku saplākšņu ražošanai. Promocijas darbs. Jelgava. 115 lpp.

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.

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

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

Pētnieciskās tēzes:

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.

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, izvirzīti šādi **pētnieciskie uzdevumi:**

- raksturot finieru modificēšanas procesu un iegūtā materiāla īpašības;
- izpētīt saplākšņu iegūšanas iespējas;
- novērtēt jaunā materiāla ietekmi uz vidi;
- izvēlēties optimālu un ekonomiski pamatotu saplākšņu kompozīciju.

Promocijas darba zinātniskā novitāte:

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

Darbs strukturēts nodaļās:

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. Izmantotās literatūras sarakstā ietilpst: 126 literatūras avoti, 20 standarti un normatīvi.

ANNOTATION

Meija A. (2026). Investigation of thermally modified birch, aspen, and poplar veneers for the production of more environmentally friendly plywood. *Ph.D.* Thesis**.** Jelgava. 115 p.

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

***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

Research theses

1. Veneers thermally modified using the Termovuoto process are more suitable for plywood production than veneers modified using the WTT process.
2. A suberinic acids adhesive derived from birch bark, a by-product of birch plywood production, is suitable for manufacturing plywood intended for Use Class 3.
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.
4. Plywood produced from Termovuoto-processed thermally modified veneers and bonded with a suberinic acids adhesive is an economically justified niche product**.**

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

- to characterize 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.

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.

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.

SATURS

DARBA APROBĀCIJA 11
1. LITERATŪRAS APSKATS 17
1.1. Koku sugu bioizturība 17
1.2. Koksnes modifikācija 21
1.3. Koksnes termiskā modifikācija 25
1.4. Koksnes termiskā modifikācija vakuumā 26
1.5. Saplākšņi un saplākšņu materiāli 28
1.6. Saplākšņa ražošanā izmantotās līmes 30
1.7. Produkta dzīves cikls 32
2. MATERIĀLI UN METODES 38
2.1. Finieru izgatavošana, atlase un termiskā modifikācija 38
2.1.1. Termiskā modifikācija Termovouto procesā 38
2.1.2. Termiskā modifikācija WTT procesā 40
2.2. Termiski modificēto finieru īpašību noteikšana 42
2.2.1. Finieru masas zudumi 42
2.2.2. Finieru blīvums 42
2.2.3. Finieru krāsas izmaiņas 42
2.2.4. Finieru līdzsvara mitrums un mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte (MEE) 42
2.2.5. Optiskā mikroskopija 43
2.2.6. Finieru virsmas kontaktleņķis 43
2.2.7. Finieru virsmas profils 43
2.2.8. Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija (FTIR) 45
2.2.9. Finieru līmes adhēzija perpendikulāri šķiedrām 46
2.2.10. Finieru novecināšana āra apstākļos 47
2.2.11. Finieru bioizturība laboratorijas apstākļos 47
2.2.12. Finieru robežstiprība stiepē 48
2.3. Saplākšņu sagatavošana un īpašību noteikšana 48
2.3.1. Saplākšņu līmēšana 48
2.3.2. Saplākšņu stiprība stiepē-bīdē 49
2.4. Dzīves cikla novērtējums 52
2.5. Laboratoriski izveidotā produkta tuvinātie ekonomiskie aprēķini 52
2.6. Iegūto datu matemātiskā apstrāde 53
3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS 57
3.1. Termiski modificētu finieru raksturojums 57

3.1.1. Finieru masas zudumi ... 57
3.1.2. Finieru blīvums ... 58
3.1.3. Finieru krāsas izmaiņas ... 59
3.1.4. Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte ... 61
3.1.5. Finieru optiskā mikroskopija ... 62
3.1.6. Finieru virsmas kontaktleņķis ... 63
3.1.7. Finieru virsmas profili ... 64
3.1.8. Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija (FTIR) ... 65
3.1.9. Finieru novecināšana āra apstākļos ... 67
3.1.10. Finieru bioizturība ... 68
3.1.11. Finieru robežstiprība stiepē ... 70
3.1.12. Finieru raksturošanas apakšnodaļas kopsavilkums ... 74
3.2. Saplākšņa līmēšana ... 75
3.2.1. Līmes adhēzijas izturība perpendikulāri šķiedrai ... 75
3.2.2. Ar fenola – formaldehīda (FF) sveķu līmi līmēti saplākšņi ... 76
3.2.3. Saplākšņi līmēti ar hibrīda polimēra (HB) līmi ... 80
3.2.4. Saplākšņi līmēti ar melamīna-urīnvielas-formaldehīda (MUF) līmi ... 83
3.2.5. Saplākšņi līmēti ar poliuretāna (PU) līmi ... 87
3.2.6. Saplākšņi līmēti ar suberīnskābju (SA) saistvielu ... 90
3.2.7. Saplākšņu līmēšanas apakšnodaļas kopsavilkums ... 96
3.3. Dzīves cikla novērtējums ... 97
3.4. Izmaksu aprēķins ... 102
4. SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI ... 104
PATEICĪBAS ... 106
INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS ... 107
PIELIKUMI ... 116

TABULU, ATTĒLU UN FORMULU SARAKSTS

Tabulas

Tabulas Nr.	Tabulas nosaukums	Lappuse
1.1.	Koku sugu ķīmiskais sastāvs	17
1.2.	Latvijas koku sugu kodolkoksnes bioizturības klases	18
1.3.	Lietojamības un lietojuma klašu salīdzinājums	19
1.4.	Populārākie koksnes aizsardzības līdzekļi	19
1.5.	Saplākšņa ražošanā lietoto līmju salīdzinājums	30
1.6.	Nemodificēta papeles saplākšņa ietekmes uz vidi novērtējums	33
1.7.	Suberīna ražošanas procesa ietekme uz vidi	34
1.8.	Ietekmes uz vidi kategorijas būvizstrādājumiem	34
1.9.	Nemodificēta bērza saplākšņa ietekme uz vidi	35
2.1.	VT modifikācijas režīmi	39
2.2.	Būtiskās absorbcijas joslas termiski modificētu finieru FTIR spektros	46
2.3.	Saplākšņa līmēšanas parametri	49
2.4.	Priekšapstrāde, nosakot atbilstību līmēšanas klasēm	51
2.5.	Saplākšņa atbilstības kritēriji	51
3.1.	Masas zudumi termiskās apstrādes procesā	57
3.2.	Finieru blīvums	58
3.3.	Finieru krāsas izmaiņas pēc termiskās modifikācijas	60
3.4.	Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte	61
3.5.	Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitātes K-S tests	62
3.6.	Finieru virsmas raupjums	64
3.7.	Normalitātes pārbaude bērza finieriem	71
3.8.	Bērza finieru robežstiprības rezultātu dispersiju salīdzinājums	72
3.9.	Bērza finieru robežstiprības datu būtiskums	72
3.10.	Bērza finieru modificēšanas režīmu savstarpēja salīdzināšana pēc robežstiprības	72
3.11.	Ar FF līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	77
3.12.	Ar FF līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	78
3.13.	Ar FF līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	79
3.14.	Ar HB līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	80
3.15.	Ar HB līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	82
3.16.	Ar HB līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	83
3.17.	Ar MUF līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	84
3.18.	Ar MUF līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	85
3.19.	Ar MUF līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	87
3.20.	Ar PU līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	88

Tabulas Nr.	Tabulas nosaukums	Lappuse
3.21.	Ar PU līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	88
3.22.	Ar PU līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	90
3.23.	SA patēriņš un CR vidējās vērtība	91
3.24.	Ar SA līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	92
3.25.	Ar SA līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2	93
3.26.	Dažādu līmju salīdzinājums	96
3.27.	Ietekmes uz vidi novērtējums pēc ReCiPe 2016 (H) midpoint metodes	99
3.28.	Ietekmes uz vidi novērtējums saskaņā ar standartu EN 15804+A2:2020	100
3.29.	Eksperimentālā saplākšņa cena	102
3.30.	Ietekmes uz vidi izmaksas	102

Attēli

Attēla Nr.	Attēla nosaukums	Lappuse
1.1.	Koksnes modifikācijas veidi	22
1.2.	Koksnes modifikāciju iedalījums pēc procesu tipa	23
1.3.	Acetilēšanas reakcijas mehānisms	23
1.4.	Koksnes acetilēšana ar ketēnu	24
1.5.	Koksnes acetilēšana ar diketēnu	24
1.6.	Koksnes acetilēšana ar vinilacetātu	24
1.7.	Koksnes modifikācija ar DMDHEU	24
1.8.	Furfurilēšanas laikā notiekošās reakcijas	25
1.9.	Saplākšņu izmantošanas virzieni 2024. gadā	28
1.10.	Vienkomponenta poliuretāna līmes	31
1.11.	Biolīmju iedalījums	31
1.12.	Karboksilskābju iedalījums	32
2.1.	Vakuuma termiskās modifikācijas iekārtas tehnoloģiskā shēma	38
2.2.	VT termiskās modifikācijas grafiki	40
2.3.	Finieri starp alumīnija plāksnēm modificēšanai VT procesā	40
2.4.	WTT termiskās apstrādes procesa līkne	41
2.5.	WTT termiskajai apstrādei sagatavoti bērza finieri	41
2.6.	Virsmas dziļuma profila noteikšana	44
2.7.	Virsmas dziļuma profili	44
2.8.	Vidējais aritmētiskais virmas raupjums	44
2.9.	Maksimālais raupjums	45
2.10.	10 punktu vidējais raupjums	45
2.11.	Cilindru izvietojums uz modificēta finiera	47
2.12.	Plīsums pa koksni ar atraušanas metodi	47
2.13.	Apses finieri 214/2 VT pēc 6 nedēļu bioizturības testa	48
2.14.	Paraugu izgatavošanas shēma	50
2.15.	Testa parauga shēma, pēc EN 314-1	50
2.16.	Testa paraugu plīsumu pa koksni vērtēšana	51
2.17.	Histogramma masas zudumi papele 160/50/WTT	55

Attēla Nr.	Attēla nosaukums	Lappuse
3.1.	Mikroskopijas attēli	63
3.2.	Finieru virsmas kontaktleņķi	64
3.3.	Bērza FTIR spektru raksturojošais apgabals	66
3.4.	Apses FTIR spektru raksturojošais apgabals	66
3.5.	Papeles FTIR spektru raksturojošais apgabals	67
3.6.	Finieru kopējās krāsas izmaiņas, tos novecinot āra apstākļos	68
3.7.	Bērza finieru bioizturības rezultāti	69
3.8.	Apses finieru bioizturības rezultāti	69
3.9.	Papeles finieru bioizturības rezultāti	70
3.10.	Finieru robežstiprība stiepē	71
3.11.	Līmējuma stiprība	75
3.12.	Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes	76
3.13.	Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes.	77
3.14.	Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes.	78
3.15.	Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes.	79
3.16.	Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes.	80
3.17.	Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes.	81
3.18.	Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes	82
3.19.	Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes	83
3.20.	Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes.	84
3.21.	Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes	85
3.22.	Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes	86
3.23.	Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes	86
3.24.	Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes	87
3.25.	Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes	88
3.26.	Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes	89
3.27.	Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes	90
3.28.	Ar SA līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes	91
3.29.	Ar SA līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes	92
3.30.	Ar SA līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes	93

Attēla Nr.	Attēla nosaukums	Lappuse
3.31.	Bērza saplākšņa robežstiprības zudumu un finieru masas zudumu korelācija	94
3.32.	Apses saplākšņa robežstiprības zudumu un finieru masas zudumu korelācija	95
3.33.	Papeles saplākšņa robežstiprības zudumu un finieru masas zudumu korelācija	95
3.34.	Dzīves cikla novērtējuma sistēmas robeža	98
3.35.	Globālās sasilšanas potenciāls – kopējais; globālās sasilšanas potenciāls – fosilais; globālās sasilšanas potenciāls - biogēniskais un abiotiskās noplicināšanās potenciāls – fosilie resursi ietekmes uz vidi salīdzinājums saplākšņiem	100
3.36.	Fotoķīmiskais ozona rašanās potenciāls; eitrofikācijas potenciāls – sauszeme; eitrofikācijas potenciāls – jūras ūdens; eitrofikācijas potenciāls – saldūdens; paskābināšanās potenciāls; globālās sasilšanas potenciāls – zemes lietojums un zemes lietojuma izmaiņas ietekmes uz vidi salīdzinājums saplākšņiem	101
3.37.	Abiotiskās noplicināšanās potenciāls – metāli un minerāli; stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls ietekmes uz vidi salīdzinājums saplākšņiem	101

Formulas

Formulas Nr.	Formulas nosaukums	Lappuse
2.1.	Termiskās modifikācijas masas zudumu aprēķins atkarībā no termiskās modifikācijas laika un temperatūras	39
2.2.	Termiskās modifikācijas masas zudumu aprēķins pēc termiskās modifikācijas procesa	42
2.3.	Finieru blīvuma aprēķins pēc termiskās modifikācijas	42
2.4.	Kopējās krāsas izmaiņu aprēķins CIEL*a*b* sistēmā	42
2.5.	Finieru līdzsvara mitruma un mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitātes aprēķins	43
2.6.	Kontaktleņķa aprēķins	43
2.7.	Vidējā aritmētiskā virsmas raupjuma aprēķins	44
2.8.	Maksimālā virsmas raupjuma aprēķins	45
2.9.	Desmit punktu vidējā virsmas raupjuma aprēķins	45
2.10.	Saistvielas patēriņa aprēķins	48
2.11.	Sapresēšanās pakāpes aprēķins	49
2.12.	Robežstiprības stiepē-bīdē aprēķins	51
2.13.	Vides izmaksu aprēķins	52
2.14.	Pašreizējās neto vērtības (NPV) aprēķins	53
2.15.	Projekta iekšējās peļņas normas (IRR) aprēķins	53
2.16.	Ekvivalento gada izmaksu (EAC) aprēķins	53
2.17.	Kapitāla atgūšanas koeficienta aprēķins	53
2.18.	Empīriskās sadalījuma funkcijas un teorētiskās sadalījuma funkcijas maksimālās novirzes novērtējums	53
2.19.	λ aprēķins	54
2.20.	p-vērtības aprēķins	54
2.21.	Hipotēze. Dispersiju atšķirības	54

Formulas Nr.	Formulas nosaukums	Lappuse
2.22.	Alternatīvā hipotēze. Dispersiju atšķirības	54
2.23.	Hipotēze. Vidējās vērtības	54
2.24.	Alternatīvā hipotēze. Vidējās vērtības	54
2.25.	Paraugkopu vidējā aritmētiskā aprēķins	55
2.26.	Standartnovirzes aprēķins	55
2.27.	Variācijas koeficienta aprēķins	55
2.28.	Korelācijas koeficienta aprēķins	56

DARBA APROBĀCIJA

Publikācijas par promocijas darba tēmu:

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, 18(67), No 3. 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), pp. 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 vacuum thermal 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

Ar promocijas darba tēmu saistītās publikācijas:

1. Grinins J., Andersons B., Irbe I., Andersone I., **Meija-Feldmane A**., Janberga A., Pavlovics G., Sansonetti E. 2016. Thermo-hydro treated (THT) birch veneers for plywood production with improved properties. Holzforschung, 70 (8), pp. 1-8, https://doi.org/10.1515/hf-2015-0155
2. Grinins J., Irbe I., Andersons B., Andersone I., **Meija-Feldmane A**., Janberga A., Pavlovics G., Sansonetti E. 2016. Thermo-hydro treated (THT) birch plywood with improved service properties. International Wood Products Journal, 7 (4), pp. 181-187, https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1212963
3. Andersons B., Noldt G., Koch G., Andersone I., **Meija-Feldmane A.,** Biziks V., Irbe I., Grinins J. 2016. Scanning UV microspectrophotometry as a tool to study the changes of

lignin in hydrothermally modified wood. Holzforschung, 70 (3), pp. 215 – 221, https://doi.org/10.1515/hf-2015-0027

4. Cirule D., **Meija-Feldmane A**., Kuka E., Andersons B., Kurnosova N., Antons A., Tuherm H. 2016. Spectral sensitivity of thermally modified and unmodified wood. BioResources, 11(1), pp. 324-335, 10.15376/biores.11.1.324-335
5. Andersons B., Andersone I., **Meija-Feldmane A.**, Irbe I., Janberga A., Grinins J. Exterior birch plywood: potentiality of the thermo-hydro treatment. Document IRG/WP 16-40743, 2016, pp. 15.
6. Grinins J., Andersons B., Irbe I., Andersone I., **Meija-Feldmane A**., Janberga A., Pavlovics G., Sansonetti E. Thermo-hydro treated (THT) birch plywood with improved service properties. Proceedings of the International Panel Products Symposium 2015, October 7-9, 2015, Llandudno, Wales, U.K., pp. 153-164.
7. **Meija-Feldmane, A**., Cīrule, D., Kuka, E., Andersons, B. Colour changes of thermally modified hardwood under different conditions. Proceedings of 10th meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE) in Edinburg, Scotland, 13-14 October, 2014, pp. 110-115.
8. Cirule D., Andersons B., Andersone I., **Meija-Feldmane A**., Grinins J. Weathering and protection of thermally modified aspen wood. Proceedings of Int. Conference on Processing Technologies for the Forest and Bio-based Products Indystries (PTF BPI 2014), Kuchl/Salzburg, Austria, September 24-26, 2014, pp. 241-248.
9. Cirule D., Sansonetti E., **Meija-Feldmane A**., Andersone I., Andersons B. Coatings improving resistance of thermally modified wood to discoloration. Book of Abstracts 10th Coatings Science International 2014, COSI2014, 23-27 June 2014, Noordwijk, The Netherlands, pp. 97-100.
10. Cirule D., **Meija-Feldmane A**., Kuka E. Colour stability of thermally modified hardwood. In: Proceedings of 20th Annual International Scientific Conference "Research for Rural Development 2014, 21st-23rd May 2014, Jelgava, Volume 2, pp. 103-108.
11. **Meija-Feldmane, A.** 2016. Leachates of Thermally Modified Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood. Rural Sustainability Research. Rural Sustainability Research, 34(329), pp. 26-31. doi:10.1515/plua-2015-0010
12. **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

Dalība zinātniskajās konferencēs par promocijas darba tēmu:

1. Spulle U., **Meija A**., Kopeika E., Pāže A., Rižikovs J. Videi draudzīgu un bioizturīgu saplākšņu izveide.Valsts pētījumu programmas (VPP) 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
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

Dalība zinātniskajos projektos:

1. Saplāksnis ar uzlabotu izturību pret apkārtējās vides ietekmi (P5). Pētījumu programmas īstenošana Latvijas Lauksaimniecības universitātē, 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, Latvijas Republikas Latvijas Zinātņu Padome, 2024.-2025.

DARBĀ LIETOTIE SIMBOLI UN SAĪSINĀJUMI

ADP -	abiotiskā noplicināšanās
ADPE -	abiotiskās noplicināšanās potenciāls – metāli un minerāli
ADPF -	abiotiskās noplicināšanās potenciāls – fosilie resursi
AP -	paskābināšanās potenciāls
CR -	sapresēšanās pakāpe
CRF -	kapitāla atgūšanas koeficients
EAC -	ekvivalentās gada izmaksas
Ekspluatācijas klase -	salīmējamības klase
EP -	saldūdens eitrofikācija
EPD -	produkta vides deklarācija
EP-freshwater -	eitrofikācijas potenciāls - saldūdens
EP-marine -	eitrofikācijas potenciāls - jūras ūdens
EP-terrestrial -	eitrofikācijas potenciāls – sauszeme
ESS -	aprēķinātā dispersija
FF -	fenola formaldehīda sveķu līme
FPMP -	sīko daļiņu formēšanās potenciāls
FTIR -	Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija
GWP -	globālās sasilšanas potenciāls
GWP-biogenic -	globālās sasilšanas potenciāls - biogēnais
GWP-fossil -	globālās sasilšanas potenciāls - fosilais
GWP-luluc -	globālās sasilšanas potenciāls - zemes lietojums un zemes lietojuma izmaiņas
GWP-total -	globālās sasilšanas potenciāls - kopējais
HB -	hibrīdā polimēra līme
IRP -	jonizējošās radiācijas potenciāls
IRR -	iekšējā peļņas norma
LBTU -	Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte
LCA -	dzīves cikla novērtējums
LCIA -	dzīves cikla ietekmes uz vidi novērtējums
LF -	A/S “Latvijas Finieris”
MC -	relatīvais gaisa mitruma saturs
MEE -	līdzsvara mitrums un mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte
ML -	masas zudumi
MUF -	melamīna-urīnvielas-formaldehīda līme
NPV -	neto pašreizējā vērtība
ODP -	stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls
PED -	pirmējās enerģijas noplicināšanās
POCP -	fotoķīmiskais ozona rašanās potenciāls
PT -	priekšapstrāde
PU -	poliuretāna līme
RI -	daļiņu skaits
RSS -	novērtētā dispersija
SA -	suberīnskābju saistviela
SD -	standartnovirze
SR -	SIA “Stiga RM”
TAP -	zemes paskābināšanās potenciāls
TSS -	kopējā dispersija
VT -	termiskā modifikācija vakuumā
WDP -	ūdens izsīkšanas potenciāls
WTT -	termiskā modifikācija ūdens tvaika vidē

IEVADS

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 šūnu sieniņu 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.

Saplāksnis 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 m³ saplākšņa, un pasaulē pieaug pieprasījums pēc saplākšņa materiāliem. Izejmateriālu izvēle, kas nosaka saplākšņa cenu un īpašības, ir ļoti būtiska.

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

Pētnieciskā hipotēze: no Termovouto procesā termiski modificētiem finieriem ir iespējams iegūt nišas produktu – āra apstākļiem piemērotu saplāksni.

Pētnieciskās tēzes

1. Termovuoto procesā termiski modificēti finieri ir labāk piemēroti saplākšņa ražošanai nekā WTT procesā modificēti finieri.
2. No bērza saplākšņa ražošanas blakusprodukta – bērza tāss iegūta suberīnskābes saistviela ir piemērota 3. lietojuma klasei atbilstoša saplākšņa ražošanai.
3. Saplāksnim no Termovuoto procesā termiski modificētiem finieriem, līmētiem ar suberīnskābes saistvielu, ir mazāka ietekme uz vidi nekā ar fenola-formaldehīda līmi līmētam bērza saplāksnim.
4. Saplāksnis no Termovuoto procesā termiski modificētiem finieriem, līmētiem ar suberīnskābes saistvielu, ir ekonomiski pamatots nišas produkts.

Pētnieciskie uzdevumi

1. Raksturot bērza, papeles un apses finieru modificēšanas procesu un iegūtā materiāla īpašības.
2. Noskaidrot saplākšņa iegūšanas iespējas, izmantojot komerciālās līmes un suberīnskābju saistvielu.
3. Novērtēt jaunā materiāla ietekmi uz vidi.
4. Izvēlēties optimālu un ekonomiski pamatotu saplākšņa kompozīciju.

Pienesums nozares attīstībā: jauna nišas produkta izpēte, produkta vides deklarāciju salīdzinājums ar nemodificētu un fenola formaldehīda sveķiem līmētu tradicionālo bērza saplāksni.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Koku sugu bioizturība

Koksne ir dabisks materiāls un tā dzīves cikls dabā sākas ar sēklas dīgšanu, stumbra, zaru un lapu veidošanos. Koks fotosintēzes rezultātā uzkrāj oglekli un ražo koksni kā balsta un transporta struktūru, laika gaitā stumbru pieaudzējot ar jauniem koksnes slāņiem (gadskārtu gredzeniem), koksnes dzīvā daļa (kambijs) ražo jaunu koksni, kamēr vecākā iekšējā koksne kļūst par kodolkoksni, kas ir mirusi struktūra, bet izturīga, jo satur daudz ekstraktvielu (Plomion et al., 2001). Pēc koka bojāejas, ko var izraisīt vecums, slimības, kaitēkļi, vētras vai cilvēka darbība, mirušo koksni noārda sēnes, baktērijas un kukaiņi. Šajā procesā augsnē atgriežas minerālvielas un CO_2 – atmosfērā, un augi var izmantot atbrīvotās barības vielas jaunas biomasas veidošanai (Curasi et al., 2025).

Dabiskajā apritē koksnes noārdīšanās process ir nepieciešamība, lai koksnē esošās barības vielas nokļūst atpakaļ vidē (Stokland et al., 2012) , taču, no koksnes iegūstot kokmateriālus, to dabiskā spēja noārdīties kļūst par materiāla trūkumu. Koksnes kā materiāla spēju pretoties bioloģiskai noārdīšanai dabā sauc par bioizturību (Khademi Bami & Mohebby, 2011). Bioizturību bieži nosaka koksnes ķīmiskais sastāvs – dabisko sveķu, tannīnu un ekstraktvielu saturs, tāpēc bioizturība ir atkarīga no koksnes sugas un koksnes tipa. Kodolkoksne vienmēr būs izturīgāka pret bionoārdīšanos, jo tai ir mazāks mitruma saturs un lielāks ekstraktvielu saturs. Tropu lapu kokiem, kā piemēram, tīkkokam, piemīt augsta bioizturība (Febrianto et al., 2000), turpretī tādu skujkoku kā egle un priede aplieva ir ar zemu bioizturību (skat. 1.1. tabulu). Bioizturība ir būtisks faktors, nosakot koksnes pielietojuma veidu. Bioizturību ietekmē arī koku sugu ķīmiskais sastāvs (skat. 1.1. tabulu).

1.1. tabula

Koku sugu ķīmiskais sastāvs

Suga	Pelni, %	Ekstraktvielas	Celuloze	Lignīns	Hemicelulozes	Avots
papele	0.3-0.8	1.5-2.5	50.2-53.0	19.1-20.7	31.8-32.7	(Krutul et al., 2019)
apse	0.26	2.0	41.77	21.81	30.13	(Kocaefe et al., 2008; Morozovs et al., 2018)
bērzs	0.14	3.0	35.38	19.74	35.2	(Kocaefe et al., 2008; Morozovs et al., 2018)

Koksnes un koksnes produktu dabisko bioizturību testē un klasificē atbilstoši standartam EN 350:2016. Bioizturības klase tiek norādīta tikai kodolkoksnei, un aplieva vienmēr tiek uzskatīta par bioneizturīgu, ja vien standartā nav norādīti citi dati.

Izturība pret bazīdijsēnēm un mīkstās trupes mikrosēnēm tiek klasificēta piecās bioizturības klasēs, no kurām pirmā – ļoti izturīga un piektā – neizturīga.

Izturība pret vaboļu (*Holotrupes bajulusm Anobium punctatum, Lyctus brunneus un Trichoferus holosericeus* Rossi) uzbrukumiem tiek klasificēta divās grupās – bioizturīga (D) un bioneizturīga (S).

Bioizturība pret termītu uzbrukumiem tiek klasificēta trijās grupās, tāpat kā pret jūras urbējgliemeņu uzbrukumiem – izturīga (D), vidēji izturīga (M) un neizturīga (S).

Izturību pret bazīdijsēnēm nosaka pēc procentuālajiem masas zudumiem, kas koksnei radušies konkrētās sēnes iedarbībā. Masas zudumi zem 5% liecina par atbilstību 1. klasei – ļoti bioizturīgs materiāls; 5 līdz 10% - 2. klase – bioizturīgs materiāls; masas zudumi 10 līdz 15%

- 3. klase – vidēja bioizturība, 10 līdz 15%; 4. klase - neliela bioizturība 15 līdz 30% un ar masas zudumu bazīdijsēņu ietekmē virs 30% koksne un tās materiāli tiek iedalīti 5. klasē – bioneizturīgi. Šīs pašas klases, taču cita testēšanas metode atbilstoši standartam EN 252:2014 – lauka testi, tiek lietota arī, lai noteiktu koksnes bioizturību kontaktā ar augsni. Dažu Latvijā augošu koka sugu kodolkoksnes bioizturības klases var redzēt 1.2. tabulā.

1.2 tabula

Latvijas koku sugu kodolkoksnes bioizturības klases (EN 350:2016)

Koka suga	Nosaukums latīniski	Bioizturības klase
Priede	*Pinus sylvestris*	3–4 (2-5)
Egle	*Picea abies*	4 (4-5)
Āra bērzs/ purva bērzs	*Betula pendula / B. pubescens*	5
Melnalksnis	*Alnus glutinosa*	5
Apse	*Populus tremula*	5
Eiropas lapegle	*Larix decidua*	3–4
Ozols	*Quercus robur*	2–4 (1-2)
Osis	*Fraxinus excelsior*	5 (4)
Skābardis	*Carpinus betulus*	5
Papele	*Populus × canescens*	5

Kā redzams 1.2. tabulā, bērzs un apse pieder pie bioloģiski neizturīgām koku sugām. Pasaulē pieaugot pieprasījumam pēc koksnes resursiem, bioizturīgo sugu piedāvājums sarūk, tāpēc būtiski ir rast pielietojumu arī bioloģiski ne tik izturīgām koka sugām, ar dažādiem paņēmieniem paaugstinot to bioizturību.

Koksnes pielietojumu būvkonstrukcijās regulē 5. Eirokodekss (LVS EN 1995-1-1+AC+A1:2012). Tajā būves tiek iedalītas lietojamības klasēs (service class). Pie 1. lietojamības klases pieskaitāmas koksnes konstrukcijas, kas atrodas apsildītā iekštelpā vai tam pielīdzināmā mitruma situācijā (< 12%). Pie 1. lietojamības klases parasti var pieskaitīt arī siltumizolācijas slānī esošās konstrukcijas un sijas. 5. bioizturības klases koksni nav ieteicams lietot augstākās klasēs par pirmo, ja netiek veikta papildus apstrāde tās bioizturības nodrošināšanai. Šajā klasē sēņu ietekme ir nejauša un nenozīmīga, bet termīti un koksngrauži var ietekmēt koksni, un to ietekme ir atkarīga no reģiona.

Pie 2. lietojamības klases pieskaitāma āra apstākļos esoša sausa koka konstrukcija. Konstrukcijai ir jāatrodas apjumtā un ventilētā telpā, tai jābūt labi aizsargātai no mitruma gan apakšā, gan sānos. Pie šīs lietojamības klases parasti pieskaitāmas ventilējamas grīdas sistēmas un neapsildāmu bēniņu telpās esošas koka konstrukcijas. Mitruma saturs 12 līdz 20%. Šajā klasē var lietot kokmateriālus ar bioizturību 3 līdz 4. Šajā klasē iespējama gan sēņu, gan termītu un koksngraužu ietekme.

Pie 3. lietojamības klases pieskaitāmas ārējo laika apstākļu ietekmei pakļautas mitrā telpā esošas vai tiešai ūdens ietekmei pakļautas koka konstrukcijas.

Līdzīgi koksnes materiālus lietojuma klasēs (use class) iedala arī standarts EN 335:2013. Pēc šī standarta 1. klasē ietilpst sausos apstākļos un iekštelpās esoši koksnes materiāli, kas var tikt pakļauti kukaiņu un termītu ietekmei. 2. klasē ietilpst iekštelpās vai zem jumta esoši un āra apstākļu ietekmē novecošanai nepakļauti koksnes materiāli, uz kuriem iespējama mitruma kondensēšanās. Šādi kokmateriāli ir pakļauti koksnes krāsojošo sēņu (pelējums, zilējums) ietekmei, kā arī koksnes noārdošo sēņu, vaboļu un termītu ietekmei. 3. klase, atkarībā no tā, cik lielā mērā konstrukcija ir pakļauta mitruma ietekmei, tiek iedalīta divās apakšgrupās. Standarts EN 335:2013 izšķir 3.1. un 3.2. apakšgrupu. 3.1. apakšgrupā ietilpst konstrukcijas, kuras nepaliek mitras ilgstoši, turpretī 3.2. apakšgrupā tādas, kurām mitruma ietekme ir ilgstoša. Šādi kokmateriāli ir pakļauti koksnes krāsojošo sēņu (pelējums, zilējums) ietekmei, kā arī koksnes noārdošo sēņu, kukaiņu un termītu ietekmei.

4. lietojuma klasē ir koksnes konstrukcijas, kuras atrodas tiešā saskarē ar zemi un/vai saldūdeni. Koksnei zem ūdens līmeņa nedraud biodegradācija sēņu ietekmē, taču to var noārdīt baktērijas. Virs ūdens līmeņa koksni apdraud gan krāsojošās, gan noārdošās sēnes, kukaiņi un termīti.

Piekto lietojuma klasi pārstāv konstrukcijas, kas ir regulārā saskarē ar sālsūdeni. Siltākos sālsūdeņos koksni apdraud tādi organismi kā *Limnoria spp.*, *Teredo spp.* un urbējgliemenes, kā arī var būt krāsojošo un noārdošo sēņu, termītu un kukaiņu uzbrukumi. 1.3. tabulā redzams lietojamības un lietojuma klašu (LK) salīdzinājums.

1.3 tabula

Lietojamības un lietojuma klašu salīdzinājums (EN 335:2013)

N.P.K.	**Lietojamības klases (Service class)**	**Lietojuma klases (Use class)**
1	1. klase	1. klase
2	2. klase	1. klase 2. klase, ja komponents reizēm ir pakļauts mitruma ietekmei (kondicionēšanās dēļ)
3	3. klase	2. klase 3. klase un augstākas, ja tiek lietots āra apstākļos

Latviešu valodā abi termini ir ļoti līdzīgi, tāpēc jāizvairās no to sajaukšanas. Koksnes dabiskā bioizturība bieži vien ir nepietiekama koksnes pielietojumam vēlamajā lietošanas klasē, tāpēc izsenis tiek veikta koksnes piesūcināšana ar dažādām vielām, lai paaugstinātu koksnes bioizturību. Standards EN 351-1:2023 nosaka nepieciešamos iespiešanās (*penetration*) un piesātinājuma (*retention*) līmeņus masīvkoksnei un līmētām koksnes konstrukcijām (*glulam*), kas nepieciešami koksnes aizsardzībai pret koksnes noārdošajām un krāsojošajām sēnēm, insektiem un jūras urbējgliemenēm. 1. piesūcināšanas klasei (iekštelpās) nav definēts koksnes aizsardzības līdzekļa iespiešanās dziļums aplievā. 2. piesūcināšanas klasei nepieciešama jau vidējas piesūcināšana – aplieva 3 mm dziļumā. 3. piesūcināšanas klasei nepieciešama aplievas piesūcināšana 6 mm dziļumā. 4. piesūcināšanas klasē – aplieva 25 mm dziļumā. 5. piesūcināšanas klasei – visa aplieva. 6. piesūcināšanas klasei – visa aplieva un 6 mm pieejamajā kodolkoksnē. Šis standarts neņem vērā koksnes smaržu pēc piesūcināšanas, savienotāju koroziju, jebkādus veselības un drošības riskus, kā arī vides aspektus, kas, protams, ir būtiski, izvēloties koksnes aizsardzības metodi. 1.4. tabulā uzrādīti daži biežāk lietotie koksnes aizsardzības līdzekļi.

1.4 tabula

Populārākie koksnes aizsardzības līdzekļi

Koksnes aizsardzības līdzekļu veids	**Bāze**	**Aktīvā sastāvdaļa**	**Izmantošana**	**Piezīmes**
Vara azoli (Copper Azole)	Ūdens	Vara azolu savienojumi	Terases, žogi, dārza mēbeles (LK3-LK4)	Kopš vara hroma arsenāta aizliegšanas populārākā izvēle āra lietojumam (Freeman & McIntyre, 2008)

1.4 tabulas turpinājums

Koksnes aizsardzības līdzekļu veids	Bāze	Aktīvā sastāvdaļa	Izmantošana	Piezīmes
Sārmaini vara četraizvietotie sāļi (Alkaline Copper Quaternary)	Ūdens	Četraizvietotie amonija vara savienojumi	Konstrukciju koksne, dārza mēbeles, spēļlaukumi (LK3-LK4)	Plaši pieejama koksnes aizsardzības līdzekļu grupa, taču nepieciešami korozijizturīgi stiprinājumi, jo varš ir reaģētspējīgs (Lebow, 2004)
Mikronizēti vara azoli (Micronized Copper Azole)	Ūdens	Mikronizēti vara azola savienojumi	Terases dēļi, apdares dēļi, dārza mēbeles (LK3-LK4)	Vara daļiņas tiek sasmalcinātas, lai uzlabotu iespiešanos un materiāla ārējo izskatu (Freeman & McIntyre, 2008).
Kreozots (Creosote)	Eļļa	Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži	Sliežu gulšņi, elektropārvades stabi, jūras būvju pāļi (LK4-LK5)	Ļoti efektīvs, taču ar spēcīgu smaržu; tā izmantošana tiek ierobežota vides un veselības apsvērumu dēļ. (Walker et. al., 2023)
Pentahlorfenols (Pentachlorophenol)	Eļļa	Pentahlorfenols	Elektropārvades stabi, šķērssijas, masīvu konstrukciju sijas (LK4)	Efektīvs un plaša spektra biocīds. Ierobežota lietošana vai aizliegts vairākās valstīs (Radosavljevic, 2025)
Borāti (Borates)	Ūdens	Dinātrija oktaborāta tetrahidrāts	Iekšējās karkasa konstrukcijas, mēbeles, koksne bez tiešas saskares ar zemi (LK1-LK2)	Zema toksicitāte cilvēkiem, taču viegli izskalojas, tāpēc nav piemērots mitrai videi vai saskarei ar zemi (Nandasiri & De Silva, 2019)
Vara hroma arsenāts (Chromated copper arsenate)	Ūdens	Hroms, varš, arsēns	Sakaru un elektrolīniju stabi, jūras būvju pāļi, rūpnieciskās konstrukcijas (LK4-LK5)	Agrāk plaši lietots, šobrīd tā lietošana ir aizliegta arsēna satura dēļ. (Mohejari et. al., 2018)

1.4. tabulas nobeigums

Koksnes aizsardzības līdzekļu veids	Bāze	Aktīvā sastāvdaļa	Izmantošana	Piezīmes
Koksnes aizsardzības līdzekļi uz šķīdinātāja bāzes (Light organic solvent preservatives)	Šķīdinātājs	Sintētiskie piretroīdu savienojumi, azolu grupas savienojumi, pretsēnīšu līdzekļi	Galdniecības izstrādājumi, apdares dēļi, logu rāmji (LK2-LK3)	Uzklājams bez būtiskas mitruma uzsūkšanās; ideāli piemērots galdniecības izstrādājumu rūpnieciskai apstrādei (Villasante et. al., 2013).

Koksnes aizsardzības līdzekļu lietošana ir efektīva, taču saistīta ar vides riskiem koksnes aizsardzības līdzekļu ražošanas, piesūcināšanas un materiālu lietošanas laikā, tāpēc ir pētīti dažādi koksnes modifikācijas veidi.

1.2. Koksnes modifikācija

Koksnei kā atjaunojamam resursam ir nozīmīga loma aprites ekonomikā (Gayda, 2025). Lai uzlabotu koksnes īpašības un novērstu tai piemītošos trūkumus, kā piemēram, zemu bioizturību, un radītu jaunus materiālus specifiskam pielietojumam, koksni ir iespējams modificēt jeb pārveidot. Ar koksnes modifikāciju saprot procesu, kura mērķis ir uzlabot fizikālās, mehāniskās vai estētiskās zāģmateriālu, finieru vai skaidu īpašības. Šī procesa rezultātā koksne saglabā savus dabiskās koksnes raksturlielumus, tā netiek sašķiedrota.

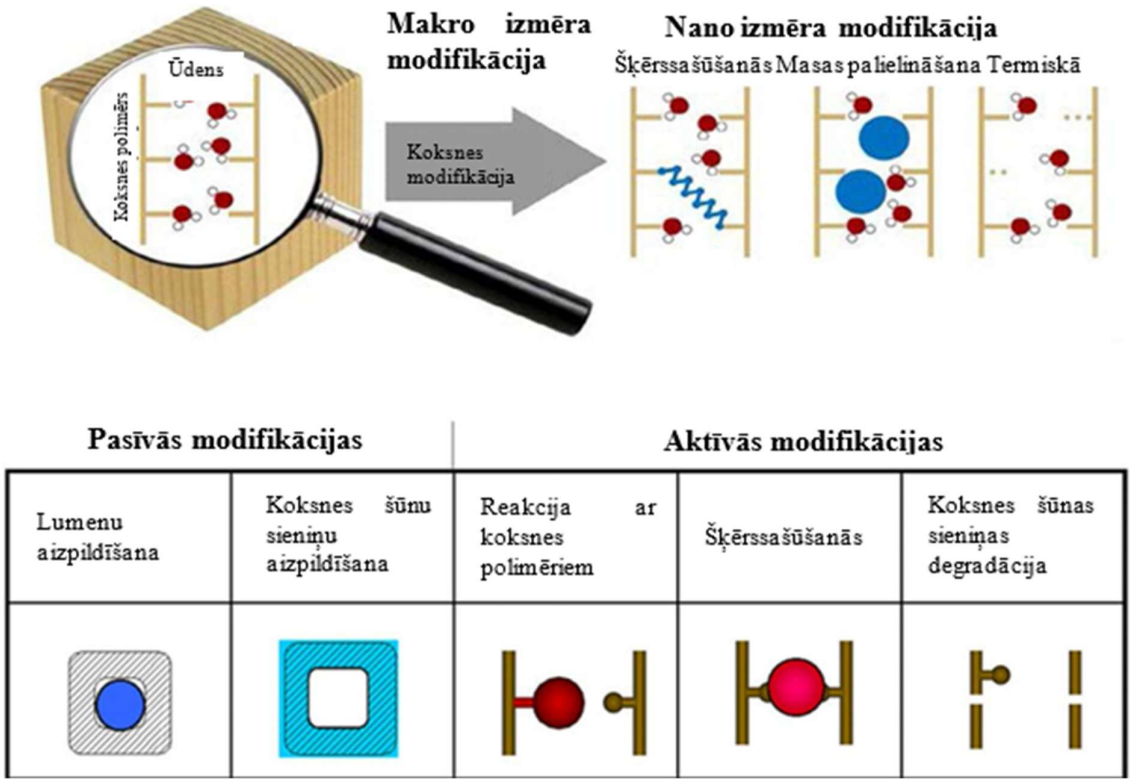
Galvenie koksnes trūkumi, kas tiek novērsti, to modificējot (Jones et al., 2019), ir šādi:

1) zema bioizturība pret sēnēm, termītiem un jūras urbējgliemenēm. Jutība pret mitruma satura izmaiņām;
2) zema izmēru stabilitāte;
3) zema cietība un nodilumizturība;
4) zema izturība pret UV starojumu un novecošanos;
5) estētiskās īpašības.

Galvenie iemesli, kāpēc koksnes modificēšanai ir pievērsta liela interese pēdējo desmitgažu laikā (Jones et al., 2019), ir šādi:

1) izmaiņas koksnes īpašībās kā rezultāts silvikultūras prakšu izmaiņām un izmaiņām veidā, kā koksne tiek lietota būvniecībā;
2) palielinās izpratne par reti sastopamu sugu koksnes lietojumu tās izskata un bioizturības dēļ;
3) palielinās izpratne un pastiprinās likumiskais regulējums koksnes aizsardzības līdzekļu pielietošanas jomā;
4) palielinās ražošanas sektora interese par kokapstrādes atlikumu un blakusproduktu izmantošanu augstas pievienotās vērtības produktu radīšanai;
5) Eiropas Savienības politika atbalsta ilgtspējīgas sabiedrības attīstību;
6) starptautiskā pieeja klimata izmaiņu mazināšanai, piemēram, Parīzes nolīgums (United Nations, 2015).

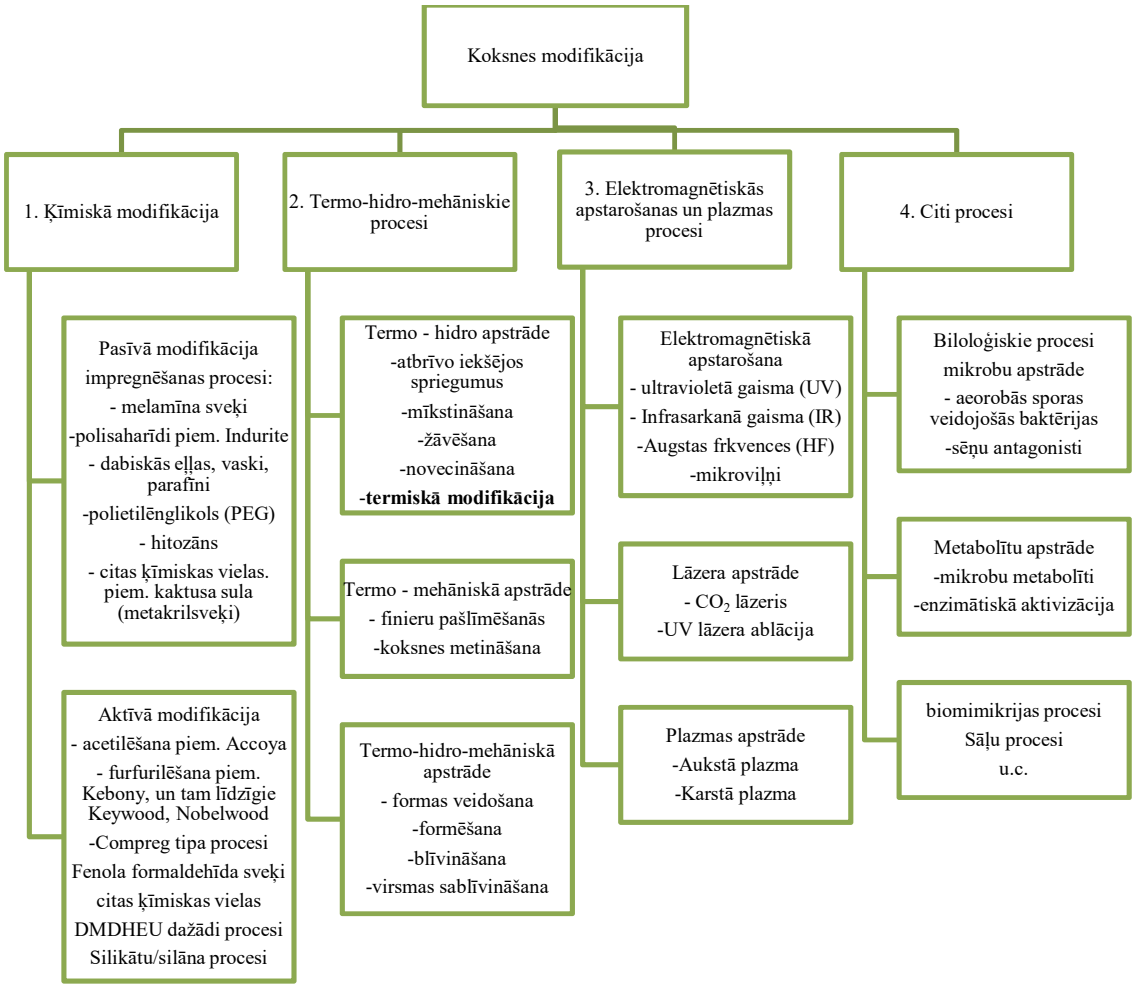
Koksnes modifikācijas veidus var iedalīt aktīvajā un pasīvajā. Aktīvā modifikācija ir tā, kuras laikā notiek ķīmiskas materiāla izmaiņas, bet pasīvā modifikācija ir tā, kurā šādas izmaiņas nenotiek (skat. 1.1. att.).



1.1. att. **Koksnes modifikāciju veidi** (Sandberg et al., 2017)

Vairākums aktīvās termiskās modifikācijas metožu sevī iekļauj koksni veidojošo polimēru hidroksilgrupu reakciju ar reaģentu. Šīs molekulas ir atbildīgas par koksnes un ūdens mijiedarbību, veidojot ūdeņraža saites ar ūdens molekulām un nodrošinot koksnes briešanu un rukšanu. Termiskās modifikācijas laikā tiek pārveidota daļa no koksnes šūnu sieniņu veidojošajiem polimēriem, kas noved pie šķērssašūšanās reakcijām, hidroksilgrupu skaita samazinājuma un nevēlamas polimēru ķēdes šķelšanās (Herrera-Builes et. al., 2022). Šis modifikācijas veids pieder pie aktīvās modifikācijas, jo koksnē notiek ķīmiskas izmaiņas. Taču iespējama arī pasīvā modifikācija, koksni apstrādājot ar ūdeni paaugstinātā temperatūrā, lai mīkstinātu lignīnu un nodrošinātu koksnes veidošanu un liekšanu, kas nav iespējama ar nemodificētu koksni, būtiski nepasliktinot tās īpašības. Dažādu frekvenču elektromagnētiskais starojums, lāzera un plazmas apstrāde arī var tikt lietota, lai mainītu koksnes virsmas ķīmisko sastāvu un mikrostrukturālos raksturlielumus, kā arī koksnes mīkstināšanai (Kudela et. al. 2024).

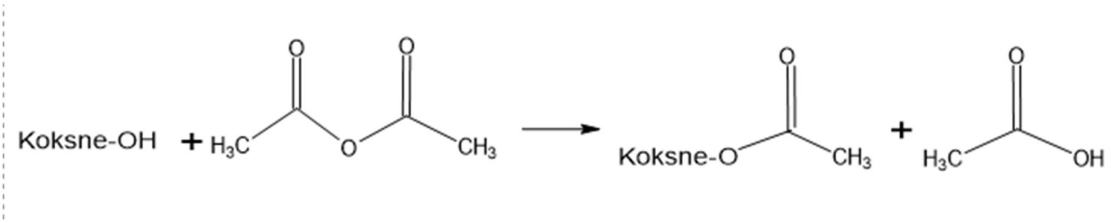
Koksnes modifikācijas procesus var klasificēt pēc procesa tipa, kas tiek lietots, lai panāktu vēlamās koksnes īpašību izmaiņas (Jones et al., 2019.). Šajā diagrammā attēlotie citi procesi, kas nākotnē var tikt izmantoti koksnes modifikācijai, bet šobrīd tiek lietoti lauksaimniecības, enerģētikas vai pārtikas nozarēs (skat. 1.2. att.).



1.2. att. **Koksnes modifikāciju iedalījums pēc procesu tipa** (Jones et al., 2019)

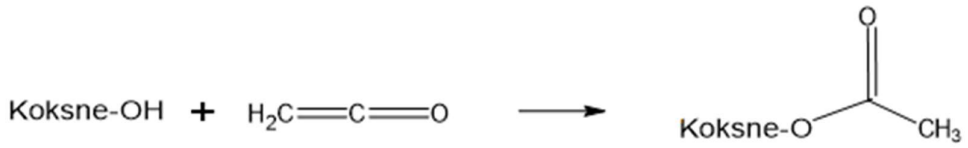
Pastāv dažādi veidi kā ķīmiski modificēt koksnes šūnu sieniņu veidojošos polimērus, tādus kā lignīns, hemicelulozes un celuloze, taču visbiežāk par reakcijas vietu tiek izmantotas koksnes hidroksilgrupas. Tās arī ir atbildīgas par ūdeņraža saišu veidošanu ar ūdens molekulām un attiecīgi koksnes rukšanu un uzbriešanu. Koksnes ķīmiskā modifikācija, kurā noris reakcija ar koksnes hidroksilgrupām, tās aizstājot ar stabilākiem, hidrofobākiem un kovalento saiti veidojošiem savienojumiem nodrošina koksnes izmēru stabilitātes uzlabošanos. Ķīmiskā modifikācija prasa modificējošā aģenta iespiešanos koksnes mikrostruktūrā. Koku sugas, kuras ir grūti piesūcināt, nav piemērotas ķīmiskajai modifikācijai, vismaz to lielās dimensijās. Aplievu parasti ir vieglāk piesūcināt nekā kodolkoksni, tāpēc arī aplieva uzrāda lielāku masas pieaugumu ķīmiskās modifikācijas procesā (Jones et al., 2019).

Acetilēšana ir galvenā ķīmiskās modificēšanas metode. Reakcija notiek starp etiķskābes anhidrīdu un koksnes hidroksil grupām pēc mehānisma, kas attēlots 1.3. attēlā.



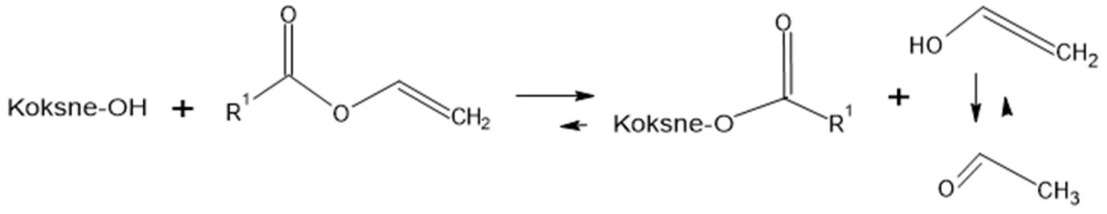
1.3. att. **Acetilēšanas reakcijas mehānisms**

Līdzīgu rezultātu var iegūt, koksni apstrādājot ar ketēnu vai diketēnu (skat. 1.4 un 1.5. att.), kā arī vinilacetātu (skat. 1.6. att.).



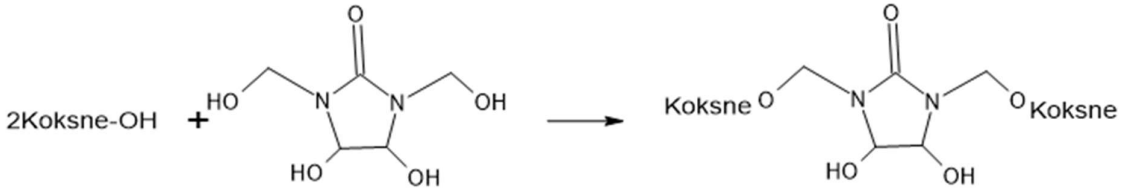
1.4. att. **Koksnes acetilēšana ar ketēnu**

1.5. att. **Koksnes acetilēšana ar diketēnu**



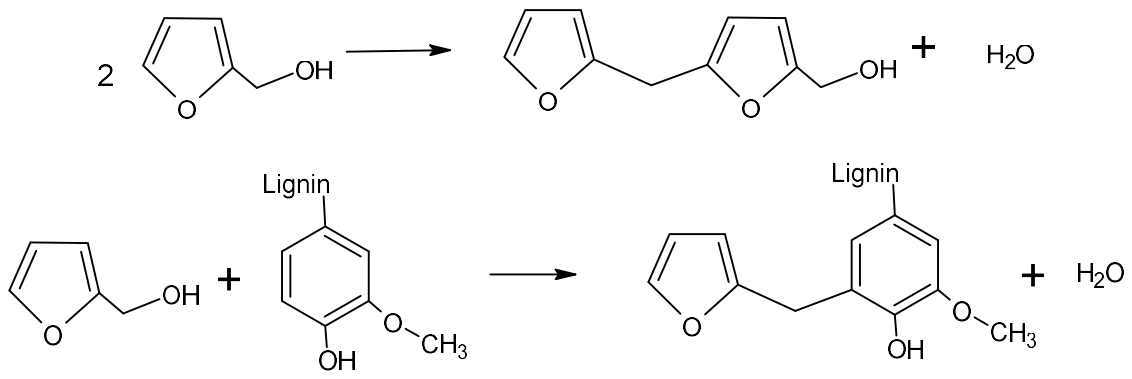
1.6. att. **Koksnes acetilēšana ar vinilacetātu**

Modificēšana ar DMDHEU jeb pamatā tekstila nozarē lietoto 1,3 – dimetilol – 4,5 – dihidroksietilēn urīnvielu prasa augstspiediena impregnēšanu, kam seko polimēru reakcija aptuveni 100 līdz 120 °C mitros apstākļos, kas izraisa polikondensēšanās reakciju, kurā izdalās ūdens (skat. 1.7. att.).



1.7. att. **Koksnes modifikācija ar DMDHEU**

Furfurilēšanas process ir balstīts uz koksnes struktūras piesūcināšanu ar furilspirtu, kura polimerizācijas process koksnē ir sarežģīts. Tiek piedāvātas divas iespējamās procesu norises shēmas (skat. 1.8. att.). Furilspirta polimērs var reaģēt pats ar sevi un iespējams ar lignīnu koksnes šūnas sieniņās, tā palielinot to masu. Otrs skaidrojums ir tāds, ka furilspirts šūnas sieniņās aizņem vietu, ko mitros apstākļos šūnas sieniņās aizņem ūdens. Visticamāk furfurilēšanas laikā abi procesi noris paralēl



1.8. att. **Furfurilēšanas laikā notiekošās reakcijas**

Piesūcināšana ar sveķiem/ polimerizācija ir plaši pētīta ASV. Ar fenola – formaldehīda sveķiem piesūcinātai koksnei ir uzlabota izmēru stabilitāte un paaugstināta bioizturība. Tirgū ir pieejami tādi produkti kā Compreg® un Impreg® (Suhaimi et. al. 2019).

Modificēšana ar silikona savienojumiem ir balstīta galvenokārt uz silikātskābes kondensācijas produktiem vai tetraalkoksi silāniem, kuru hidrolīzes un kondensācijas rezultātā veidojas soli un visbeidzot gēli. Alkali silikāti jeb "ūdens stikls" paaugstina koksnes bioizturību, kaut arī ir novēroti vairāki procesa trūkumi, kā piemēram, augsta hidrofilitāte augstas pH vērtības, kā arī koksnes stiprības zudums (Slabejova et. al., 2017).

Daudziem no iepriekš minētajiem modifikācijas veidiem procesā nepieciešams izmantot ķīmiskas vielas, kas procesu nepadara būtiski atšķirīgu no koksnes piesūcināšanas. Turpretī koksnes termiskā modifikācija ir modifikācijas veids, kurā tiek izmantota tikai temperatūra, kas veicina izmaiņas koksnes ķīmiskajā sastāvā un koksnes šūnas sieniņas struktūrā.

1.3. Koksnes termiskā modifikācija

Koksnes termiskajā modifikācijā ietilpst termo-hidro-mehāniskie procesi (THM) un termo hidro procesi (TH), kas sevī ietver vairākus procesus, kas plaši pētīti gan senatnē, gan savu attīstību piedzīvojuši tikai pēdējā laikā. TH procesos vienojošais faktors ir koksnes iekšējo spriegumu mazināšana, pakļaujot koksni karstam tvaikam vai vārošam ūdenim, kas ir tipiski finieru ražošanas procesam. Arī koksnes žāvēšana kamerās virs 100 °C tiek uzskatīta par vieglu koksnes modifikāciju. Koksnes termiskā apstrāde notiek 100 līdz 300 °C temperatūrā, un tai ir divi galvenie mērķi:

1) mīkstināt koksni ūdens tvaika vai ūdens klātbūtnē, lai nodrošinātu tās tālāku apstrādi;
2) kontrolēt koksnes termisko sadalīšanos, kurā koksne tiek apstrādāta augstā temperatūrā (parasti 150 līdz 260 °C) bez skābekļa klātbūtnes, lai uzlabotu tās īpašības – formas stabilitāti un bioizturību.

Koksnes termiskā apstrāde temperatūrās virs 300 °C nav ekonomiski izdevīga, jo koksnes materiāls tiek būtiski bojāts. Koksnes apstrādi temperatūrā 100 līdz 150 °C sauc par koksnes paātrinātu novecināšanu. Koksnes termiskās modifikācijas galvenie trūkumi ir koksnes stiprības zudums un trausluma palielināšanās.

Daži galvenie ieguvumi no koksnes termiskās modifikācijas ir šādi:

1) **paaugstināta bioizturība**. Tā kā hemicelulozes un ūdens ir nepieciešami koksnes bionoārdošos sēņu izdzīvošanai, to trūkums nodrošina koksnes bioizturības paaugstināšanos (Korkut et al., 2012). Termiski modificēta koksne kļūst izturīgāka ne tikai pret sēnītēm, bet arī pret pelējumu (Ahmed et al., 2013) un kukaiņiem, kas to padara piemērotu āra apstākļiem. Samazināta līdzsvara mitruma un hemiceluložu noārdīšanās līdz cukuriem dēļ, pieejamība brūnās trupes sēnēm ir samazināta, taču tā kā lignīns ir termiski visstabilākais komponents, tad pret baltās trupes sēni, kas uzbrūk lignīnam, ir ļoti vāja aizsardzība;
2) **samazināta ūdens uzsūkšanās**. Šī apstrāde samazina koksnes higroskopiskumu, tādējādi samazinot koksnes uzbriešanu un sarukumu mitruma ietekmē. Sadaloties higroskopiskajiem hemiceluložu cukuriem un tiem veidojot mazāk higroskopiskus furāna polimērus, pārsvarā furfurolu un hidroksimetilfurfurolu, līdzsvara mitrums tiek samazināts aptuveni uz pusi, salīdzinot ar nemodificētu koksni;
3) **uzlabota stabilitāte un forma**. Termiski modificēta koksne kļūst mazāk jutīga pret deformācijām un plaisām, padarot to stabilāku un piemērotāku dažādiem celtniecības projektiem;
4) **krāsas izmaiņas**. Apstrāde piešķir koksnei tumšāku, estētiski pievilcīgāku izskatu, kas dažkārt var atgādināt eksotisku koksni, tomēr koksnes brūnā krāsa salīdzinoši ātri izbalē un kļūst pelēka;
5) **vides draudzīgums**. Šis process neizmanto ķīmiskas vielas, padarot to par ekoloģiski draudzīgu koksnes apstrādes metodi;
6) **skaņas absorbcijas īpašības.** Skaņas absorbcijas īpašības ir atkarīgas no koksnes blīvuma un porainības, kā arī iekšējās poru sieniņas raupjuma (Mania et al., 2023). Termiskā modifikācija maina koksnes blīvumu, tādējādi izmainot arī skaņas absorbcijas īpašības. Jo augstāka temperatūra un ilgāks termiskās modifikācijas process, jo augstāks skaņas absorbcijas koeficients (Chung et al., 2017). Šo īpašību var izmantot mūzikas instrumentu izgatavošanā (Pfriem, 2015a).

Koksnes termiskā modifikācija ir piemērota dažādiem pielietojumiem, tostarp terasēm, fasādēm, mēbelēm, grīdām un citiem celtniecības un apdares projektiem. Termiski modificētu koksni var izmantot arī mūzikas instrumentu ražošanai, kur uzlabotas hidrofobitātes un dimensionalās stabilitātes dēļ uzlabojas arī skaņas īpašības (Pfriem, 2015b).

Protams, neiztikt arī bez trūkumiem, no kuriem galvenais ir koksnes stiprības zudums, kas notiek koksnes šūnas sieniņas degradācijas dēļ, degradējoties hemiceluložu polimēram. Šī iemesla dēļ cietības zudums ir 5 līdz 10%, lieces stiprības 10 līdz 20%, elastības modulis 5-20% un triecienstiprība zūd 30 līdz 80% apmērā. Tāpēc termiski apstrādāta koksne nav paredzēta slodzi nesošām konstrukcijām. Termiski modificētas koksnes izmantošanu kavē arī vienotu ražošanas standartu trūkums (Lynn Gamache & Omar Espinoza, 2017). Mazākus masas zudumus ir iespējams panākt termisko modifikāciju veicot pazeminātā spiedienā.

1.4. Koksnes termiskā modifikācija vakuumā

Koksnes termiskā modifikācija vakuumā THERMOVUOTO® ir patentēta tehnoloģija, kas ļauj samazināt skābekļa koncentrāciju reaktora iekšienē, kas palīdz izvairīties no koksnes aizdegšanās vai pirolīzes. Šo metodi ir patentējuši un iekārtas izgatavo itāļu uzņēmums WDE maspell (www.wde-maspell.com). Tas tiek klasificēts kā sausais process atvērtā sistēmā, kur vakuuma pumpis pastāvīgi aizvāc gaistošos organiskos savienojumus no reaktora. Gaistošie organiskie savienojumi (pārsvarā polisaharīdu sadalīšanās produkti) un ūdens tvaiks darbojas kā katalizatori, paātrinot koksnes sadalīšanos un to aizvadīšana ar vakuumu nodrošina mazākus masas zudumus procesā, tādējādi arī mazāk samazinātas mehāniskās īpašības. Koksnes

termiskās modifikācijas blakusproduktu aizvākšana nodrošina arī augstāku enerģijas efektivitāti, mazāku koroziju un rūsas problēmas reaktorā, ja salīdzina ar alternatīviem procesiem, kas noris uzkarsēta tvaika vidē (Sandak, Sandak, Cuccui, et al., 2015a).

Masīvkoksnes termiska modificēšana pēc šīs metodes tiek veikta arī rūpnieciskos apjomos, piemēram, Francijas uzņēmumā Ecolwood (www.ecolwood.com) veikti arī vairāki pētījumi par masīvkoksnes modificēšanu.

Gao un citi (Gao et al., 2016) veikuši pētījumu par Termovuoto procesā modificētas masīvkoksnes bioizturību. Pētījumā izmantota egles (*Picea abies* Karst.), baltegles (*Abies alba* Mill), oša (*Fraxinus excelsior L*) un dižskābarža (*Fagus sylvatica* L.) aplieva. Termiskās modifikācijas apstākļi 160 līdz 220 °C (4 h) skujkoku masīvkoksnei un 190 līdz 220 °C (3 h), lapkoku masīvkoksnei. Bioizturība pārbaudīta atbilstoši AWPA E10-08:2008 augsnes bloku testam, modificējot parauga izmērus, un EN 113-2:2021 laboratorijas testam izvēlētas divas brūnās trupes sēnes (*Postia placenta*, *Gloeophyllum trabeum*) un divas baltās trupes sēnes (*P. sanguineus*, *P. radiata*). Rezultāti parādīja, ka termiski modificēto koksni vairāk ietekmē brūnās trupes sēnes, nevis baltās trupes sēnes un būtisks bioizturības uzlabojums ir panākts pie temperatūras 220 °C.

Allegretti (Allegretti et al., 2012) pētījumā TV modificēta egles (*Picea abies* Karst.) un baltegles (*Abies alba* Mill.) bioizturība noteikta atbilstoši laboratorijas standartam EN 113-2:2021 pret trīs brūnas trupes (*Coniophora puteana* BAM Ebw. 15, *Gloeophyllum trabeum* BAM Ebw. 109 un *Postia placenta* FPRL 280) un vienu baltās trupes sēni (*Trametes versicolor* CTB 863A). Šajā pētījumā secināts, ka **v**isagresīvākā sēne pret termiski modificēto koksni bija brūnās trupes ierosinātāja *P. placenta*, kas ir tipiska koksnes noārdītāja saskarē ar zemi. *P. placenta* izraisīja masas zudumu 10 līdz 20 % robežās un tādējādi klasificē apstrādāto koksni 3. un 4. bioizturības klasē, kas ir samērā vājš uzlabojums salīdzinājumā ar neapstrādātiem kontrolparaugiem.

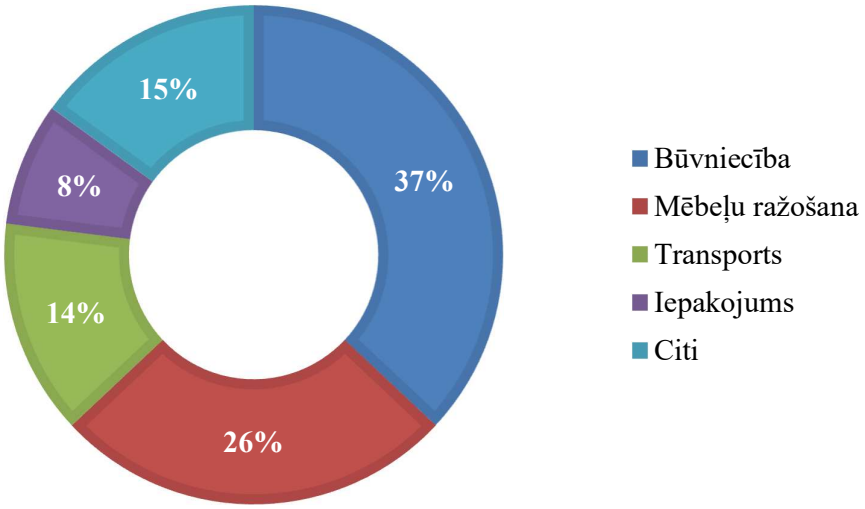
Kim (Kim et al., 2015) pētījis oša koksnes ķīmisko sastāvu šūnu līmenī, izmantojot imūncitoķīmisko metodi. Pētījumā konstatēts, ka pektīni un ksiloglukāns vidējās lamellas šūnas stūra reģionos pēc termovakuuma apstrādes ir būtiski degradēti, kas norāda, ka šie reģioni oša koksnē, kas modificēta 3 h, 220 °C var būt veidoti galvenokārt no modificēta lignīna. Mannāna un mazākā mērā arī ksilāna degradācija šķiedru šūnu sieniņās pie šī modifikācijas režīma arī bija novērojama. Termiskās modifikācijas process dažādos šūnu sieniņu reģionos norisinās atšķirīgi. Izteiktāka pektīnu nekā hemiceluložu degradācija norāda uz pektīnu augsto jutīgumu pret temperatūras ietekmi.

Ir veikti pētījumi arī par baltegles ķīmiskā sastāva izmaiņām Termovuoto procesa ietekmē. Candelier (Candelier et al., 2014) konstatējis, ka holocelulozes saturs ir samazinājies no 65% līdz 50%, α-celulozes saturs ir palicis gandrīz nemainīgs. Hemiceluložu saturs ir samazinājies no 28% līdz 12%, Klāsona lignīna saturs ir nedaudz pieaudzis no 30% līdz 34%. Ekstraktvielu saturs - no 2% līdz 4%. 12% masas zudumi galvenokārt ir uz hemiceluložu degradācijas rēķina. Hemicelulozes veidojošie monosaharīdi ir samazinājušies attiecīgi arabinoze no 1.07% uz 0.31%; galaktoze no 1.58% līdz 0.51%; glikoze no 52.95% līdz 50.37%; ksiloze no 21.78% līdz 11.62%; mannoze no 11.22% līdz 3.27%, tomēr degradēšanās ir mazāka, ja salīdzina ar slāpekļa atmosfērā modificētiem paraugiem.

Jebrane (Jebrane et al., 2018) veicis produktu salīdzināšanu priedes (*Pinus sylvestris* L.), egles (*Picea abies* Karst.) un tropu lapkoku stercūlijas (*Sterculia appendiculata* K. Schum) un nīma (*Azadirachta indica* A. Juss) masīvkoksnei, kas modificēta tvaika vidē - Thermowood® procesā un Termovuoto® procesā. Pētījumā noskaidrots, ka Thermowood procesā modificētai koksnei ir lielāki masas zudumi, galvenokārt hemiceluložu destrukcijas dēļ, tomēr pētījumā secināts, ka, izmantojot abas termiskās modifikācijas metodes, iegūtie rūpnieciskie produkti ir līdzīgi pēc savām ķīmiskajām, fizikāli mehāniskajām īpašībām, kā arī bioizturības.

1.5. Saplākšņi un saplākšņu materiāli

Saplākšņus koksnes anizotropijas dēļ parasti veido no nepāra skaita finieriem (Thoemen, 2010). Saplākšņa īpašības padara to par daudzpusīgu materiālu ar plašu pielietojumu celtniecībā, slodzēm pakļautām konstrukcijām un betona veidņu plātnēm (Nakano et al., 2025), mēbeļu ražošanā (Wan et al., 2025), iekšējā apdarē , grīdas segumiem, transportā (Saroj et al., 2019) un citās nozarēs. Izejmateriālu izvēle ir ļoti būtiska un nosaka saplākšņa cenu un īpašības. 2024. gadā Eiropas Savienības valstīs saražoti 2.7 miljoni m^3 saplākšņa. To gala izmantojums redzams 1.9. attēlā (European Panel Federation, 2024).



1.9. att. **Saplākšņu izmantošanas virzieni 2024. gadā** (European Panel Federation, 2024)

Saplāksnim uzbriešana plaknes virzienā ir nedaudz izteiktāka nekā masīvkoksnē šķiedru virzienā. Tā rukums un uzbriešana plaknes virzienā ir 0.02% no koksnes līdzsvara mitruma, bet perpendikulāri plaknei (biezumā) – 0.30% no koksnes līdzsvara mitruma. Gatava nemodificēta saplākšņa mitruma saturs parasti ir 5 līdz 15% robežās (Thoemen, 2010).

Saplāksnim kā materiālam anizotropās izmēru izmaiņas ir nelielas, vismaz plāksnes platuma un garuma virzienā. Saplākšņa trūkums, ja tas tiek pakļauts augstam relatīvajam mitrumam vai biežām mitruma svārstībām (piemēram, atmosfēras iedarbības dēļ), ir tā tieksme uzbriest biezumā. Atšķirībā no masīvkoksnes, saplākšņa izmēru izmaiņas sastāv no divām daļām – atgriezeniskas un neatgriezeniskas. Atgriezeniskā sastāvdaļa ir saistīta tikai ar izejmateriāla higroskopiskajām īpašībām, savukārt neatgriezenisko komponenti var attiecināt uz ražošanas procesu (Thoemen, 2010).

Uzbriešana biezumā negatīvi ietekmē ne tikai plātnes izskatu, bet arī samazina tās mehāniskās īpašības. Ja iekšējo spriegumu uzkrāšanās pārsniedz saistvielu (līmējuma) izturību starp daļiņām, samazinās iekšējā saites izturība. Mitrināšanas rezultātā koksnē veidojas ļoti augsti spriegumi, kurus neviena līme nespēj ilgstoši izturēt. Tādēļ saplākšņa uzbriešanas stāvoklī līmes savienojumi tiek bojāti, pārrauti, vai vismaz tiek pakļauti būtiskam spriegumam. Lai samazinātu saplākšņa uzbriešanu biezumā, var mainīt koksnes higroskopiskās īpašības. Pastāv divi galvenie modificēšanas virzieni: modificēt izejmateriālu pirms presēšanas vai veikt jau izveidotas plātnes modificēšanu (Thoemen, 2010).

Bērza saplāksnis ir viens no izturīgākajiem un visplašāk izmantotajiem koksnes kompozītmateriāliem, pateicoties tā blīvumam (Cordier et al., 2025), vienmērīgajai struktūrai un augstajai mehāniskajai izturībai. Tas tiek ražots, līmējot vairākas bērza finiera kārtas ar šķiedru virzieniem, kas mainās katrā slānī, kas nodrošina materiālam augstu stabilitāti un

noturību pret deformācijām. Šāda struktūra piešķir saplāksnim līdzīgu izturību gan garenvirzienā, gan šķērsvirzienā. Bērza saplākšņa lieces stiprība var sasniegt 100 MPa un elastības modulis – ap 10 000 MPa. Šīs īpašības ir būtiski labākas nekā skujkoku saplāksnim, kas ir mīkstāks un mazāk izturīgs (Kral & Hrazsky, 2006).

Papildus augstajai mehāniskajai izturībai bērza saplāksm piemīt arī ar laba skrūvju un stiprinājumu noturība (Hoffmeyer & Munch-Andersen, 2024), augsta triecienizturība un izturība pret plaisāšanu. Tā viendabīgā struktūra ļauj to precīzi apstrādāt un frēzēt bez šķembām. Turklāt tas saglabā savas īpašības arī mitruma ietekmē, īpaši, ja tiek izmantots ar ūdensizturīgu līmi ražots saplāksnis (3. lietojuma klase pēc EN 314-2:1993 standarta).

Saplākšņa novecināšanās ārējo faktoru ietekmē ir cieši saistīta ar klimatisko apstākļu iedarbību uz tiem. Galvenie faktori ir mitrums, ultravioletie (UV) stari, temperatūras svārstības un mikroorganismu iedarbība. Pat mitrumizturīgam saplāksnim ilgstoša ārējā iedarbība bez pienācīgas aizsardzības var izraisīt degradāciju, piemēram, finieru atslāņošanos, koksnes šķiedru uzbriešanu vai krāsas izbalēšanu. Saules UV starojums īpaši ietekmē virsējo finiera kārtu, padarot to trauslāku un veicinot lignīna noārdīšanos. Termiski modificēta koksne saules un UV starojuma ietekmē zaudē brūno krāsu un kļūst pelēka, turklāt šis pelēkais tonis ir viendabīgāks nekā termiski nemodificētai koksnei (Rajković & Miklečič, 2018).

Temperatūras un mitruma cikliskā maiņa (diennakts un sezonālā) izraisa koksnes izplešanos un saraušanos, kas ar laiku var radīt mikroplaisas saplākšņa virsmā un savienojumos. Ja saplāksnis netiek aizsargāts ar ūdensizturīgiem pārklājumiem, mitrums var iekļūt finiera starpslāņos, izraisot līmes savienojuma vājināšanos jeb delamināciju. Šādos apstākļos saplāksnis pakāpeniski zaudē savu mehānisko stabilitāti un noturību pret slodzi (Forest Service & Products Laboratory, 2010).

Bioloģiskie faktori, piemēram, pelējuma sēnes, zilējums un trupes veidošanās, arī veicina bērza saplākšņa novecošanu, īpaši gadījumos, kad materiāls ilgstoši atrodas mitrā vai slikti ventilētā vidē. Lai paildzinātu saplākšņa kalpošanas ilgumu ārā, to ieteicams apstrādāt ar aizsarglīdzekļiem — antiseptiķiem, mitrumizturīgām krāsām vai fenola plēvēm. Tāpat svarīgi ir pareizi veidot konstrukciju, nodrošinot ventilāciju un aizsardzību pret tiešu ūdens iedarbību (Hill, 2006).

Saplāksnis, tai skaitā bērza saplāksnis, kā koksnes kompozītmateriāls ir organisks un degošs, taču tā uzvedību uguns ietekmē var būtiski ietekmēt gan struktūra, gan pielietotie aizsarglīdzekļi. Neapstrādāts saplāksnis nav ugunsizturīgs – tas sāk pārogļoties aptuveni pie 200 līdz 250 °C, un pilnvērtīga sadegšana var notikt pie temperatūrām virs 400 °C. Degšanas laikā saplāksnis izdala siltumu, dūmus un potenciāli arī toksiskas vielas, kas saistītas ar saplākšņa ražošanā izmantotajām līmēm (Forest Service & Products Laboratory, 2010). Tomēr bērza saplākšņa ugunsizturību var uzlabot, to impregnējot ar ugunsreakciju kavējošiem līdzekļiem.

Bērza saplāksnim ir labas akustiskās īpašības, kas padara to piemērotu dažādiem lietojumiem, kur nepieciešama skaņas kontrole, piemēram, mēbelēs, akustiskajās sienās, skatuvju konstrukcijās un mūzikas instrumentu ražošanā. Tā augstā blīvuma (~650 līdz 750 kg m^{-3}) un viendabīgās struktūras dēļ saplāksnis labi atstaro skaņu, padarot to piemērotu skaņas pastiprināšanai, nevis absorbcijai (Forest Service & Products Laboratory, 2010).

Lai uzlabotu saplākšņa skaņas absorbciju, to nereti perforē vai kombinē ar skaņu absorbējošiem materiāliem, piemēram, minerālvati vai akustiskām membrānām. Šādi paneļi var sasniegt skaņas absorbcijas koeficientus līdz 0.8 noteiktās frekvencēs, padarot tos efektīvus telpu akustikas uzlabošanā – koncertzālēs, birojos un sabiedriskās ēkās (Negro et al., 2015). Tāpēc bērza saplāksnis ir daudzpusīgs materiāls, ko var pielāgot gan skaņas atstarošanai, gan absorbcijai atkarībā no konstrukcijas.

Bērza saplāksnim, tāpat kā citiem koksnes kompozītmateriāliem, ir mērenas siltumizolācijas īpašības, kas izriet no tā koksnes struktūras un blīvuma. Bērza saplākšņa siltumvadītspējas koeficients (λ) parasti ir robežās 0.13 līdz 0.17 W $m^{-1} \cdot K^{-1}$, atkarībā no

blīvuma, mitruma un virsmas apstrādes (Forest Service & Products Laboratory, 2010). Samērā augsta blīvuma dēļ (~650 līdz 750 kg m $^{-3}$) bērza saplāksnis labāk vada siltumu, salīdzinot ar mīkstākiem kokmateriāliem. Tāpēc to reti izmanto kā primāro siltumizolācijas materiālu. Tomēr tā formas stabilitāte un zema gaisa caurlaidība padara saplāksni par piemērotu palīgmateriālu siltināšanas slāņos, piemēram, konstrukcijas daļu ventilējamās fasādēs vai grīdās virs izolācijas. Šajās konstrukcijās saplāksnis palīdz novērst siltuma tiltu veidošanos un mehānisku deformāciju (Forest Service & Products Laboratory, 2010).

Turklāt bērza saplāksnim ir labs siltuma inerces efekts – tas uzsilst un atdziest pakāpeniski, līdz ar to palīdz stabilizēt iekštelpu mikroklimatu. Tā siltumizolācijas īpašības var uzlabot, kombinējot to ar citiem izolējošiem materiāliem vai veicot īpašu apstrādi (piemēram, laminēšanu ar siltumu atstarojošu plēvi). Tomēr kā patstāvīgs siltumizolācijas materiāls saplāksnis nav pietiekami efektīvs, ja mērķis ir energoefektivitāte ēku norobežojošajās konstrukcijās.

1.6. Saplākšņa ražošanā izmantotās līmes

Saplākšņa līmēšana ir process, kurā koksnes finiera loksnes tiek savstarpēji perpendikulāri salīmētas, veidojot izturīgu un daudzslāņu materiālu. Saplāksnis ir ļoti populārs materiāls celtniecībā un mēbeļu ražošanā, jo tas apvieno koksnes dabisko izskatu ar lielāku izturību un stabilitāti. Finieru līmēšanai var izmantot daudz un dažādas līmes. Vēsturiski pirmās līmes – no asinīm un kazeīna, bet pēc 1960. gada uz dabas vielām bāzētās līmes izkonkurēja daudz lētākās un efektīvākās no naftas ražotās līmes (Papadopoulou & Chrissafis, 2011), tādas kā fenola- formaldehīda līme (Bastani et al., 2016; Xiong et al., 2023), urīnvielas-formaldehīda līme (Bekhta et al., 2023), melamīna-urīnvielas-formaldehīda līme (Zanuttini et al., 2020) un poliuretāna līme (Shirmohammadli et al., 2023). Līmju salīdzinājums dots 1.5. tabulā.

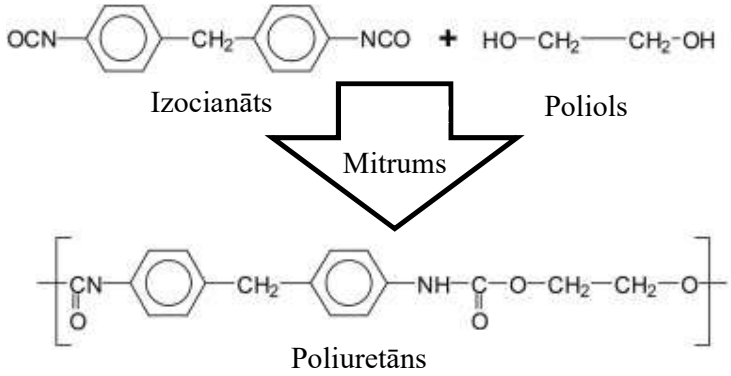
1.5 tabula

Saplākšņa ražošanā lietoto līmju salīdzinājums

Fenola-formaldehīda līme (FF):	**Urīnvielas-formaldehīda līme (UF)**	**Melamīna- urīnvielas-formaldehīda līme (MUF)**:	**Poliuretāna līme (PU)**:
Šī līme nodrošina augstu ūdens un siltuma izturību, padarot to piemērotu lietošanai āra apstākļos un konstrukcijām, kur nepieciešama augsta izturība pret mitrumu.	Šī ir ekonomiskāka līme, kas bieži tiek izmantota iekštelpu saplākšņa ražošanā. Tā nodrošina labu saķeri, bet ir mazāk izturīga pret mitrumu.	Šī līme nodrošina augstu izturību un ir piemērota gan iekštelpu, gan lietošanai ārā, jo tā ir izturīga pret mitrumu un karstumu, taču ir salīdzinoši dārgāka nekā UF un PF.	Šī līme ir elastīga un nodrošina lielisku izturību pret mitrumu un temperatūras svārstībām. Tā ir piemērota speciāliem lietojumiem, kur nepieciešama augsta izturība un elastība. Plaši izmantota konstrukciju koksnes līmēšanai.
Līmes patēriņš: 180 līdz 250 g·m^{-2}; presēšanas temperatūra: 130 līdz 160 °C; presēšanas laiks: 6 līdz 15 minūtes (Pizzi & Mittal, 2003)	Līmes patēriņš: 140 līdz 200 g·m^{-2}; presēšanas temperatūra: 100 līdz 120 °C; presēšanas laiks: 4 līdz 8 minūtes (Pizzi & Mittal, 2003)	Ar MUF līmētam saplāksnim, salīdzinot ar PF līmētu saplāksni, nepieciešama zemāka temperatūra un īsāks presēšanas laiks, lai panāktu labāku saistīšanos. Līmes patēriņš: 160 līdz 220 g·m^{-2} presēšanas temperatūra:	Parasti vienkomponenta PUR līmju patēriņš ir 100 līdz 180 g·m^{-2} presēšanas laiks ir aptuveni 25 līdz 120 minūtes, pielietotais spiediens ir 0.6 līdz 1 MPa robežās, un līme sacietē apkārtējās vides temperatūrā.(Pizzi & Mittal, 2003)

Fenola-formaldehīda līme (FF):	Urīnvielas-formaldehīda līme (UF)	Melamīna- urīnvielas-formaldehīda līme (MUF):	Poliuretāna līme (PU):
		110 līdz 130 °C, presēšanas laiks: 4 līdz 10 minūtes.(Pizzi & Mittal, 2003)	

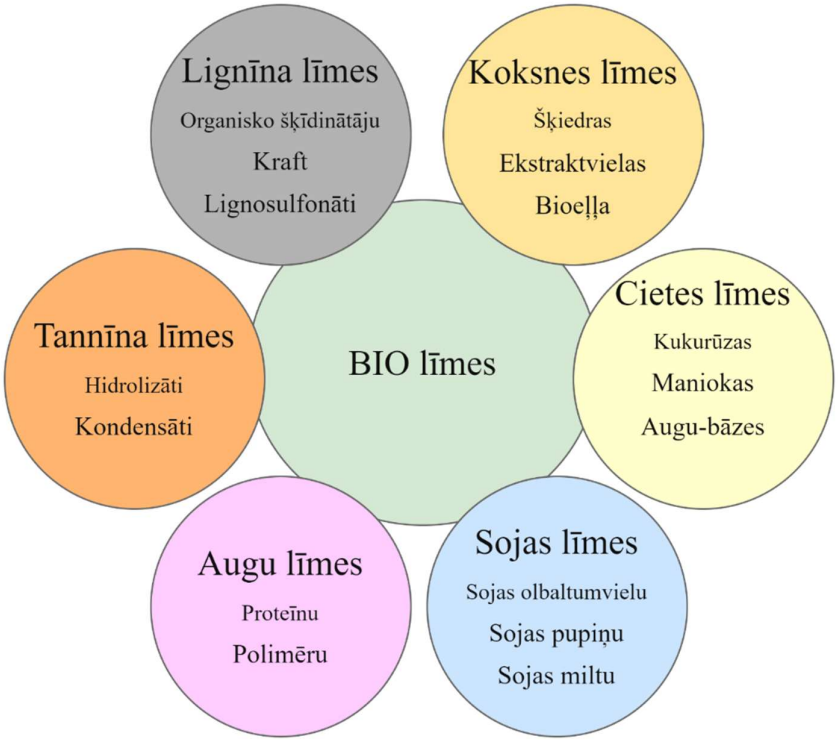
FF, MUF un UF līmju trūkums ir sastāvā esošais formaldehīds, kas var izdalīties apkārtējā vidē un ir kancerogēns (Mondal et al., 2024). PU nesatur formaldehīdu un tā cietēšanai nav nepieciešama paaugstināta temperatūra, taču ir nepieciešams noteikts mitruma līmenis (Shirmohammadli et al., 2023). Poliuretānu līmes veidojas reaģējot izocianātam ar poliolu (skat. 1.10. att.) (Shirmohammadli et al., 2023).



1.10. att. **Vienkomponenta poliuretāna līmes**

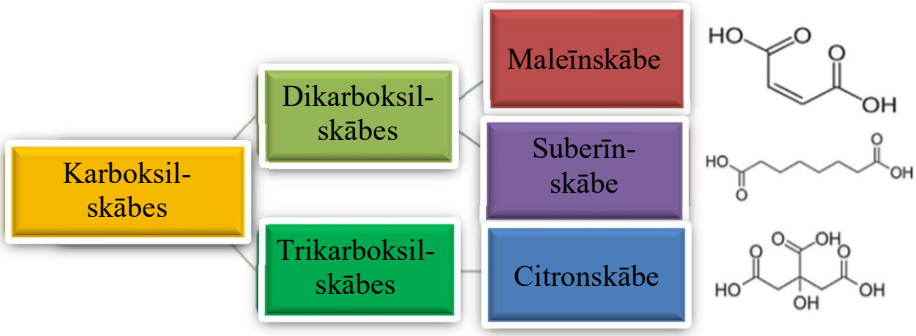
Autora Masoumi pētījumā (Masoumi et al., 2023) par saplākšņa līmēšanas procesu un to, kā izmantotā līme ietekmē galaprodukta īpašības, noskaidrots, ka būtiski ir tādi faktori kā līmes tips, izmantotās koksnes suga, virsmas kvalitāte, spiediens un sacietēšanas apstākļi, tāpēc līmes izvēle ir atkarīga no saplāksnim paredzētā pielietojuma un nepieciešamajām īpašībām.

Šobrīd arvien populārākai kļūstot "zaļajai" ķīmijai, pētījumos notiek jaunu, videi draudzīgu, no atjaunojamiem resursiem radītu līmju izstrāde, kas attēlota 1.11. att. (Arias et al., 2021).



1.11. att. **Biolīmju iedalījums**

Līme no suberīnskābes uzskatāma par koksnes ekstraktvielu līmi (skat. 1.12. att.) (Hussin et al., 2022). Tā ir viena no koksnes karboksilskābēm, līdzīgi kā maleīnskābe un citronskābe, kas arī tiek izmantotas koksnes kompozītu līmju veidošanai.



1.12. att. **Karboksilskābju iedalījums**

Līdz ar to tā potenciāli būtu piemērojama masīvkoksnes līmēšanai. Tomēr šī apgalvojuma pierādīšanai ir nepieciešami papildus pētījumi.

1.7. Produkta dzīves cikls

Dzīves cikla novērtējums (Life Cycle Assessment – LCA) ir sistemātiska metode, ko izmanto, lai novērtētu produkta vai pakalpojuma ietekmi uz vidi visā tā dzīves ciklā – no izejvielu ieguves līdz utilizācijai. Tas palīdz pieņemt videi draudzīgākus lēmumus produktu

izstrādē, ražošanā un patēriņā. Dzīves cikla novērtējuma veikšanu regulē dažādi standarti. LCA tiek veikts saskaņā ar starptautiskajiem standartiem:

- ISO 14040:2006 apraksta LCA principus un struktūru;
- ISO 14044:2006 apraksta prasības un detalizētu metodoloģiju LCA veikšanai;
- ISO 14025:2006 savukārt nosaka produktu vides deklarācijās (EPD) iekļaujamo informāciju.

LCA ir četri galvenie posmi:

1. **Mērķa un tvēruma noteikšana**:
    a. kas tiek novērtēts?
    b. kādam nolūkam?
    c. kāda ir sistēmas robeža?
2. **Dzīves cikla inventarizācija:** datu vākšana par sistēmā ieejošām (izejvielas, enerģija) un izejošām (emisijas, atkritumi) plūsmām.
3. **Dzīves cikla ietekmes uz vidi novērtējums** ietekmes kategorijās:
    a. klimata pārmaiņas,
    b. ūdens izmantošana,
    c. ekotoksicitāte u. c.
4. **Iegūto datu interpretācija:** datu analīze, secinājumi un iespējamie uzlabojumi.

Pasaulē palielinoties pieprasījumam pēc saplākšņa materiāliem, lielākais saplākšņa apjoms ir saražots Ķīnā. Jia pētījumā (Jia et al., 2019) apskatīts nemodificētas papeles saplākšņa dzīves cikls, kā funkcionālo vienību lietojot 1 m^3, un apskatot saplākšņa ražošanu no šūpuļa līdz rūpnīcas vārtiem (cradle to gate). Izmantotā līme – melamīna formaldehīda. Izvēlētās ietekmes uz vidi kategorijas: abiotiskā noplicināšanās (ADP); paskābināšanās potenciāls (AP); pirmējās enerģijas noplicināšanās (PED); saldūdens eitrofikācija (EP); globālās sasilšanas potenciāls (GWP) un daļiņu skaits (RI). Ietekmes uz vidi novērtēšanas metode – CML 2 baseline 2000 v2.4. Ietekmes uz vidi novērtējuma rezultātus var redzēt 1.6. tabulā.

1.6. tabula

Nemodificēta papeles saplākšņa ietekmes uz vidi novērtējums

Ietekmes uz vidi kategorija	Mērvienība	Vērtība
ADP	kg antimonija ekviv.	2.9×10^{-1}
EP	kg PO_4^{3-}ekviv.	3.32×10
RI	kg PM2.5 ekviv.	3.43×10
AP	kg SO_2 ekviv.	1.38×10^2
GWP	kg CO_2 ekviv.	1.88×10^4
PED	MJ	9.85×10^6

Termiski modificētas koksnes dzīves cikla novērtējumu savā apskatrakstā ir pētījis Candelier (Candelier & Dibdiakova, 2021). Gaistošie organiskie savienojumi un savienojumi, kas sastopami termiskās modifikācijas procesa notekūdeņos un rodas termiskās koksnes rašanās procesā, ir spirti (metanols), organiskās skābes (etiķskābe, skudrskābe, levulīnskābe), terpēni (α-pinēns, β-pinēns, limonēns), fenoliskie savienojumi (gvajakols, siringiladehīds, vanilīns, eigenols), aldehīdi, ketoni un furāni (furfurols, metilfurfurols, fomaldehīds).

Arī suberīna un betulīna ražošanas procesa ietekme uz vidi ir pētīta Yadav un līdzautoru pētījumā (Yadav et al., 2024). Funkcionālā vienība – 1 kg suberīna, kas kopā veido 2.06 kg polimēra, kur 1.06 kg ir betulīns. Abi polimēri tiek iegūti vienā procesā. Ietekmes uz vidi novērtēšanai ir izmantota ReCiPe 2016 Midpoint (H) metode un sistēmas tvērums ir no šūpuļa līdz rūpnīcas vārtiem. Kopā pētījumā apskatīti 3 dažādi scenāriji, kas atšķiras ar enerģijas un

bērza tāss ietekmes uz vidi aprēķinu. 1.7. tabulā ir redzami rezultāti bāzes scenārijam tādās ietekmes uz vidi kategorijās kā globālās sasilšanas potenciāls (GWP), jonizējošās radiācijas potenciāls (sīko daļiņu formēšanās potenciāls (FPMP) un zemes paskābināšanās potenciāls (TAP).

1.7. tabula

Suberīna ražošanas procesa ietekme uz vidi

Ietekmes uz vidi kategorija	Mērvienība	Vērtība
GWP	kg CO_2 ekviv.	13.72
IRP	kBq $Co-60$ekviv.	16.5
FPMP	kg PM2.5 ekviv.	2.38×10^{-2}
TAP	kg SO_2 ekviv.	6.95×10^{-2}

Kā redzams iepriekšējos divos pētījumos, iespējamo ietekmes uz vidi kategoriju un mērvienību klāsts ir plašs. Lai produktus varētu savstarpēji salīdzināt, ir pieņemti vienoti principi – produktu kategorijas noteikumi, kā jāveic dzīves cikls un kādi dati ir jāataino produkta vides deklarācijā. Būvizstrādājumiem produkta kategorijas noteikumu funkciju veic standarts EN 15804+A2:2020.

Šis Eiropas standarts nosaka, ka būvizstrādājumu produktu vides deklarācijās ir nepieciešams iekļaut moduļus A1-A3 (no šūpuļa līdz rūpnīcas vārtiem), C1-C4, kas attiecas uz dzīves cikla beigu fāzi, un D, kas attiecas uz sistēmas ieguvumiem no biogēnā oglekļa. Šim aprēķinam jābalstās uz deklarēto vienību.

Sīkāk moduļi tiek iedalīti:

A1 - izejmateriālu ieguve un apstrāde;
A2 - izejmateriālu transports līdz ražotājam;
A3 - ražošanas process;
A4 - transports līdz būvobjektam;
A5 - iebūvēšana;
B1 - produkta lietošana;
B2 - uzturēšana/apkope;
B3 - labošana;
B4 - aizstāšana;
B5 - renovācija;
C1 - nojaukšana;
C2 - transports līdz atkritumu apsaimniekošanai;
C3 - atkritumu apstrāde atkārtotai lietošanai, materiālu atgūšanai vai reciklēšanai;
C4 - atkritumu apglabāšana;
D - atkārtotas izmantošanas, resursu atgūšanas un pārstrādes potenciāls, novērtēts pēc neto ietekmes un ieguvumiem.

Šajā standartā noteikts, ka koksnes materiāliem deklarētā vienība ir izsakāma tilpumvienībās (1 m^3). C pielikumā definēti galvenie ietekmes uz vidi rādītāji un to mērvienības. (skat. 1.8. tabulu).

1.8.tabula

Ietekmes uz vidi kategorijas būvizstrādājumiem

Ietekmes uz vidi kategorija	Rādītājs	Mērvienība
Klimata pārmaiņas- kopējās	Kopējais globālās sasilšanas potenciāls (GWP-total)	kg CO_2 ekviv.
Klimata pārmaiņas- fosilās	Fosilo degvielu globālās sasilšanas potenciāls (GWP-fossil)	kg CO_2 ekviv.

1.8.tabulas nobeigums

Ietekmes uz vidi kategorija	Rādītājs	Mērvienība
Klimata pārmaiņas-biogēnās	Biogēnais globālās sasilšanas potenciāls (GWP-biogenic)	kg CO_2 ekviv.
Klimata pārmaiņas – zemes izmantošana un zemes izmantošanas maiņa	Globālās sasilšanas potenciāls – zemes izmantošana un zemes izmantošanas maiņa (GWP-luluc)	kg CO_2 ekviv.
Ozona noārdīšanās	Stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls (ODP)	kg CFC 11 ekviv.
Paskābināšanās	Paskābināšanās potenciāls, uzkrātais piesārņojuma normu pārsniegums (AP)	mol H^+ ekviv.
Saldūdens eitrofikācija	Eitrofikācijas potenciāls, barības vielu daļa, kas nonāk saldūdeņos (EP-freshwater)	kg PO_4 ekviv.
Sālsūdens eitrofikācija	Eitrofikācijas potenciāls, barības vielu īpatsvars, kas sasniedz saldūdens vides gala posmu (EP-marine)	kg N ekviv.
Sauszemes eitrofikācija	Eitrofikācijas potenciāls, uzkrātais piesārņojuma normu pārsniegums (EP-terrestrial)	mol N ekviv.
Fotoķīmiskā ozona veidošanās	Troposfēriskā ozona veidošanās potenciāls (POCP)	kg NMVOC ekviv.
Neatjaunojamo resursu izsīkšana – minerāli un metāli	Neatjaunojamo un ne fosilo resursu izsīkšanas potenciāls (ADP minerals&metals)	kg Sb ekviv.
Neatjaunojamo resursu izsīkšana – fosilās degvielas	Neatjaunojamo resursu izsīkšanas potenciāls fosilajiem resursiem (ADP-fossil)	MJ, zemākā siltumspēja
Ūdens lietošana	Ūdens trūkuma potenciāls, ņemot vērā ūdens pieejamību reģionā (WDP)	m^3 pasaules trūkuma ekviv.

Divi lielākie saplākšņa ražotāji Latvijā – SIA Stiga RM (SR) un A/S "Latvijas Finieris" (LF) ir izstrādājuši produkta dzīves deklarāciju (EPD) nemodificētam bērza saplāksnim, balstoties uz šiem produktu kategorijas noteikumiem (Buro Veritas Latvia. SIA, 2024; Zudrags, 2024). Ietekmes uz vidi novērtējuma rezultāti redzami 1.9. tabulā.

1.9.tabula.

Nemodificēta bērza saplākšņa ietekme uz vidi

Ietekmes uz vidi kategorija	Mērvie-nība	A1-A3		C1-C4		D	
		SR	LF	SR	LF	SR	LF
GWP-total	kg CO_2 ekviv.	-7.50E+02	-8.60E+02	1.10E+03	1.43E+03	-5.26E+02	-2.80E+02
GWP-fossil	kg CO_2 ekviv.	3.64E+02	3.10E+02	1.55E+01	2.18E+02	-5.24E+02	-2.80E+02
GWP-biogenic	kg CO_2 ekviv.	-1.12E+03	-1.20E+03	1.08E+03	1.20E+03	-1.19E+00	-7.80E-01
GWP-luluc	kg CO_2 ekviv.	3.24E+00	7.70E+00	5.47E-04	1.40E-02	-3.40E-01	-3.30E-01
ODP	kg CFC-11 ekviv.	2.49E-05	1.80E-05	2.50E-07	1.01E-06	-4.53E-06	-9.10E-06

1.9.tabulas nobeigums

Ietekmes uz vidi kategorija	Mērvie-nība	A1-A3		C1-C4		D	
		SR	LF	SR	LF	SR	LF
AP	mol H^+ ekviv.	1.79E+00	1.90E+00	7.76E-02	4.94E-01	-3.77E+00	-7.30E-01
EP-freshwater	kg P ekviv.	4.00E-02	1.00E-01	5.29E-04	5.82E-04	-3.07E-02	-1.30E-02
EP-marine	kg N ekviv.	4.34E-01	7.70E-01	2.56E-02	2.43E-01	-4.45E-01	-1.20E-01
EP-terrestrial	mol N ekviv.	4.59E+00	7.70E+00	2.66E-01	2.56E+00	-5.20E+00	-1.40E+00
POCP	kg NMVOC ekviv.	2.12E+00	2.40E+00	9.37E-02	6.63E-01	-1.64E+00	-5.70E-01
ADP-minerals&metals	kg Sb ekviv.	3.52E-03	1.00E-04	3.53E-05	3.70E-06	-2.95E-04	-9.10E-06
ADP-minerals&metals	kg Sb ekviv.	3.52E-03	1.00E-04	3.53E-05	3.70E-06	-2.95E-04	-9.10E-06
ADP-fossil	MJ	7.67E+03	5.60E+03	2.67E+02	5.73E+02	-6.42E+03	-5.30E+03
WDP	m^3	2.87E+02	2.20E+01	3.49E+00	4.23E+00	-8.13E+01	-3.40E+01

Protams, jāņem vērā, ka šie aprēķini veikti gadu desmitiem optimizētam rūpnieciskam procesam, kamēr jaunam un laboratorijas izmēra procesam optimizācija vēl nav veikta.

Vēl viena no ietekmes uz vidi novērtējuma metodēm ir ReCiPe. Tā ir metode ietekmes uz vidi novērtēšanai (LCIA) dzīves cikla analīzē (LCA). Dzīves cikla ietekmes novērtējums (LCIA) pārvērš emisijas un resursu izmantošanu ierobežotā skaitā ietekmes uz vidi rādītāju, izmantojot koeficientus. Ir divas galvenās pieejas šo koeficientu noteikšanai: starpposma (midpoint) līmenī un galapunkta (endpoint) līmenī.

ReCiPe aprēķina 18 starpposma rādītājus un 3 galapunkta rādītājus.

Starpposma rādītāji koncentrējas uz atsevišķām vides problēmām, piemēram, klimata pārmaiņām vai vides paskābināšanos, taču galapunkta rādītāji parāda ietekmi uz vidi tādās trīs augstāka līmeņa agregācijas kategorijās kā ietekme uz cilvēku veselību, ietekme uz bioloģisko daudzveidību un resursu trūkums. Starpposmu pārvēršana galapunktos vienkāršo rezultātu interpretāciju. Tomēr ar katru papildu agregācijas soli rezultātos palielinās nenoteiktība (https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe). ReCiPe metodē burti I, H un E apzīmē dažādus skatījumus (perspektīvas) uz dzīves cikla ietekmes novērtējumu.

I (Individualist) – indivīda perspektīva, kas:

- ir īstermiņa skatījums;
- balstās uz to, kas ir zinātniski pierādīts un mazāk riskants;
- pieņem optimistiskus scenārijus par tehnoloģiju attīstību nākotnē.

H (Hierarchist) – hieriarhiskā perspektīva, kas:

- tiek uzskatīta par vidējo jeb noklusējuma pieeju;
- balstās uz starptautiski pieņemtām nostādnēm (piem., IPCC klimata modeļiem);
- izvērtē vidēja termiņa laika horizontu.

Šī perspektīva tiek uzskatīta par visbiežāk izmantoto un līdzsvarotāko, izmantota arī šajā darbā.

E (Egalitarian) – egaliskā perspektīva, kas:

- ir ilgtermiņa skatījums (vairākus simtus gadu);
- ietver arī nenoteiktākas, bet iespējamās nākotnes ietekmes;
- pieņem piesardzības principu – ja pastāv potenciāls risks, tas tiek ņemts vērā.

2. MATERIĀLI UN METODES

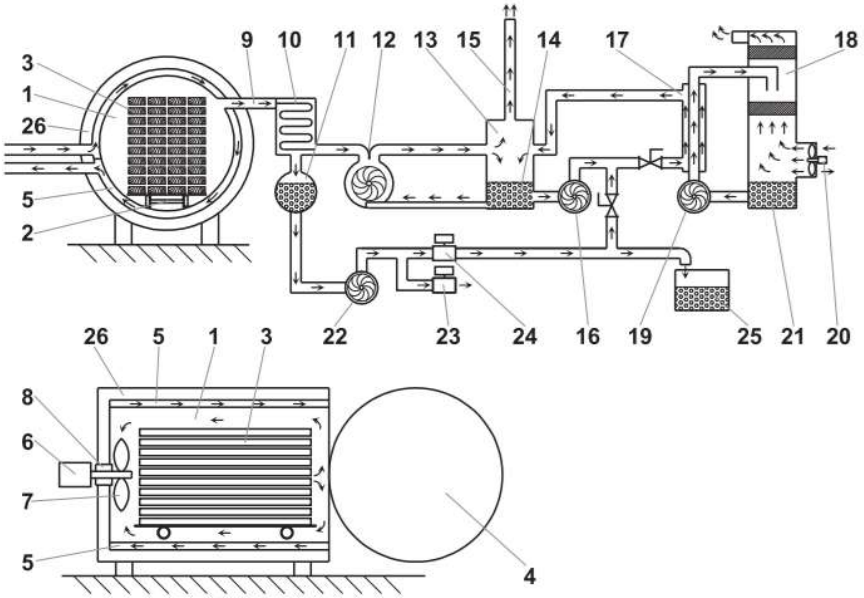
2.1. Finieru izgatavošana, atlase un termiskā modifikācija

Eksperimentu 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 “Riga Veneer”, un papeles (*Populus x canadensis* Moench) 1.5 mm biezi finieri, kas sagatavoti “Toro Compensanti” rūpnīcā Itālijā. Izmantotais izejmateriāls – finieris, raksturo materiālu, kāds reāli ir pieejams ražošanā. Pārbaudēm un paraugu izgatavošanai izvēlēti finieri bez redzamām koksnes vainām un ražošanas defektiem.

2.1.1. Termiskā modifikācija Termovouto procesā

Termo–vakuuma tehnoloģija jeb termiskā modifikācija vakuumā (VT) (Allegretti et al., 2012; Sandak, Sandak, Cuccui, et al., 2015) 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.

(Sandak, Sandak, & Allegretti, 2015) Termiskā modifikācija vakuumā veikta iekārtā, kas izveidota BioEconomy-IBE, laboratorijā Itālijā, sadarbībā ar WDE-Maspell uzņēmumu, un ir balstīta uz standarta vakuumžāvēšanas krāsni, kas tiek sildīta ar diatermisko eļļu. Iekārta paredzēta darbam augstā temperatūrā (līdz 250 °C). Iekārtas shēma redzama 2.1. attēlā (Sandak, Sandak, & Allegretti, 2015).



2.1. att. **Vakuuma termiskās modifikācijas iekārtas tehnoloģiskā shēma:**
1 – apstrādes kamera, vakuumciešs autoklāvs, kas veidots no nerūsējošā tērauda cilindra ar diametru 1.7 m; 2 - iekraušanas vagonete; 3 – 1 m^3 modificējamās koksnes; 4 – vakuumu nodrošinošas durvis; 5 – apsildes sistēma – diatermiskā eļļa, kas cirkulē dubultajā apvalkā. Eļļas sildītājs, sūknis un kontrole novietota iekārtas iekšpusē, tuvu iekšējai sienai (nav attēloti shēmā); 6 - ventilācijas sistēmas elektromotors 4 kW; 7 – ventilācijas sistēmas ventilatori (ātrums 1930 rpm, plūsma 1 m^3 s^{-1}, statiskais spiediens 50 Pa pie 200 °C 100 mbar); 8 – mehāniskā blīve; 9 – iesūkšanas caurule; 10 – kondensators; 11 – kondensētu tvaiku uztveres tvertne; 12 – ūdens gredzena vakuuma sūknis (3,6 kW, 50 mbar spiediens); 13 – reciklētā ūdens rezervuārs; 14 – vakuumsūknis; 15 – gāzu novadīšanas caurule; 16 – pārstrādes sūknis; 17 – ūdens – ūdens mainis; 18 – iztvaikošanas tornis; 19 – torņa ūdens cirkulācijas sūknis; 20 – atdzesēšanas ventilators; 21 – aukstā ūdens uzglabāšanas tvertne; 22 – ūdens sūknis; 23, 24 – elektropneimatiskie vārsti; 25 – kondensāta uzkrāšanas tvertne; 26 – termiskās izolācijas apvalks

Finieru sildīšana notiek konvektīvi caur alumīnija plāksnēm (skat. 2.1. att.). Kopējais modifikācijas laiks 13 līdz 24 stundas. Šis termiskās apstrādes veids veikts visu trīs sugu finieriem piecos modifikācijas režīmos (skat. 2.1. tabulu). 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, termiskās modifikācijas laiku un temperatūru aprēķinot pēc 2.1. vienādojuma (Allegretti et al., 2020).

$$ML(T_t, t) = K_{H^*} \int_{t_0}^{t_f} (T_t - T_0)_+^q dt^p \qquad (2.1.)$$

kur ML – masas zudumi;

K_H–reakcijas ātruma konstante, °C·h^{-1};

T–termiskās apstrādes temperatūra, °C;

t–termiskās apstrādes laiks, h;

p–laika parametra raksturlielums, h;

q–temperatūras raksturlielums, °C;

t_0-sākotnējais laiks, h;

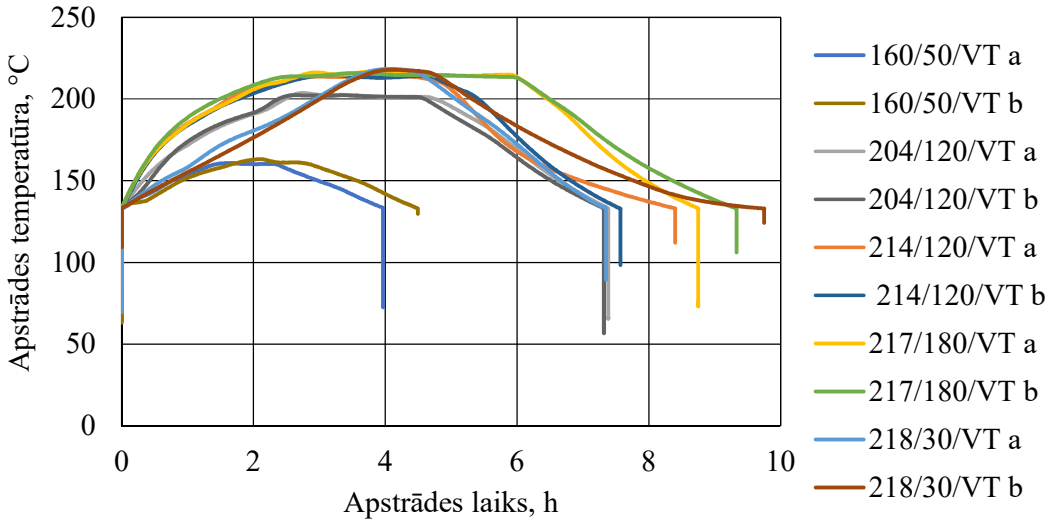
T_0-temperatūra, virs kuras sākas masas zudumi, °C.

2.1. tabula

VT modifikācijas režīmi

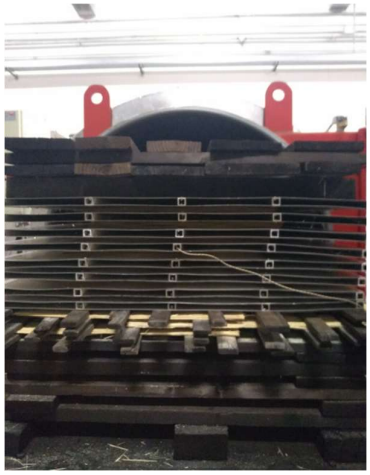
Režīms	Temperatūra (°C)	Apstrādes laiks (min)
160/50/VT	160	50
204/120/VT	204	120
214/120/VT	214	120
217/180/VT	217	180
218/30/VT	218	30

Modificējot temperatūras paaugstināšanas ātrums ir nedaudz atkarīgs no termiskās apstrādes maksimālās temperatūras 0.8 °C min^{-1} 204/120; 1.08 °C min^{-1} 214/120; 1.07 °C min^{-1} 217/180; 0.40 °C min^{-1} 218/30. 2.2. attēlā ir redzami VT termiskās modifikācijas režīmu grafiki temperatūrā virs 130 °C. Iepriekš eksperimentos noskaidrots, ka, izmantojot šo apstrādes metodi, temperatūrās zem 130 °C koksnē nenotiek nekādas pārmaiņas (Allegretti et al., 2020), tāpēc laiks, kas ir zem šīs temperatūras tiek pieņemts par nulli.



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

Finieru pakas biezums 6 līdz 10 loksnes. Modificēto finieru izmēri (platums × garums × biezums): 600 × 600 × 1.5 mm papelei un bērzam, 600 × 600 × 2.5 mm apsei. VT termiskās apstrādes iekārta ir skatāma 2.3. attēlā.



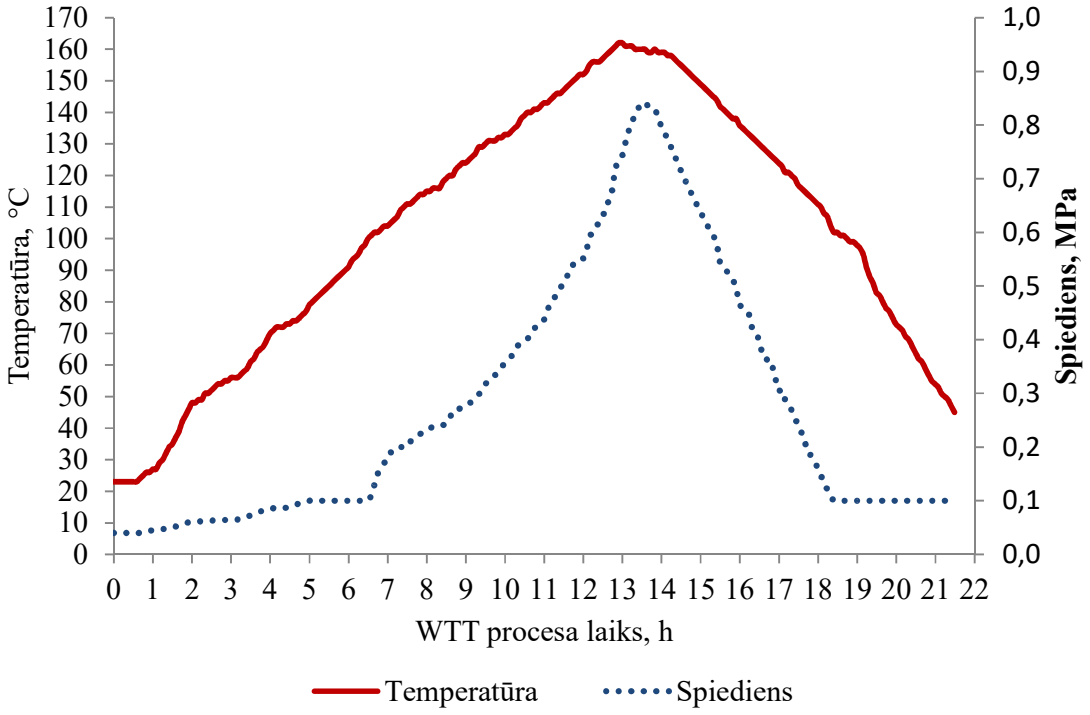
2.3. att. **Finieri starp alumīnija plāksnēm modificēšanai VT procesā**

Katrā režīmā no katras koku sugas apstrādāti 40 finieri. Un pēc apstrādes nosūtīti uz LBTU Būvniecības un kokapstrādes institūta telpām kondicionēšanai standartapstākļos 20 °C ar 65% relatīvo gaisa mitrumu.

2.1.2. Termiskā modifikācija WTT procesā

Koksnes termiskā modifikācija paaugstināta mitruma apstākļos – ūdens tvaika vidē veikta Wood Thermal Technology (WTT) iekārtā (Grīniņš Juris, 2016) 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 26 līdz 27 stundas. Līdz 100 °C temperatūras celšanas ātrums ir 0.16 līdz 0.22 °C minūtē, savukārt no 100 °C līdz maksimālajai temperatūrai temperatūras celšanas ātrums ir lēnāks 0.12 līdz 0.16 °C min^{-1}. Finieru pakas biezums 10 plāksnes, kopējais paraugu skaits 60 plāksnes. Apses finieru plākšņu izmērs 290 × 290 × 2.5 mm, bērza finiera lokšņu izmērs 1000 × 350 × 1.5 mm, papeles finiera lokšņu izmērs 600 × 300 × 1.5 mm. Vidējais enerģijas patēriņš procesā 38.8 kWh. Dzesēšana veikta ar ātrumu 0.2 līdz 0.3 °C min^{-1}. 2.4. attēlā redzama WTT termiskās apstrādes procesa līkne.



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

Finieru apstrādes iekārta WTT modifikācijas procesā skatāma 2.5. attēlā.

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

Kā redzams 2.5. attēlā, tā ir neliela, laboratorijas izmēra termiskās modifikācijas iekārta.

2.2. Termiski modificēto finieru īpašību noteikšana

2.2.1. Finieru masas zudumi

Masas zudumi termiskās apstrādes procesa laikā noteikti, paraugus sverot pirms un pēc modifikācijas. Masas zudumi aprēķināti pēc 2.2. formulas.

$$ML = \frac{m_m - m_0}{m_0} \cdot 100\% \qquad (2.2.)$$

kur m_0-neapstrādātas sausas koksnes masa, kg;
m_m-termiski apstrādātas sausas koksnes masa, kg.

2.2.2. Finieru blīvums

Blīvuma noteikšana veikta atbilstoši standartam ISO 13061-2:2014. Rezultātu novērtēšanai aprēķināta standartnovirze un variācijas koeficients. Blīvums pēc modifikācijas aprēķināts pēc 2.3. formulas.

$$\rho_{pēc\ modifikācijas} = \rho_{pirms\ modifikācijas} \times \frac{m_{pēc}}{m_{pirms}} \qquad (2.3.)$$

2.2.3. Finieru krāsas izmaiņas

Krāsas noteikšanai izmantots MicroFlash 200D pārnēsājamais spektroforometrs (DataColor, Lawrenceville, NJ, USA), kas spēj nolasīt krāsu CIEL*a*b koordinātās atbilstoši standartam ISO/CIE 11664-4:2019. Krāsa mērīta ar 18 mm diametra atvērumu, izmantojot standarta gaismas avotu D65 un nolasījuma leņķi 10°, kā arī spektrofotometrs Minolta CM-2500d (Konica Minolta, Tokyo, Japan) ar gaismas avotu D65, d/8 ģeometriju un 10° novērojuma leņķi. Nolasījumi veikti trijās parauga vietās pirms un pēc termiskās apstrādes, kā arī periodiski novecināšanas laikā.

Krāsas noteikšanai izmantota CIEL*a*b* sistēma, kur L* ir gaišuma ass (no nulles (melns) līdz 100 (balts)), a* un b* ir hromoforās koordinātas (a+ ir sarkans, a- ir zaļš, kamēr b+ ir dzeltens un b- ir zils). Kopējā krāsas izmaiņa ΔE aprēķināta no visiem parametriem ar 2.4. formulu:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \qquad (2.4.)$$

2.2.4. Finieru līdzsvara mitrums un mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte (MEE)

Līdzsvara mitruma noteikšana veikta, nosverot 20 finieru paraugus ar izmēriem 40×20 mm pēc to kondicionēšanas katrā vidē un pēc tam izžāvējot un iegūstot sausa parauga masu atbilstoši standartam ISO 13061-1:2014. Paraugi kondicionēti 20 °C temperatūrā pie trīs atšķirīgiem gaisa relatīvajiem mitrumiem 30, 65 un 85%, līdz sasniedza līdzsvara mitrumu (nemainīga masa 24 h intervālā starp divām svēršanas reizēm, kas nepārsniedz 0.1% no parauga masas). MEE izsaka relatīvo attiecību pret modificētas koksnes līdzsvara mitrumu MEE = 0% nozīmē, ka līdzsvara mitrums neatšķiras MEE =100% nosaka, ka līdzsvara mitrums ir 0%. To aprēķina pēc 2.5. formulas:

$$MEE = \frac{EMC_{NT} - EMC_{HT}}{EMC_{NT}} \quad (2.5.)$$

kur EMC_{NT}-termiski nemodificētu paraugu līdzsvara mitrums, %;
EMC_{HT}-termiski modificētu paraugu līdzsvara mitrums attiecīgajos vides apstākļos, %.

2.2.5. Optiskā mikroskopija

Termiski modificētu un nemodificētu paraugu mikroskopija veikta ar redzamās gaismas mikroskopu Leica DMLB 200× un 400× palielinājumā. Gaismas mikroskopijas attēli uzņemti ar video kameru Leica DFC490, izmantojot attēlu apstrādes programmatūru Image-Pro Plus 6.3. (Media Cybernetics, Inc.). Redzamās gaismas mikroskopijas paraugu izmērs 20 × 20 × 1.5 mm. Pirms mikroskopijas paraugi 24 h turēti ūdenī, lai mīkstinātu koksnes struktūru un paraugi būtu nogriežami. Koksnes paraugu (15 līdz 30 µm) griešana veikta ar žileti.

2.2.6. Finieru virsmas kontaktleņķis

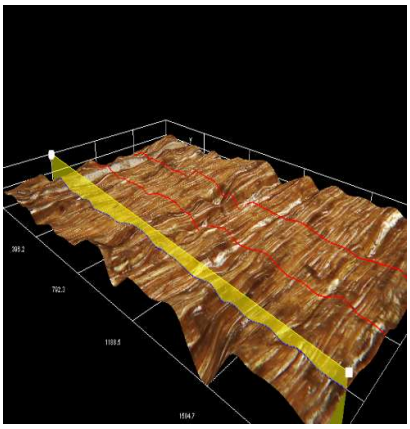
Kontaktleņķis mērīts paraugiem ar izmēru 50 × 150 × 1.5 mm bez papildu virsmas apstrādes. Destilēta ūdens piliens ar tilpumu 10 µl uzpilināts uz parauga virsmas, izmantojot elektronisku dozatoru. Kontaktleņķis uz trīs fāzu sakares virsmas perpendikulāri koksnes šķiedrai mērīts 5 sekundes pēc piliena uznešanas uz virsmas. Mērījumi veikti ar goniometru Dataphysics OCA20. Uz katra parauga virsmas nomērīti desmit kontaktleņķi. Vidējais izmērītais kontaktleņķis no trijiem paraugiem izmantots virsmas enerģijas aprēķinam, kas veikts pēc Neumann metodikas, skat. 2.6. sakarību (Li & Neumann, 1992):

$$cos\theta = -1 + 2\sqrt{\frac{\sigma_s}{\sigma_l} e^{-\beta(\sigma_l - \sigma_s)^2}} \quad (2.6.)$$

kur Θ-kontaktleņķis, °;
σ_l-šķidruma virsmas spraigums, mJ·m^{-2};
σ_s-koksnes virsmas spraigums, mJ·m^{-2};
$\beta - 0{,}0001247$ (empīriskā konstante).

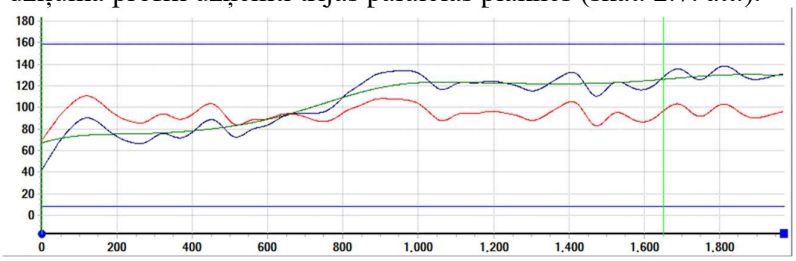
2.2.7. Finieru virsmas profils

Virsmas profila noteikšana veikta ar digitālo gaismas mikroskopu HIROX RH-2000. Lēca MXB-2016Z, FOV 1981 µm, pie 160 reižu palielinājuma ar attēla izšķirtspēju WUXGA1920×1200 pikseļi 1.03 µm. Baltās krāsas balanss RGB 171.128.111. Uzņemtie 3D profila attēli matemātiski pārveidoti, uzņemot to virsmas dziļuma attēlus automātiskajā režīmā, attēlojot iezīmētās sekcijas platumu un garumu EXCEL programmā (skat. 2.6. att.).



2.6. att. **Virsmas dziļuma profila noteikšana**

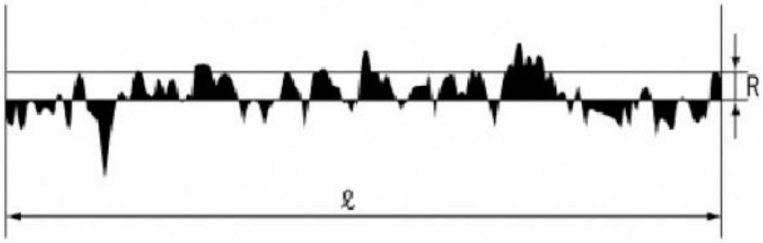
Virsmas dziļuma profili uzņemti trijās paralēlās plaknēs (skat. 2.7. att.).



2.7. att. **Virsmas dziļuma profili**

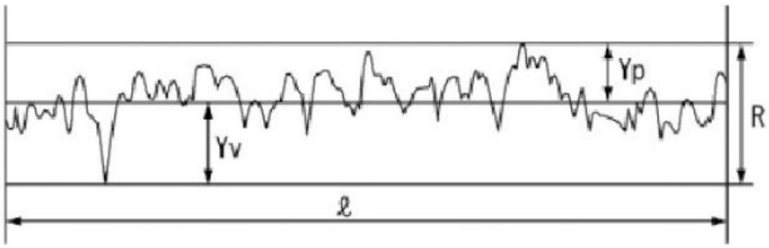
Secīgi veikta līkņu datu matemātiskā apstrāde un noteikts virsmas raupjums pēc parametriem R_a, R_z un R_{zjis}. R_a vidējais aritmētiskais raupjums (skat. 2.8.att.), ko aprēķina pēc 2.7. formulas, un ko samērā maz ietekmē atsevišķa mērījumu vērtība.

$$R = \frac{1}{2}\int_0^{\sigma} |f(x)|dx \qquad (2.7.)$$



2.8. att. **Vidējais aritmētiskais virmas raupjums**

Maksimālais raupjums jeb R_z ir starpība starp virsmas profila augstāko un zemāko punktu (skat. 2.9. att.).



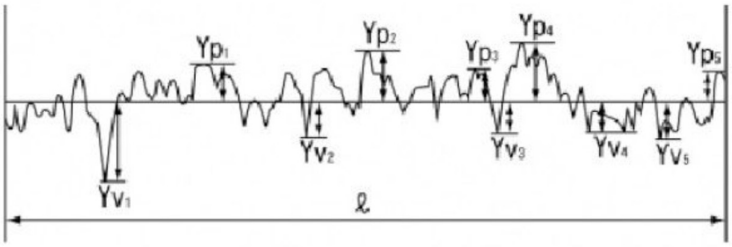
2.9. att. **Maksimālais raupjums**

To aprēķina pēc formulas 2.8.

$$R = Yp + Yv \tag{2.8.}$$

10 punktu vidējais raupjums R_{zjis} aprēķināts kā vidējais no pieciem augstākajiem un no pieciem zemākajiem punktiem (2.9. formula, skat. 2.10. att.).

$$Rzjis = \frac{|Yp1 + Yp2 + Yp3 + Yp4 + Yp5| + |Yv1 + Yv2 + Yv3 + Yv4 + Yv5|}{5} \tag{2.9.}$$



2.10. att. **10 punktu vidējais raupjums**

Iegūto finieru virsmas dziļuma profili savstarpēji salīdzināti, izmantojot 10 punktu vidējā virsmas raupjuma R_{zjis} rādītājus.

2.2.8. Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija (FTIR)

Lai noteiktu, kādas ķīmiskās izmaiņas notikušas finieros termiskās modifikācijas laikā, pilnās iekšējās atstarošanas Furjē transformācijas infrasarkanie (ATR – FTIR) spektri uzņemti ar BRUKKER Alpha ierīci, kuras atstarošanas elements: platīna-dimanta prizma. Datu matemātiskā apstrāde veikta ar programmatūru OPUS 7.5. Spektri uzņemti 2000 līdz 800 cm^{-1} apgabalā ar spektra izšķirtspēju 4 cm^{-1}, katru spektru uzņemot ar 24 h atkārtojumiem. Pēc spektra uzņemšanas tas tika normalizēts pret CH grupas vibrācijas absorbcijas joslu pie 1030 cm^{-1} un bāzes līnija izlīdzināta, lietojot 62 atsauces punktus, CO_2 ietekme izlēgta. Konkrēto apstrādes režīmu raksturojošais spektrs iegūts kā vidējais spektrs no trīs paraugiem, kuram katram uzņemti spektri trīs dažādās parauga vietās (kopumā vidējais no deviņiem spektriem). Apskatītas izmaiņas trīspadsmit galvenajos spektra punktos, kas apkopoti 2.2. tabulā.

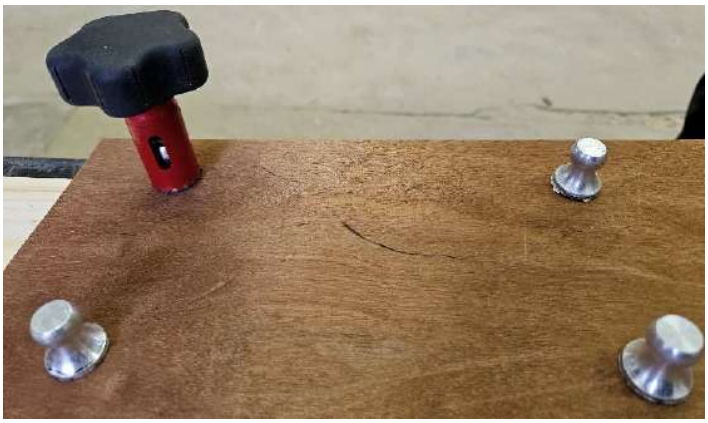
2.2. tabula.

Būtiskās absorbcijas joslas termiski modificētu finieru FTIR spektros

FTIR absorbcijas josla, cm^{-1}	Ķīmiskā grupa	Sastāvdaļa	Avots
895-903	C_1-H anomērā oglekļa liece	ksilāns	(Liu et al., 2015)
1026-1032	C-O-C alifātiskās ētera saites stiepšanās	ksilāns, lignīns	(Liu et al., 2015)
1048-1051	C-O pirmējo spirtu, arabinoksilānu saites stiepšanās	hemicelulozes	(Coates, 2000; Kacuráková, 2000)
1108-1110	C-O otrējo spirtu saites stiepšanās	celuloze	(Coates, 2000)
1159-1166	C-O-C simetriskās vibrācijas. C=O konjugētās esteru grupas (lignīns)	celuloze, hemicelulozes, lignīns	(Faix, 1992; Gupta et al., n.d.)
1231-1235	CO-OR acil- skābekļa saites stiepšanās hemicelulozēs, benzola - skābekļa saites stiepšanās lignīnā, O-H fenoliskā saite	hemicelulozes, lignīns	(Bodîrlău & Teacă, 2009; Liu et al., 2015)
1317-1322	C-O karboksilskābēs, spirtos un esteros hemicelulozēs, C-H vibrācijas celulozē	hemicelulozes, celuloze	(Attia et al., 2015; Veizović et al., 2018)
1369-1375	C-H liece	celuloze, hemicelulozes	(Bodîrlău & Teacă, 2009; Liu et al., 2015)
1416-1422	C-H aromātiskā gredzena saišu stiepšanās	lignīns, celuloze	(Liu et al., 2015)
1447-1463	`-$CH_3$ un `-CH_2 nesimetriska liekšanās, alifātisko C-H liekšanās	lignīns, celuloze	(Bodîrlău & Teacă, 2009; Ercin & Yurum, 2003; Liu et al., 2015)
1506-1512	C=C stiepšanās aromātiskajā gredzenā	lignīns	(Bodîrlău & Teacă, 2009; Liu et al., 2015)
1590-1597	C=C stiepšanās aromātiskajā gredzenā	lignīns	(Liu et al., 2015)
1732-1740	C=O stiepšanās nekonjugētajās karbonil, uronil un acetil grupās	ksilāns, hemicelulozes	(Ercin & Yurum, 2003; Liu et al., 2015)

2.2.9. Finieru līmes adhēzija perpendikulāri šķiedrām

Līmes adhēzijas izturība perpendikulāri šķiedrai noteikta atbilstoši standartam ISO 4624:2023, kas paredzēts pārklājumu saistīšanās stiprības testēšanai. Izmantotā iekārta – PosiTESTS AT – *adhesion tester* (precizitāte ± 0.01 MPa). Vienkomponentu poliuretāna, suberīnskābes, PVA un fenola formaldehīda līme uzklāta uz parauga virsmas un cietināta atbilstoši līmes lietošanas tehniskajiem nosacījumiem. Tad ar divkomponentu epoksīda sveķu palīdzību pie katra parauga pielīmētas četras alumīnija "lellītes" (standartizēti, specifiskas formas cilindri) ar 2 cm diametru (skat. 2.11. att.).



2.11. att. **Cilindru izvietojums uz modificēta finiera** (Ramata Luīze, 2024)

"Lellītes" atrautas no substrāta, fiksēts to atraušanai nepieciešamais spēks un novērtēts plīsuma raksturs procentuāli pa koksni, pa līmes slāni vai epoksīda slāni (skat. 2.12. att.).

2.12. att. **Plīsums pa koksni ar atraušanas metodi** (Ramata Luīze, 2024)

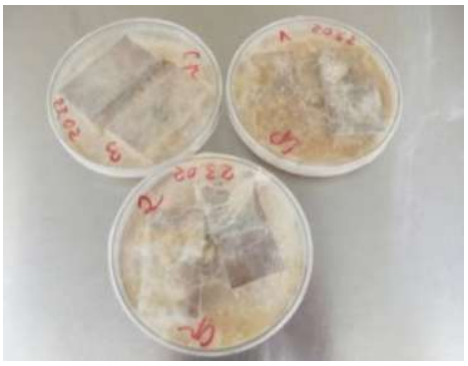
No kreisās puses pirmā "lellīte" ar 0% plīsumu pa koksni, pārējās attiecīgi ar 50%, 75% un 100% plīsumu pa koksni. Jo procentuāli lielāks plīsums pa koksni, jo labāka saķere starp līmvielu un finieri.Tas tiek novērtēts vizuāli.

2.2.10. Finieru novecināšana āra apstākļos

Finieru dabiskā novecināšana āra apstākļos veikta laikā no jūnija līdz oktobrim 2020. gadā Jelgavā (56°65`N 23°71`E). Paraugu izmērs 375 × 100 × 20 mm. Atbilstoši EN 927-3:2019 standartam, testa paraugi novietoti dienvidu pusē 45 ° leņķī.

2.2.11. Finieru bioizturība laboratorijas apstākļos

Atbilstoši standartam EN 12038:2002 noteikta finieru bioizturība, izmantojot brūnās trupes sēni *Coniophora puteana* BAM Ebw 15. Sēne kultivēta uz barotnes, kas satur 5% iesala ekstrakta koncentrātu un 2% Fluka agaru. Koksnes paraugi ar izmēru 50 × 25 × 1.5 mm aseptiski novietoti uz 3 mm metāla atbalstiem Petri trauciņā virs sēņu micēlija un inkubēti sešas nedēļas 22 ± 2 °C temperatūrā pie 70 ± 5% relatīvā mitruma (skat. 2.13. att.). Pēc tam paraugi izņemti no barotnēm, notīrīti no micēlija un žāvēti 103 ± 2 °C temperatūrā.



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

Sēņu izraisītie bojājumi izteikti kā masas zudums procentos pret paraugu sākotnējo sauso masu.

2.2.12. Finieru robežstiprība stiepē

Atbilstoši standartam GOST 20800-75:1976 noteikta finieru robežstiprība stiepē. Stiepes noteikšanai izmantoti 20 paraugi, kas atlasīti pēc nejaušības principa ar izmēriem 20 × 200 × 1.5 mm. Lai novērstu finieru paraugu izslīdēšanu no paraugu turētāja, to abos galos abās pusēs ar vienkomponentu poliuretāna līmi pielīmēti saplākšņi ar izmēru 20 × 50 × 4.5 mm. Pēc tam paraugi kondicionēti 20 ± 3 °C temperatūrā pie 65 ± 5% relatīvā gaisa mitruma. Finieru robežstiprības stiepē noteikšana veikta ar iekārtu INSTRON 5967 (Instron, Norwood, MA, USA) pie slogošanas ātruma (~1mm min^{-1}), lai parauga sabrukšana notiktu 60 ± 30 sekundēs.

2.3. Saplākšņu sagatavošana un īpašību noteikšana

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

2.3.1. Saplākšņu līmēšana

Pēc termiskās apstrādes finiera loksnes kondicionētas pie relatīvā mitruma 65 ± 5 % un 20 ± 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 (Rižikovs et al., 2021). Izgatavoto saplākšņu izmērs – 290 × 290 × 4.5 mm. Saistvielas patēriņš noteikts, mērot finieru masu pirms un pēc saistvielas uzklāšanas pēc 2.10. formulas (2.10): .

$$c_r = \frac{m_2 - m_1}{2ab} \cdot 10^6 \qquad (2.10.)$$

kur c_r–reālais saistvielas patēriņš, g m^2;
m_1-finieru masa bez saistvielas, g;
m_2-finieru masa ar saistvielu, g;
a-finiera garums, m;
b-finiera platums, m.

Trīsslāņu saplāksnis presēts ar LAP 40 – vienstāvu presi 215 °C, 1.8 MPa spiedienā un presēšanas laiks – 5 min. Līmēšanas procesā noteikta saplākšņu sapresēšanās pakāpe pēc 2.11. formulas (Spulle et al., 2021).

$$CR = \frac{(T_v - T_b)}{T_v} \cdot 100 \qquad (2.11.)$$

kur CR-sapresēšanās pakāpe, %;

T_v–saplākšņa biezums pirms presēšanas, mm;

T_b–saplākšņa biezums pēc presēšanas, mm.

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). Šo saplākšņu līmēšanas parametri izvēlēti, balstoties uz komerciālo līmju ražotāja tehnisko datu lapām un apkopoti 2.3. tabulā.

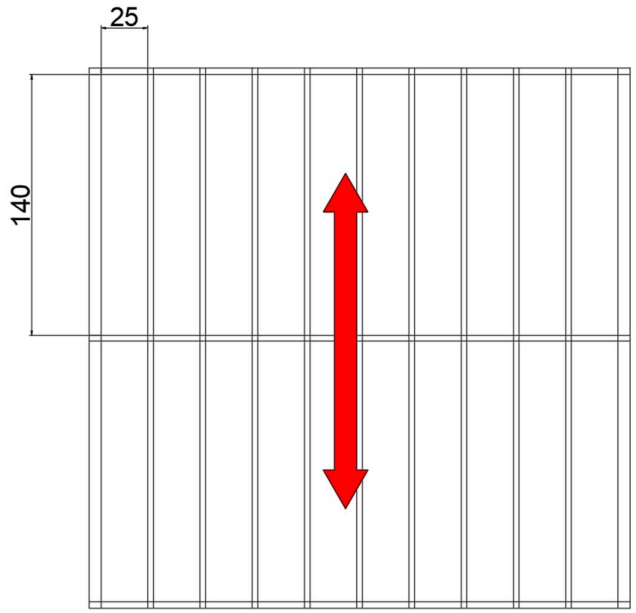
2.3.tabula.

Saplākšņa līmēšanas parametri

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

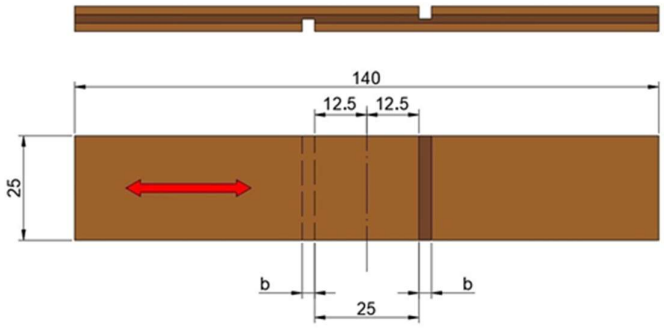
2.3.2. Saplākšņu stiprība stiepē-bīdē

Paraugi robežstiprībai stiepē-bīdē izgatavoti no salīmētajiem saplākšņiem, kuru garums un platums attiecīgi 290 × 290 mm. Katram saplākšņu veidam izgatavoti 4 saplākšņi, un no viena saplākšņa izgatavoti 20 (skat. 2.14. att.) jeb kopā vienam saplākšņu veidam 80 paraugi.



2.14. att. **Paraugu izgatavošanas shēma** (Šillers Haralds, 2022)
sarkanās bultiņas virziens sakrīt ar ārējo finieru šķiedru virzienu

Atbilstoši standarta EN-314 1. daļai sagatavoti paraugi: platums 25 mm, attālums starp iezāģējumiem 25 mm, iezāģējumu platums 2.5 līdz 4 mm. Iezāģējumi parauga ārējos finieros veikti simetriski no parauga abiem galiem (skat. 2.15. att.).



2.15. att. **Testa parauga shēma, pēc EN 314-1:2004** (Šillers Haralds, 2022)
sarkanās bultiņas virziens sakrīt ar ārējo finieru šķiedru virzienu

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

1. 24 h iemērkšanu ūdenī pie temperatūras 20 ± 3 °C;
2. 6 h vārīšanu ūdenī, kam seko atdzesēšana 20 ± 3 °C ūdenī vismaz vienu stundu;
3. 4 h vārīšanu ūdenī, kam seko žāvēšana krāsnī 60 ± 3 °C temperatūrā 16 h, kam seko atkārtota 4 h vārīšana un pēc tam atdzesēšana 20 ± 3 °C ūdenī vismaz vienu stundu;
4. 72 ± 1 h vārīšanu, kam seko atdzesēšana 20 ± 3 °C ūdenī vismaz vienu stundu.

Konkrēta priekšapstrādes veidu kombinācija noteikta atbilstoši EN 314-2:1993 standartam (2.4. tabula).

2.4. 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 pārbaude

Rezultāti izvērtēti pēc diviem kritērijiem – robežstiprība stiepē-bīdē un plīsuma pa koksni raksturs pēc standarta 314-2:1993 prasībām (skat. 2.4. tabulu).

Saplākšņa paraugi stiepē–bīdē, MPa, pārbaudīti universālajā testēšanas iekārtā ZWICK 10 kN RetroLine.

Robežstiprība stiepē-bīdē tiek aprēķināta pēc 2.12. formulas (EN 314-1:2004).

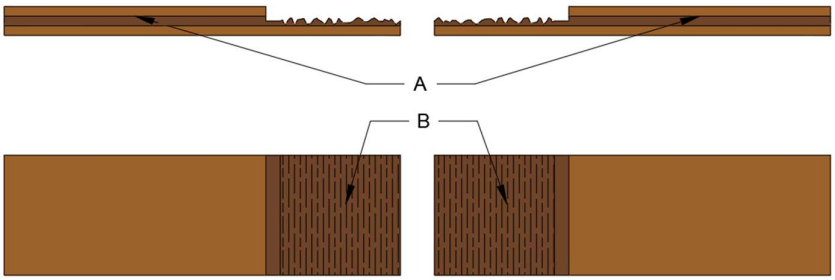
$$f_v = \frac{F}{l_1 \times b_1} \qquad (2.12.)$$

kur F-testa parauga sagrāves spēks, N;

l_1–stiepes-bīdes laukuma garums, mm;

b_1 -stiepes-bīdes laukuma platums, mm.

Pēc katras parauga sagrāves, tos pirms tam izžāvējot, nosaka parauga plīsumu pa koksni (skat. 2.16. att.).



2.16. att. **Testa paraugu plīsumu pa koksni vērtēšana** (Šillers Haralds, 2022)

A – vērtējamā testa parauga abas puses;

B – vērtējamais testa kvadrāts (plīsumi pa koksni).

Plīsuma pa koksni vērtējuma paraugi ir redzami EN 314-1:2004 standarta pielikumā (skat. 2.5. tabulu). Ja plīsums parauga sagrāves laukumā (25 × 25 mm) ir pilnībā noticis pa līmes šuvi, tad plīsums pa koksni fiksējams kā 0%, ja, plīsums ir pilnībā noticis pa koksni, tad 100%. Plīsumu pa koksni nosaka ar intervālu 5%.

2.5. tabula.

Saplākšņa atbilstības kritēriji

Vidējā stiprība stiepē-bīdē f_v, N·mm^{-2}	Vidējais plīsums pa koksni, ω, %
$0.2 \le f_v < 0.4$	≥80
$0.4 \le f_v < 0.6$	≥60
$0.6 \le f_v < 1.0$	≥40
$1.0 \le f_v$	nav prasību

2.4. Dzīves cikla novērtējums

Dzīves cikla novērtējums veikts, lai novērtētu termiski modificēta un ar suberīnskābju saistvielu līmēta bērza saplākšņa ietekmi uz vidi. Deklarētā vienība ir definēta kā 1 m³ trīsslāņu saplāksnis.

Saplākšņa ražošanas sistēmas robežas redzamas rezultātu sadaļā. Tas ietver:

- bērza mizas ieguvi kā mizošanas blakusproduktu;
- bērza mizas ekstrakciju;
- bērza mizas depolimerizāciju;
- suspensijas paskābināšanu un filtrāciju, lai iegūtu suberīnskābju saistvielu;
- visu izejvielu transportēšanu;
- finieru termisko modificēšanu un gala saplākšņa ražošanu;
- gatavā produkta iepakošanu, nogādāšanu pie klienta;
- dzīves cikla beigu posmu, kurā modelēts, ka 50% no lietotā saplākšņa 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 saplākšņa presēšanu iegūti LBTU Meža un vides zinātņu fakultātes Būvniecības un kokapstrādes institūtā. Kā sekundārais datu avots izmantota datubāze Ecoinvent 3.11. (Ecoinvent, 2024). Iepakošanas materiāli un to daudzums modelēts, balstoties uz A/S "Latvijas Finieris" bērza saplākšņa produktu vides deklarācijas datiem. Ražotnes atrašanās vieta - Dzērbenes iela 27, Rīga.

Aprēķini veikti ar brīvpieejas dzīves cikla aprēķinu programmu openLCA (GreenDelta, 2006). Kā ietekmes uz vidi novērtējuma metode izvēlēta ReCiPe 2016 (H) midpoint, lai pēc tam būtu iespējams aprēķināt vides izmaksas, balstoties uz vides cenu rokasgrāmatas (De Vries et al., 2024) datiem Eiropas Savienībai. Lai datus varētu salīdzināt ar nemodificēta saplākšņa produktu vides deklarācijas datiem, atsevišķi izdalīts dzīves cikla posms A1-A3 – no izejvielām līdz rūpnīcas vārtiem un šī posma ietekme uz vidi izvērtēta pēc EF.v.3.1. metodes atbilstoši standartam EN 15804+A2:2022.

2.5. Laboratoriski izveidotā produkta tuvinātie ekonomiskie aprēķini

Ekonomiskais aprēķins veikts bērza saplāksnim, kas līmēts ar suberīnskābju saistvielu, no 217/180/VT režīmā termiski modificētiem finieriem.

Saplākšņa cenas aprēķinam izmantoti finanšu vadības pamatprincipi, 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.

Saplākšņa cenas aprēķinā izmantoti reālas cita produkta ražotnes, kas atrodas Rīgā, dati, t. sk.:

- telpu īres, komunālo pakalpojumu un etilspirta izmaksas;
- darbinieka bruto alga – 1500 EUR;
- administratīvās izmaksas rēķinātas kā 10 % no ražošanas izmaksām;
- peļņas procents – 10 % no kopējām izmaksām.

Aprēķini veikti uz 1 m³ saplākšņa. Lai cenu būtu vieglāk uztvert, tālāk veikts aprēķins uz 1 m² 9 mm saplākšņa.

Eko-izmaksas ir ar LCA pamatots rādītājs, kas pārvērš ietekmi uz vidi naudas izteiksmē pēc 2.13. formulas:

Vides izmaksas=ietekmes uz vidi rādītājs × vides cena (2.13.)

Vides cenas ņemtas no 2024. gada rokasgrāmatas (De Vries et al., 2024), izmantojot Eiropas Savienības vidējos rādītājus un izvēloties vidējo cenas robežu.

Pašreizējā neto vērtība (NPV) aprēķināta pēc 2.14. formulas, lietojot diskonta likmi 4 %.

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2.14.)$$

kur C_t-izmaksas t gadā;
r-diskonta likme;
n-gadu skaits.

NPV rēķināts uz 30 gadu periodu.

Projekta iekšējā peļņas norma (IRR) tiek aprēķināta pēc 2.15. formulas:

$$NPV = 0 = \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+IRR)^t} \quad (2.15.)$$

kur Ct-izmaksas t gadā;
IRR-iekšējā peļņas norma;
n-gadu skaits.

Ja aprēķinātā projekta iekšējā peļņas norma ir lielāka par diskonta likmi (4%), tad projekts ir saimnieciski izdevīgs.

Ekvivalentās gada izmaksas (EAC) ir rēķinātas pēc 2.16. un 2.17. formulas:

EAC=NPV×CRF (2.16.)

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (2.17.)$$

kur CRF-kapitāla atgūšanas koeficients;
r-diskonta likme;
n-gadu skaits.

2.6. Iegūto datu matemātiskā apstrāde

Visas datu kopas atbilst normālajam sadalījumam. Tādējādi datu sākotnējai apstrādei un novērtēšanai izvēlēta datu neparametriskā metode - Kolmogorova – Smirnova tests (Dhanakotti, 2024). Ar šo testu veic transformāciju uz Normālo sadalījumu un novērtē, vai divas salīdzināmās izlases būtiski atšķiras vai nē, tātad vai modificētu saplākšņu un finieru dati būtiski atšķiras no nemodificētajiem. Šis tests ir neparametrisks, kas nozīmē, ka tas neprasa pieņēmumus par sadalījuma parametriem, un ir balstīts uz empīriskās sadalījuma funkcijas un teorētiskās sadalījuma funkcijas maksimālās novirzes novērtējumu (2.18. formula):

$$D_{n,m} = sup_x |F_n(x) - G_m(x)| \quad (2.18.)$$

Fn(x) un Gm(x) ir divu paraugu empīriskās sadalījuma funkcijas

Novērtējuma soļi:

1. Tiek izvirzīta nulles hipotēze;
2. H_0 – abi paraugi atbilst vienam sadalījumam;
3. H_1 - alternatīvā hipotēze – divi paraugi atbilst atšķirīgiem sadalījumiem;
4. Sakārto datus augošā secībā;
5. Par pirmo uzskata mazāko izlasi;
6. Konstruē empīrisko funkciju pirmajai izlasei;
7. 2. izlasei rēķinam procentiles, par robežām (*binRange*) izmantojot 1. izlases vērtības;
8. Nosaka kāda 2. izlases daļa nepārsniedz 1. izlases vērtību;
9. Sniedz secinājumus par izvirzītās hipotēzes ticamību.

$$\lambda = \sqrt{\frac{nm}{n+m} \cdot \max(ABS\ Diff)} \tag{2.19.}$$

kur n - 1. izlases atkārtojumu skaits;
m - 2. izlases atkārtojumu skaits;
ABS diff – absolūtā diference.

$$p = 1 - K(\lambda) = 2e^{-2\lambda^2} - 2e^{-8\lambda^2} + 2e^{-18\lambda^2} \tag{2.20.}$$

Ja Kolmogorova- Smirnova testa p vērtība (formula 2.20) ir mazāka nekā izvēlētais būtiskuma līmenis (α=0.1), tad nulles hipotēze tiek noraidīta.

Maksimālā varbūtība, ka paraugu kopu sadalījumi atšķiras tiek aprēķināti pēc formulas 1-(p-vērtība) un šie rezultāti tiek apkopoti tabulā rezultātu sadaļā.

Ar mērķi paplašināti izpētīt apjomīgākās un svarīgākās datu kopas (bērza finieru robežstiprību stiepē, jo tā ietekmē saplākšņa stiprību), pārbaudot, vai dati atbilst normālajam sadalījumam, veikts Šapiro-Vilka tests (Shapiro & Wilk, 1965). Izvirzot nulles hipotēzi, ka paraugkopas dati atbilst normālajam sadalījumam. Tests tiek veikts ar ticamības līmeni 95 %. Ja ar šo divu testu palīdzību tiek noskaidrots, ka dati atbilst normālajam sadalījumam, var veikt dispersijas analīzi. Veic t-testu divām neatkarīgām izlasēm. Veicot šo testu, vispirms tiek izvirzīta hipotēze, ka dispersijas abām izlasēm ir vienādas (formula 2.21.) un alternatīvā hipotēze, ka dispersijas abām izlasēm ir būtiski atšķirīgas (formula 2.22.):

$$H_0 : \delta_1^2 = \delta_2^2, \tag{2.21.}$$

$$H_1 : \delta_1^2 \neq \delta_2^2 \tag{2.22.}$$

Lai to pārbaudītu, veic Lēvena testu ar 95 % ticamību. Ja dispersijas ir vienādas, var pārbaudīt izlašu vidējās vērtības, kas aprēķinātas atsevišķām īpašībām. Un ar 95 % ticamību pārbaudīt hipotēzi, ka izlašu vidējās vērtības ir vienādas (formula 2.23.), izvirzot alternatīvo hipotēzi, ka tās nav vienādas (formula 2.24.):

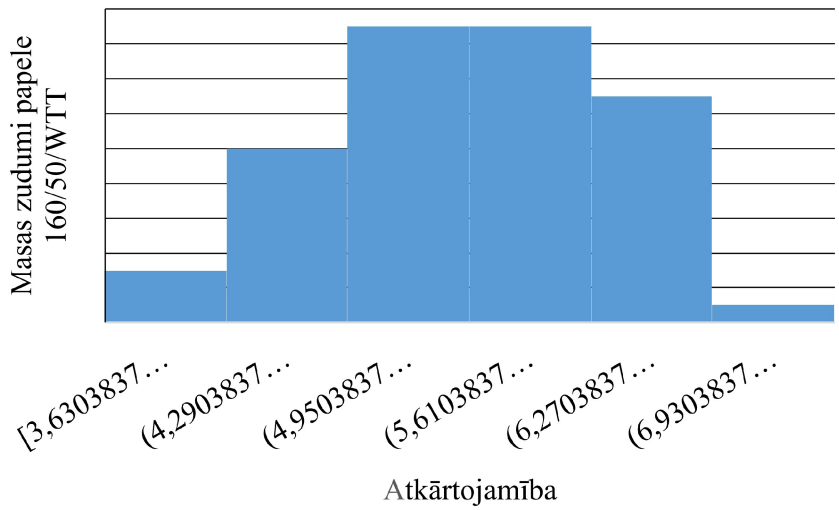
$$H_0 : \mu_1 = \mu_2, \tag{2.23.}$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \tag{2.24.}$$

Veicot divpusējo t-testu (ANOVA) iegūti rezultāti par vidējo vērtību atšķirīguma būtiskumu.

Lai novērtētu termiskās apstrādes rezultātus, ar Boferroni testa (Bland & Altman, 1995) palīdzību salīdzina visus rezultātus pa pāriem, pētot iespējamās atšķirības savā starpā, lai izvēlētos piemērotāko.

Palielinot paraugu skaitu, piemēram, parametram masas zudumi papelei 160/50/WTT, kur metodē WTT ir modificēti 62 paraugi, sadalījums tiecas uz normālo (skat. 2.17. attēlu), tāpēc datu apstrādei ir izmantotas metodes, kas lietojamas normālā sadalījuma gadījumā, jo ir pamatots iemesls domāt, ka palielinot paraugu skaitu, sadalījums atbilstu normālajam visu noteikto īpašību gadījumā.



2.17. att. **Histogramma masas zudumi papele 160/50/WTT**

Paraugkopu vidējais aritmētiskais noteikts pēc 2.25. formulas (Arhipova & Bāliņa, 2003).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j}{n} \qquad (2.25.)$$

kur x_j – atsevišķo pārbaudes rezultātu vai mērījumu vērtības;
n – paraugkopas pārbaudes rezultātu vai mērījumu skaits.

Standartnovirze aprēķināta pēc 2.26. formulas (Arhipova & Bāliņa, 2003).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(x_j - \bar{x}\right)^2}{n-1}} \qquad (2.26.)$$

kur S – standartnovirze;
x_j – atsevišķo pārbaudes rezultātu vai mērījumu vērtības;
n – paraugkopas pārbaudes rezultātu vai mērījumu skaits;
$\bar{x}$ – vidējais aritmētiskais.

Variācijas koeficients savukārt aprēķināts pēc 2.27. formulas (Arhipova & Bāliņa, 2003).

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100, \qquad (2.27.)$$

kur V- variācijas koeficients;
S – standartnovirze;
$\bar{x}$ – vidējais aritmētiskais.

Determinācijas koeficients R^2 ir mērs, kas parāda, cik labi novērtētā izlases regresijas līnija pieguļ izlases datiem. R^2 mēra daļu vai procentus no kopējās y variācijas, kuru izskaidro regresijas modelis. Determinācijas koeficienta īpašības (Revina, 2002):

a) determinācijas koeficients ir nenegatīvs skaitlis ($R^2 \geq 0$);
b) determinācijas koeficients atrodas robežās $0 \leq R^2 \leq 1$;
c) ja $R^2=1$, tad ir perfekta sakrišana;
d) ja $R^2=0$, tad sakarību starp x un y nav.

Korelācijas koeficients r mēra ciešumu starp mainīgajiem x un y. Jo lielāka ir korelācijas koeficienta vērtība, jo ciešākas ir korelatīvās saites starp manīgajiem. Korelācijas koeficientu aprēķina pēc 2.28. formulas.

$$r = \pm\sqrt{R^2} \tag{2.28.}$$

Korelācijas koeficienta r īpašības (Revina, 2002):

a) korelācijas koeficientam ir pozitīva vai negatīva zīme. Zīme ir atkarīga no kovariācijas starp abiem mainīgajiem;
b) korelācijas koeficients atrodas robežās $-1 \leq r \leq 1$;
c) korelācijas koeficiens ir simetrisks pēc dabas – tiešai un saistītai regresijai korelācijas koeficienti ir vienādi;
d) korelācijas koeficients mēra lineāro atkarību, bet to nelieto, lai aprakstītu nelineāras attiecības.

Datu matemātiskā apstrāde veikta ar programmām Microsoft Excel (2019) un IBM SPSS Statistics 21.

Darba anglisko tekstu tulkošanai izmantots ChatGPT 5.1. (OpenAI, 2025).

3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

3.1. Termiski modificētu finieru raksturojums

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

3.1.1. Finieru masas zudumi

Masas zudumi dažādos termiskās apstrādes procesos redzami 3.1. tabulā. WTT – tvaika process, VT – Termovouto 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 nekā 214/120. VT un WTT modifikācijas metodes ir būtiski atšķirīgas. Par to liecina pie vienādas apstrādes temperatūras un laika 160/50 iegūti atšķirīgi rezultāti - 5.2 līdz 6.7% masas zudums 160/50 WTT procesā, kamēr 160/50 VT procesā masas zudumi bija minimāli 0.1 līdz 1.2%.

3.1. tabula

Masas zudumi termiskās apstrādes procesā

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
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

*a un b – paralēlie paraugi

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. (Gérardin, 2016; Hill, 2006; Pétrissans et al., 2013) pētījumā noskaidrots, ka masas zudumi rodas galvenokārt acetilētā glukuronksilāna deacetilācijas dēļ, kas izraisa etiķskābes rašanos, 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 (Esteves & Pereira, 2009; Xu et al., 2019).

Masas zudumi ir galvenais parametrs, kas raksturo termiskās apstrādes intensitāti un ļauj savstarpēji salīdzināt dažādus procesus ar dažādām apstrādes temperatūrām un dažādiem apstrādes laikiem (Candelier et al., 2016).

Termiskā apstrāde Termovouto procesā (VT) ir saudzīgāka nekā apstrāde tvaika vidē WTT procesā. 160/50 WTT režīma masas zudumi bija divas reizes lielāki nekā 204/120 režīmam, kaut arī modifikācijas laiks bija par 1.2 stundām īsāks un termiskās apstrādes temperatūra par 44 °C mazāka. Tas liecina par hidrolīzes procesu norisi koksnes termiskās sadalīšanās laikā. Etiķskābe un ūdens, kas rodas koksnes sadalīšanās laikā, no plānajiem finieriem tiek viegli aizvadīti ar vakuumu. Finieru masas zudumi pieaug ar temperatūras un termiskās apstrādes laika pieaugumu. Termiskās apstrādes laika būtisko ietekmi uz masas zudumiem var novērot, salīdzinot 217/180 un 218/30 režīma masas zudumus. Finiera plākšņu novietojums attiecībā pret alumīnija plāksnēm VT režīmā un atrašanās vieta augšējā vai apakšējā modifikācijas iekārtas daļā neietekmēja masas zudumus, kas liecina par vienmērīgu siltuma izkliedi VT iekārtā. Vismazākie masas zudumi ir 160/50 VT režīmā apstrādātajiem finieriem.

Salīdzinot a un b režīmos apstrādāto papeles finieru masas zudumus, redzams, ka VT procesam ir laba atkārtojamība. Statistiski būtiskas atšķirības (p=3.15E-16) novērojamas tikai režīmā 218/30, kas saistāms ar īso maksimālās temperatūras izturēšanas laiku, lielāku efektu dodot sildīšanas procesam un temperatūras celšanas ātrumam.

160/50 WTT režīmā apstrādātiem bērza dēļiem masas zudumi bija 16% (Biziks et al., 2016), kas ir būtiski lielāki, nekā novērots finieriem 6.7%.

Variācijas koeficients papeles (530%) un apses (153%) finieru masas zudumiem skaidrojams ar nelielo masas zudumu, kura precīza noteikšana metodiski ir novedusi pie lielas standartnovirzes (svaru precizitātes klase), kas ir lielāka par pašu rezultātu.

Apse konsekventi uzrāda mazāko termiskās degradācijas līmeni visos režīmos. Bērzs degradējas vairāk nekā apse, bet mazāk nekā papele intensīvos režīmos. Papele uzrāda minimālu degradāciju maigajos režīmos (160/50/VT), bet pie augstākām temperatūrām degradācija strauji pieaug, masas zudumi 6 līdz 9%, kas saistīts ar to, ka papele satur vairāk termiski jutīgas hemicelulozes, tomēr režīma efekts ir daudz lielāks nekā sugas efekts (ANOVA F=52.47 pret 3.81).

3.1.2. Finieru blīvums

Finieru paraugu blīvums redzams 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Finieru blīvums

Režīms	Vidējais blīvums, kg m^{-3}	Standartnovirze, kg m^{-3}	Variācijas koeficients, kg m^{-3}	P vērtība, salīdzinot ar nemodificētiem finieriem, izmantojot K-S testu
Nemodificēts bērzs	599	43	7	-
Nemodificēta apse	468	35	7	-
Nemodificēta papele	300	29	10	-
Bērzs 160/50 WTT	540	29.6	5.47	3.09E-05
Apse 160/50 WTT	441	50.5	11.4	2.54E-06
Papele 160/50 WTT	344	23.6	6.87	1.69E-09
Bērzs 160/50 VT	568	41	7	1.69E-12

3.2. tabulas nobeigums

Režīms	Vidējais blīvums, kg m^{-3}	Standartnovirze, kg m^{-3}	Variācijas koeficients, kg m^{-3}	P vērtība, salīdzinot ar nemodificētiem finieriem, izmantojot K-S testu
Apse 160/50 VT	482	20	4	1.81E-06
Papele 160/50 VT	348	36	10	7.09E-10
Bērzs 204/120 VT a	565	38	7	9.93E-08
Apse 204/120 VT b	382	24	7	2.65E-09
Papele 204/120 VT a	285	22	8	3.25E-06
Papele 204/120 VT b	346	24	7	1.52E-10
Bērzs 214/120 VT a	570	34	6	9.93E-08
Apse 214/120 VT b	444	32	7	2.65E-09
Papele 214/120 VT a	274	34	12	4.28E-04
Papele 214/120 VT b	318	29	9	1.07E-07
Bērzs 217/180 VT a	530	31	6	9.93E-08
Apse 217/180 VT b	441	37	8	2.65E-09
Papele 217/180 VT a	286	28	10	3.25E-06
Papele 217/180 VT b	312	28	24	6.83E-08
Bērzs 218/30 VT a	585	52	9	1.22E-07
Apse 218/30 VT b	442	38	9	3.64E-09
Papele 218/30 VT a	292	24	8	3.25E-06
Papele 218/30 VT b	324	29	9	7.72E-06

*a un b – paralēlie paraugi

Ar Koglomorova - Smirnova testa palīdzību, salīdzinot visos režīmos termiski modificēto finieru blīvumus, redzams, ka tie būtiski atšķiras ($p<\alpha$), ($p<0.1$). Izvērtējot paralēlos modificēšanas režīmus, piemēram, papele 214/120 VT a un b p vērtība ir 0.24, kas liecina, ka abi paraugi pieder vienai paraugkopai un ir laba termiskās modifikācijas procesa atkārtojamība. Sandberg (Sandberg et al., 2013) noteicis, ka koksnes blīvums termiskās modifikācijas laikā samazinās par 5 - 15% un ietekmē stiprības rādītājus. Kotilainen (Kotilainen, 2000) arī apgalvo, ka termiski modificētai koknei ir zemāks blīvums, salīdzinot ar neapstrādātu koksni, izkliede ir liela dabisko blīvuma izmaiņu dēļ. Chaouch izpētījis (Chaouch, Pétrissans, et al., 2010a), ka koku sugām ar zemāku blīvumu ir lielāka stabilitāte termiskās apstrādes laikā nekā sugām ar augstāku blīvumu. Nemodificētas apses blīvums 468 ± 35 kg m^{-3}, kas ir nedaudz mazāks nekā Bizika (Biziks et al., 2015) noteiktais 524 kg m^{-3}. Nemodificētas papeles blīvums ir 300 ± 29 kg m^{-3}, kas ir mazāk nekā Chaouch noteiktais *Populus nigra* 437 kg m^{-3}(Chaouch, Petrissans, et al., 2010) un papelei 437 kg m^{-3} (Willems et al., 2013). Atšķirības novērojamas, jo blīvums ir atkarīgs ne tikai no koksnes sugas, bet arī no koka augšanas apstākļiem. Nemodificēta bērza blīvums 599 ± 44 kg m^{-3} sakrīt ar Ruponen noteikto – 568 kg m^{-3}(Ruponen et al., 2015).

3.1.3. Finieru krāsas izmaiņas

Termiskās apstrādes laikā koksne kļuva tumšāka, krāsa ir atkarīga no termiskās apstrādes procesa intensitātes. Lignīna satura pieaugums koksnes termiskās modifikācijas laikā nodrošina tumšāku koksnes krāsu (Lovrić et al., 2014).

Kopējās krāsas izmaiņas (ΔE) ir vizuāli novērojamas, ja to vērtība pārsniedz 4 vienības. Krāsas izmaiņas pēc termiskās apstrādes procesa apkopotas 3.3. tabulā, kur redzams, ka izmaiņas visos režīmos bija vizuāli novērojamas. Būtiskāko ietekmi uz krāsas kopējām izmaiņām atstāj gaišuma parametra L izmaiņas.

3.3. tabula

Finieru krāsas izmaiņas pēc termiskās modifikācijas

Režīms	Vidējās krāsas parametru izmaiņas				Standartnovirze			
	ΔL	Δa	Δb	Deab	ΔL	Δa	Δb	Deab
Bērzs 160/50 WTT	-41.04	8.06	-3.63	42.00	1.16	0.32	0.86	1.15
Apse 160/50 WTT	-40.98	12.23	8.17	43.59	1.86	0.41	1.53	1.42
Papele 160/50 WTT	-40.30	10.78	5.28	42.06	0.47	0.41	1.02	0.33
Bērzs 160/50 VT	-8.41	2.96	3.38	9.58	0.85	0.65	1.46	1.46
Apse 160/50 VT	-8.34	3.21	6.15	10.96	1.47	0.53	0.95	1.12
Papele 160/50 VT	-11.60	4.55	4.67	13.51	3.46	1.87	1.89	3.80
Bērzs 204/120 VT -a	-30.11	5.42	-0.11	30.74	2.58	1.16	2.82	2.63
Apse 204/120 VT-b	-36.09	9.89	7.43	38.21	2.08	0.90	1.74	1.90
Papele 204/120 VT-a	-37.55	11.20	8.34	40.08	1.33	0.50	0.92	1.26
Papele 204/120 VT-b	-37.84	7.75	-0.49	38.72	2.31	0.72	2.18	2.29
Bērzs 214/120 VT -a	-39.95	6.59	-2.42	40.63	2.40	0.97	2.34	2.44
Apse 214/120 VT-b	-45.25	9.99	4.78	46.65	1.59	0.69	2.05	1.56
Papele 214/120 VT-a	-46.61	10.30	3.44	47.89	0.80	1.01	1.31	0.91
Papele 214/120 VT-b	-47.24	7.38	-4.46	48.12	2.02	1.02	2.36	2.11
Bērzs 217/180 VT -a	-41.70	5.59	-5.86	42.58	2.35	1.33	2.47	2.24
Apse 217/180 VT-b	-50.75	9.52	1.53	51.73	1.61	0.77	2.19	1.54
Papele 217/180 VT-a	-50.36	9.89	1.57	51.35	1.71	0.26	0.57	1.68
Papele 217/180 VT-b	-50.49	5.76	-7.94	51.56	2.41	1.75	2.77	2.41
Bērzs 218/30 VT -a	-37.18	6.29	-2.29	37.88	2.20	1.16	2.47	2.20
Apse 218/30 VT-b	-44.67	10.32	5.04	46.19	1.82	0.66	2.22	1.75
Papele 218/30 VT-a	-43.50	9.81	4.22	44.87	2.20	1.16	2.47	2.20
Papele 218/30 VT-b	-45.84	7.03	-5.23	46.79	3.29	1.48	2.88	3.48

*a un b – paralēlie paraugi

Finieru krāsa vismazāk ir mainījusies pēc apstrādes 160/50 VT procesā, kam seko režīms 204/120 VT, 160/50 WTT, 218/30 VT, 214/120 VT, bet būtiskākās izmaiņas novērojamas pēc apstrādes 217/180 VT visām darbā apskatītajām sugām. Ir pētījumi, kas parāda, ka krāsas izmaiņas var tikt lietota kā nedestruktīva metode termiski modificētas masīvkoksnes ražošanas procesa kvalitātes kontrolē (Brischke et al., 2007). ΔL ir negatīvs visos režīmos – finieri kļūst tumšāki, jo palielinās relatīvais lignīna saturs tajos. Δa ir pārsvarī pozitīvs – tonis virzās uz sarkanāku. Δb ir pārsvarā pozitīvs pie maigākiem režīmiem, bet daļai paraugu pie intensīvāka režīma parādās negatīvas Δb vērtības, notiek pāreja no dzeltenīgāka uz neitrālāku brūnu toni. Standartnovirzes ir mazākas par 3-4 vienībām, kas liecina, ka termiskā modifikācija kopumā ir devusi diezgan vienmērīgu krāsas maiņu.

Pētījumā par apses masīvkoksni (Cirule & Kuka, 2015), kas modificēta WTT 170 °C 1 h atklāts, ka krāsas gaišuma parametra ΔL vērtība ir -64.5, kas liecina par temperatūras ietekmi, jo 160/50/WTT režīmā apses ΔL vērtība ir -40.98. Δa attiecīgi 8.3 un 12.23; Δb -0.6 un – 3.63, kopējās krāsas izmaiņas 47.2 un 43.59. Tātad, jo augstāka termiskās apstrādes temperatūra, jo lielākas krāsas izmaiņas, kā arī apse un papele kļūst sarkanāka nekā bērzs, kas saistīts galvenokārt ar hemoceluložu hidrolīzi, lignīna kondensāciju un konjugētu hromoforu veidošanos, kā arī ekstraktvielu tranformāciju, īpaši – fenolisku savienojumu oksidēšanos termiskās modifikācijas procesā (Jančíková & Jablonský, 2025).

3.1.4. Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte

Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte (MEE) lietota, lai raksturotu līdzvara mitruma satura izmaiņu, salīdzinot termiski modificētu un nemodificētu koksni. MEE raksturo modificētu finieru hidrofobitātes pieaugumu. Higroskopisko hemiceluložu sadalīšanās dēļ tiem pārvēršoties mazāk higroskopiskos furānu grupas polimēros, galvenokārt furfurolā un hidroksimetil furfurolā, līdzvara mitrums termiski modificētai koksnei, salīdzinājumā ar nemodificētu, samazinās aptuveni divas reizes (Jämsä et al., 2000; Sandberg et al., 2013). Jo bargāks apstrādes režīms, jo mazāk higroskopisks iegūtais materiāls. Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitātes (MEE) rezultāti redzami 3.4. tabulā.

Bērzs pēc apstrādes vislabāk saglabā savas higroskopiskās īpašības, kas uzskatāma par negatīvu īpašību. Pie apkārtējās vides relatīvā mitruma 30% un 20 °C temperatūras nemodificēta un 160/50 VT bērza MEE ir 5.5, kamēr 160/50 WTT, 214/120 VT un 217/180 VT tā ir 2.7, 2.9 180/30 VT un 3.3 204/120 VT. Līdzīga tendence vērojama arī apsei un papelei un pie relatīvā vides mitruma 65% un 80%. MEE labi korelē ar masas zudumiem – pie MC 30% (r=0.99), pie MC 65% (r=0.99). pie MC 80% (r=0.95).

3.4. tabula

Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitāte

Režīms	Vidējais aritmētiskais rezultāts, %			Standartnovirze, %		
	MC30%	MC 65%	MC 80%	MC 30%	MC 65%	MC 80%
Nemodificēts bērzs	5.5	8.9	12.6	0.2	0.3	0.2
Nemodificēta apse	5.6	8.9	12.6	0.3	0.2	0.3
Nemodificēta papele	5.6	8.2	11.6	0.5	0.4	0.4
Bērzs 160/50 WTT	2.7	5.9	8.7	0.2	0.3	0.7
Apse 160/50 WTT	2.8	5.9	8.3	0.2	0.4	0.6
Papele 160/50 WTT	2.7	5.9	8.5	0.2	0.3	0.6
Bērzs 160/50 VT	5.5	8.6	12.3	0.2	0.2	0.3
Apse 160/50 VT	5.4	8.4	12.2	0.2	0.2	0.4
Papele 160/50 VT	5.2	7.6	11.1	0.4	0.5	0.6
Bērzs 204/120 VT -a	3.3	7.2	11.7	0.2	0.3	0.6
Apse 204/120 VT-b	4.3	6.3	9.4	0.3	0.3	0.3
Papele 204/120 VT-a	3.0	6.3	10.2	0.3	0.5	0.9
Papele 204/120 VT-b	4.1	5.7	8.3	0.3	0.3	0.5
Bērzs 214/120 VT -a	2.8	6.1	9.7	0.2	0.2	0.5
Apse 214/120 VT-b	3.6	5.4	8.0	0.4	0.9	0.5
Papele 214/120 VT-a	2.7	5.4	9.1	0.3	0.4	0.6
Papele 214/120 VT-b	3.4	4.9	7.1	0.5	0.5	0.7
Bērzs 217/180 VT -a	2.6	5.5	9.4	0.2	0.3	0.4
Apse 217/180 VT-b	3.6	5.3	7.8	0.4	0.4	0.4
Papele 217/180 VT-a	2.6	5.2	8.2	0.3	0.4	0.6
Papele 217/180 VT-b	3.1	4.4	6.4	0.8	0.8	0.9
Bērzs 218/30 VT -a	2.9	6.5	10.1	0.2	0.2	0.7
Apse 218/30 VT-b	3.9	5.5	8.0	0.1	0.4	0.3
Papele 218/30 VT-a	2.9	5.8	9.1	0.3	0.5	0.9
Papele 218/30 VT-b	3.7	5.1	7.0	0.4	0.4	0.5

*a un b – paralēlie paraugi

Kolgomorova-Smirnova testa rezultāti attēloti 3.5. tabulā. K-S testa p-vērtība rāda, cik ticami var noraidīt nulles hipotēzi, ka salīdzināmās divas datu kopas nāk no vienādas sadalījuma funkcijas. Ja $p < 0.05$ ($\alpha=0.05$), tad atšķirība tiek uzskatīta par statistiski būtisku.

p-vērtības < 0.05, nozīmē statistiski būtiski atšķirību datu sadalījumā — tas liecina, ka termiskās modifikācijas režīmi būtiski ietekmē mērītos parametrus. Turpmāk darbā noteiktās p-vērtības K-S testā nav attēlotas, jo secinājums ir nemainīgs – modifikācijas režīmi, salīdzinot ar nemodificētiem finieriem pētītās īpašības ietekmē statistiski būtiski.

3.5. tabula

Mitruma adsorbcijas samazināšanas efektivitātes K-S tests

Režīms	p vērtība, salīdzinot ar nemodificētiem finieriem, izmantojot K-S testu		
	MC 30%	MC 65%	MC 80%
Bērzs 160/50 WTT	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Apse 160/50 WTT	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Bērzs 160/50 VT	1.84E-07	2.90E-08	2.90E-08
Apse 160/50 VT	1.84E-07	2.90E-08	1.84E-07
Papele 160/50 VT	1.20E-02	5.33E-06	1.99E-05
Bērzs 204/120 VT a	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Apse 204/120 VT b	1.11E-04	2.90E-08	2.90E-08
Papele 204/120 VT a	5.33E-06	5.33E-06	5.33E-06
Papele 204/120 VT b	1.20E-02	2.75E-05	5.33E-06
Bērzs 214/120 VT a	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Apse 214/120 VT b	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Papele 214/120 VT a	5.33E-06	5.33E-06	5.33E-06
Papele 214/120 VT b	5.33E-06	5.33E-06	5.33E-06
Bērzs 217/180 VT a	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Apse 217/180 VT b	1.06E-06	2.90E-08	2.90E-08
Papele 217/180 a	5.33E-06	5.33E-06	5.33E-06
Papele 217/180 b	5.33E-06	5.33E-06	5.33E-06
Bērzs 218/30 VT a	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Apse 218/30 VT b	2.90E-08	2.90E-08	2.90E-08
Papele 218/30 VT a	5.33E-06	5.33E-06	5.33E-06
Papele 218/30 VT b	5.33E-06	5.33E-06	5.33E-06

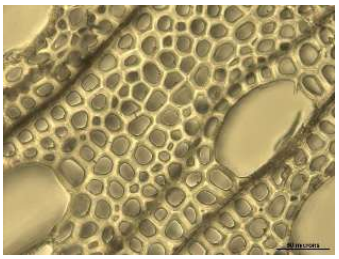
*a un b - paralēlie paraugi

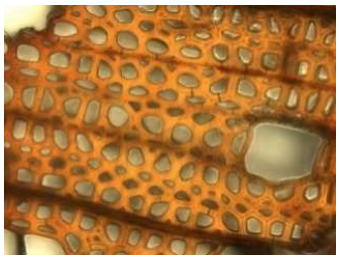
Citi autori nav pētījuši finieru termisko modifikāciju lapkokiem, taču egles masīvkoksnes paraugiem, kas modificēti Thermowood procesā, 180 °C 3 h noteikts, ka MEE visvairāk ietekmē neatgrieziskas ķīmiskas izmaiņas, kas noris koksnes termiskās modifikācijas laikā, tādiem kā hemiceluložu sadalīšanās un kokses termiskās sadalīšanās blakusprodukti koksnes poru aizsprostošanās dēļ (Tarmian & Mastouri, 2019).

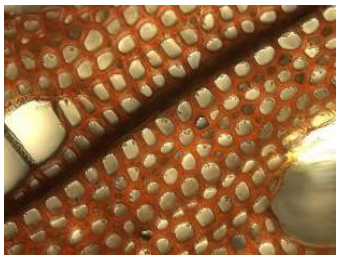
3.1.5. Finieru optiskā mikroskopija

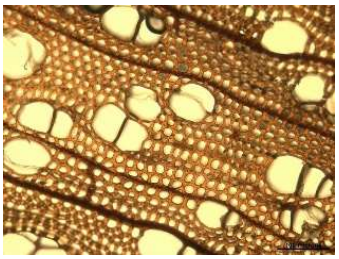
Bērzs, apse un papele pieder pie difūzi-poraino koku sugām un to var novērot šķērsgriezumā (Forest Service & Products Laboratory, 2010). Pēc termiskās apstrādes šūnu sieniņu biezums samazinās, kas novērots vizuāli, pieaugot termiskās apstrādes procesa bargumam. Termiski apstrādāti koksnes paraugi ir trauslāki nekā neapstrādāti, ko secinājis arī Ahmed un citi (Ahmed et al., 2013). Termiskās apstrādes laikā vismazāk ir ietekmētas poras, visvairāk sarukušas celulozes šķiedras, kas šūnām piešķir ovālu formu (Biziks et al., 2013).

Apstrādāto finieru optiskās mikroskopijas rezultāti apskatāmi 3.1. attēlā.

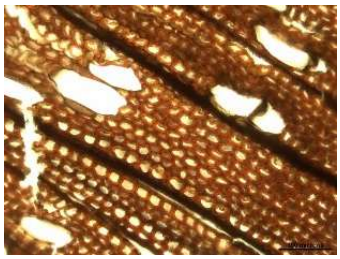

Nemodificēts bērzs

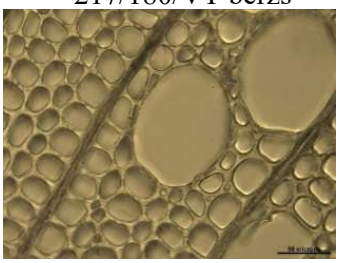

204/120/VT bērzs

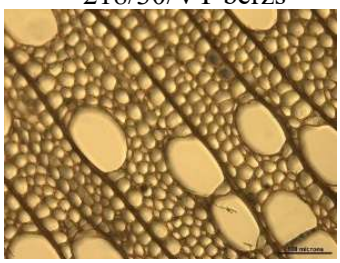

214/120/VT bērzs

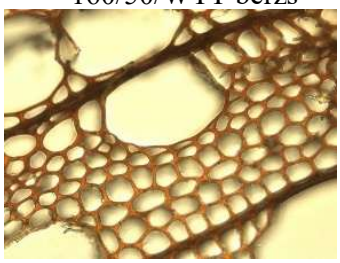

217/180/VT bērzs

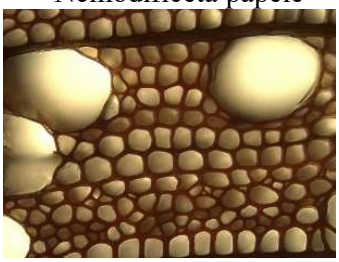
218/30/VT bērzs

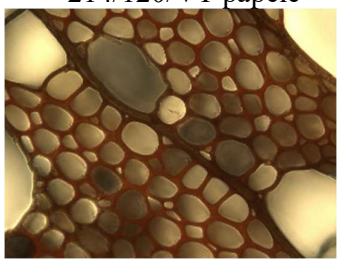

160/50/WTT bērzs


Nemodificēta papele


204/120/VT papele


214/120/VT papele


217/180/VT papele


218/30/VT papele

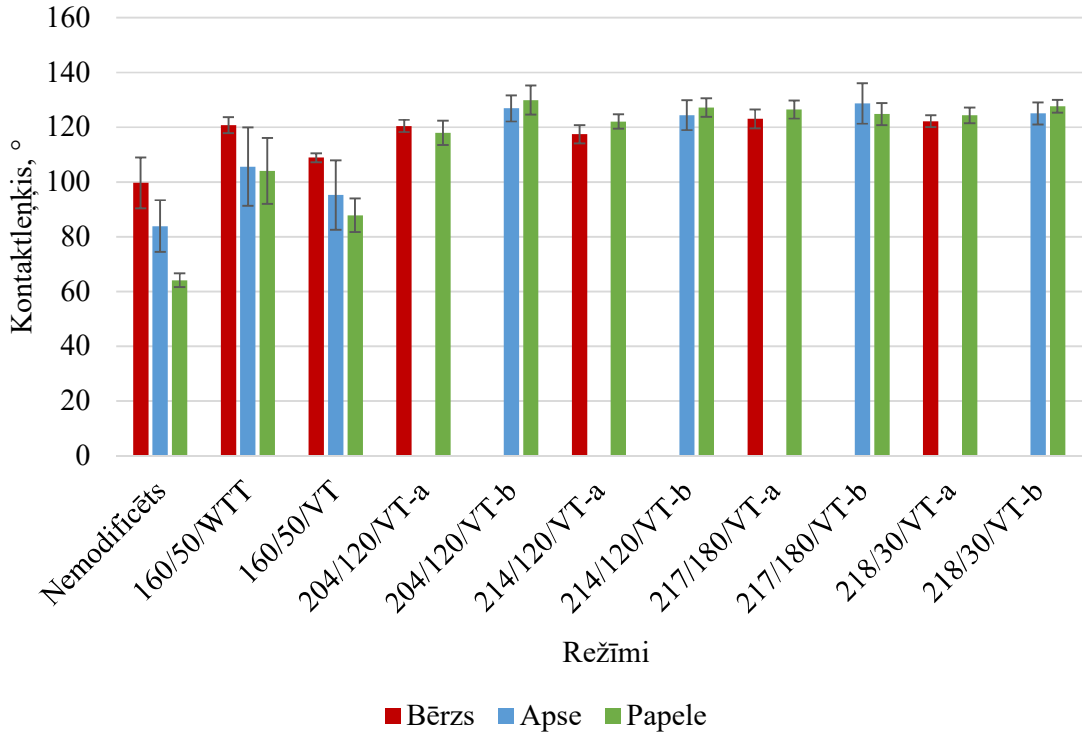
3.1. att. **Mikroskopijas attēli**

Apskatot visus apstrādes režīmus, redzams, ka VT finieru apstrādes tehnoloģija ir saudzīgāka nekā WTT, jo koksnes šūnas mazāk ir degradētas, kas novērots vizuāli. Tas viennozīmīgi ietekmē dažādas finieru īpašības arī finieru robežstiprību un salīmējamību.

3.1.6. Finieru virsmas kontaktleņķis

Neapstrādātu, VT un WTT procesā apstrādātu finieru kontaktleņķa mērījumi ļauj novērtēt termiskās apstrādes ietekmi uz virsmas hidrofobitāti. Saplākšņa ražošanā labu adhēziju veido saistība starp koksnes virsmu un līmi molekulārā līmenī, ko ietekmē līmes plūstamība pa virsmu. Finieru virsmas kontaktleņķu vidējās vērtības un standartnovirzes redzamas 3.2. attēlā. Kontaktleņķa vērtība virs 90° liecina par virmas hidrofobitāti uz zemu slapinājamību. Par hidrofīliem 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 ārā apstākļos, tomēr termiski modificēta koksne arī žūst lēnāk (Cirule et al., 2020).



3.2. att. **Finieru virsmas kontaktleņķi**

Santoni un Pizzo (Santoni & Pizzo, 2011) noteiktais kontaktleņķis neapstrādātai apsei bija 51°, bet Diouf (Diouf et al., 2011) ziņo par hibrīdapses kontaktleņķi 68 ± 8º un 73 ± 6º, kas sakrīt ar šajā pētījumā novēroto kontaktleņķi apsei 84 ± 9º . Lai kontaktleņķa mērījumi būtu pilnīgi salīdzināmi, tiem jābūt vienotai pētījuma veikšanas metodikai – ūdens piliena izmēram, rezultāta nolasīšanas laikam un paraugu priekšapstrādei.

Nemodificēta bērza finieru hidrofobitāte varētu būt saistīta ar ekstraktvielu koncentrēšanos uz virsmas pēc lobīšanas procesa, jo bērzam ir augstāks ekstraktvielu saturs nekā apsei un papelei, kā arī divreiz lielāks blīvums. Koksne ar zemāku blīvumu uzrāda labāku izturību pret termisko sadalīšanos (Chaouch, Pétrissans, et al., 2010b).

3.1.7. Finieru virsmas profili

Virsmas profilu raksturošanai izvēlēts 10 maksimālu punktu vidējais raupjums R_{zjis}. Virsmas raupjums ir īpašība, kas tieši ietekmē finieru virsmas salīmējamību, kas ir būtiska saplākšņa ražošanā. Virsmas profilu R_{zjis} rezultāti redzami 3.6. tabulā.

3.6. tabula

Finieru virsmas raupjums

Režīms	Virmas raupjums R_{jzis}, µm	Standartnovirze, µm
Nemodificēts bērzs	35	7
Nemodificēta apse	56	14
Nemodificēta papele	52	17

3.6.tabulas nobeigums

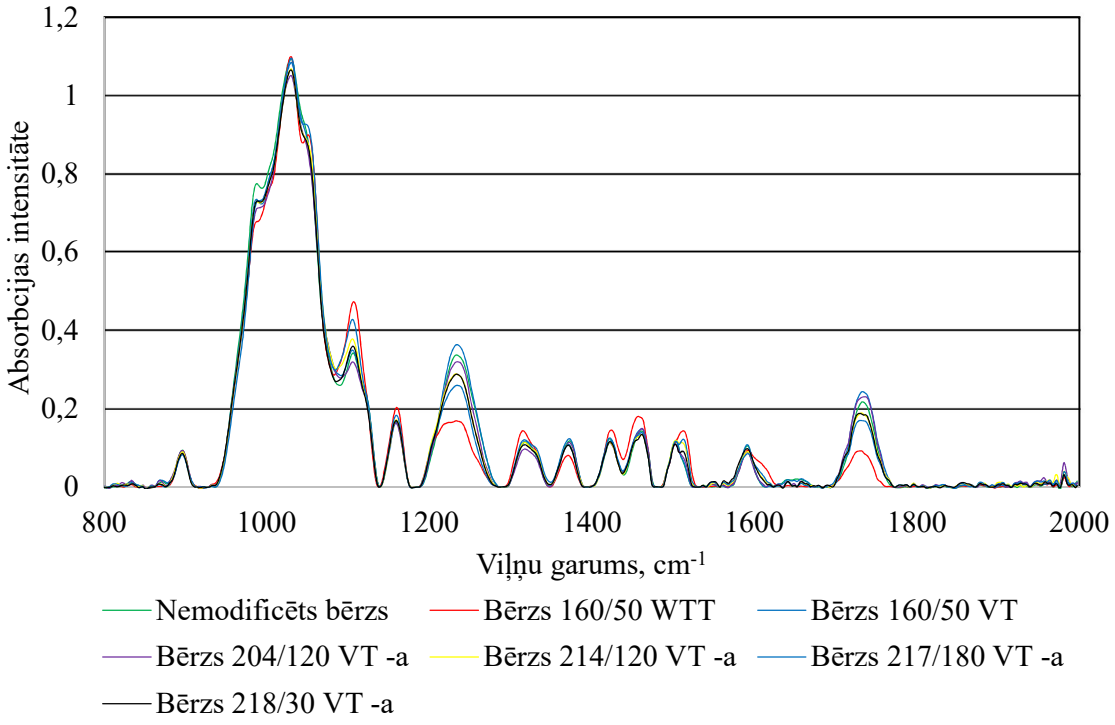
Režīms	Virmas raupjums R_{jzis}, µm	Standartnovirze, µm
Bērzs 160/50 WTT	8	1
Apse 160/50 WTT	20	6
Papele 160/50 WTT	39	17
Bērzs 160/50 VT	40	14
Apse 160/50 VT	28	7
Papele 160/50 VT	46	7
Bērzs 204/120 VT -a	23	2
Apse 204/120 VT-a	39	10
Papele 204/120 VT-b	*	36
Bērzs 214/120 VT -a	17	1
Apse 214/120 VT-a	36	8
Papele 214/120 VT-b	30	5
Bērzs 217/180 VT -a	13	5
Apse 217/180 VT-a	37	6
Papele 217/180 VT-b	39	12
Bērzs 218/30 VT -a	14	7
Apse 218/30 VT-a	22	5
Papele 218/30 VT-b	43	19

a un b – paralēlie paraugi
Piezīme: *- bez rezultāta tehnisku iemeslu dēļ

Savstarpēji salīdzinot sugas, nemodificētam bērza finierim ir mazāks virsmas raupjums nekā apsei un papelei. 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 hidrofīlas virsmas un tādējādi palielina ūdens uzsūktspēju (Keržič et al., 2021).

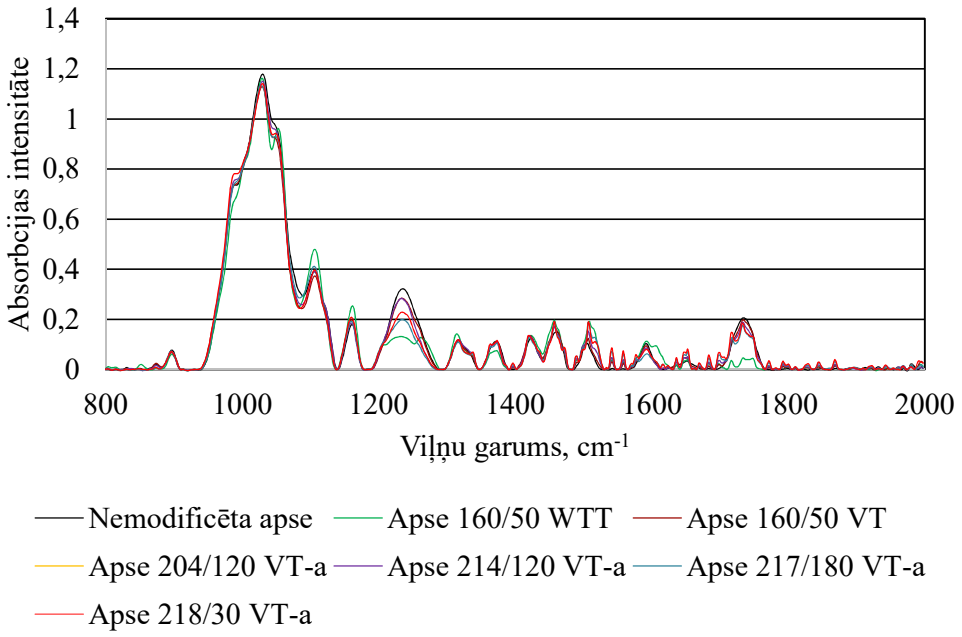
3.1.8. Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija (FTIR)

Būtiskākās izmaiņas bērza FTIR spektrā termiskās modifikācijas dēļ (skat. 3.3. att.) novērojamas absorbcijas joslas 1732 līdz 1740 cm^{-1} intensitātes zudums, kas attēlo C=O grupas izmaiņas karbonil, uronil un acetil grupu izmaiņas hemicelulozēs un ksilānā. Straujākais intensitātes zudums ir režīmam 160/50 WTT. Līdzīgas izmaiņas redzamas otrajā hemicelulozes raksturojošajā absorbcijas joslā 1231 līdz 1235 cm^{-1}, kas liecina par hemiceluložu destrukciju termiskās apstrādes laikā, turklāt WTT process izraisa lielāku hemiceluložu sadalīšanos nekā VT process. Absorbcijas joslā 1108 līdz 1051 cm^{-1} turpretī vērojams intensitātes pieaugums, kas raksturo celulozes C-O saites otrējos spirtos un liecina par celulozes satura pieaugumu koksnes finieros hemiceluložu destrukcijas dēļ.



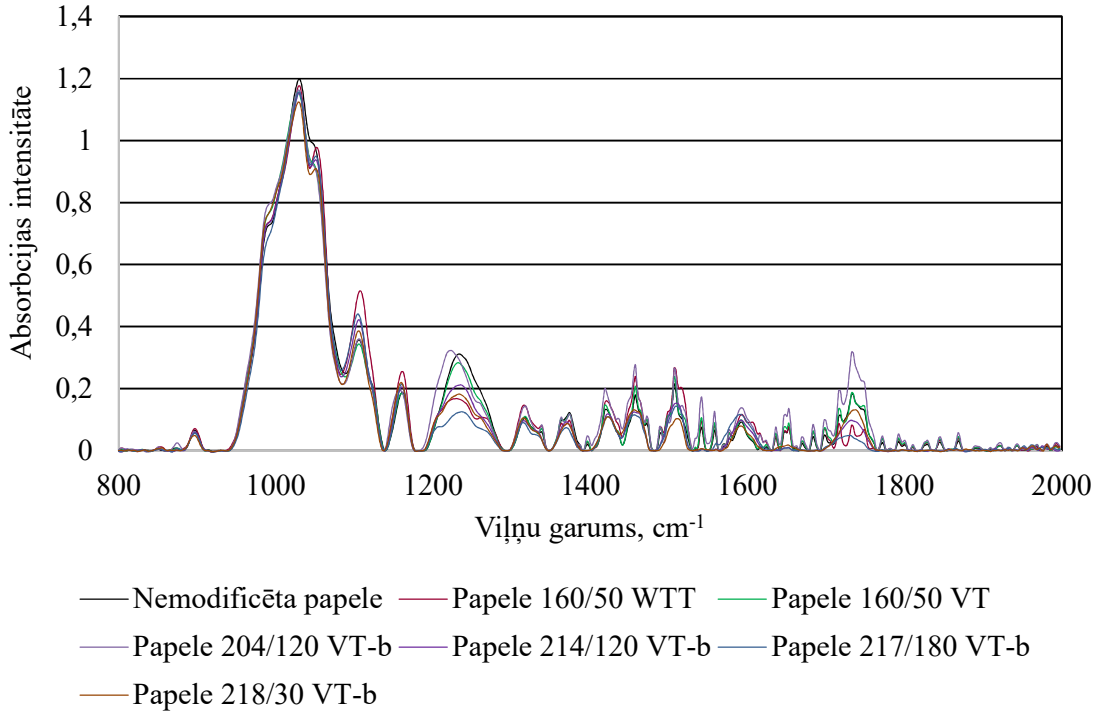
3.3. att. **Bērza FTIR spektru raksturojošais apgabals.**

Aplūkojot izmaiņas apses FTIR spektros (skat. 3.4. att.), novērojamas tās pašas tendences, kas bērza FTIR spektru gadījumā – būtiskākais intensitātes kritums absorbcijas joslās 1732 līdz 1740 cm^{-1} un 1231 līdz 1235 cm^{-1} raksturīgs režīmam 160/50 WTT, kas liecina par to, ka termiskās apstrādes procesā notiekošās izmaiņas finieru ķīmiskajā sastāvā ir līdzīgas lapkoku sugām. Apses 160/50 WTT apstrādātiem finieriem vērojams arī absorbcijas joslas 1159 līdz 1166 cm^{-1} intensitātes pieaugums, kas liecina par lignīna satura pieaugumu, raksturojot C=O konjugētās esteru grupas lignīnā.



3.4. att. **Apses FTIR spektru raksturojošais apgabals.**

Papeles FTIR spektros (skat. 3.5. att.) straujākais absorbcijas joslas 1231 līdz 1235 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.



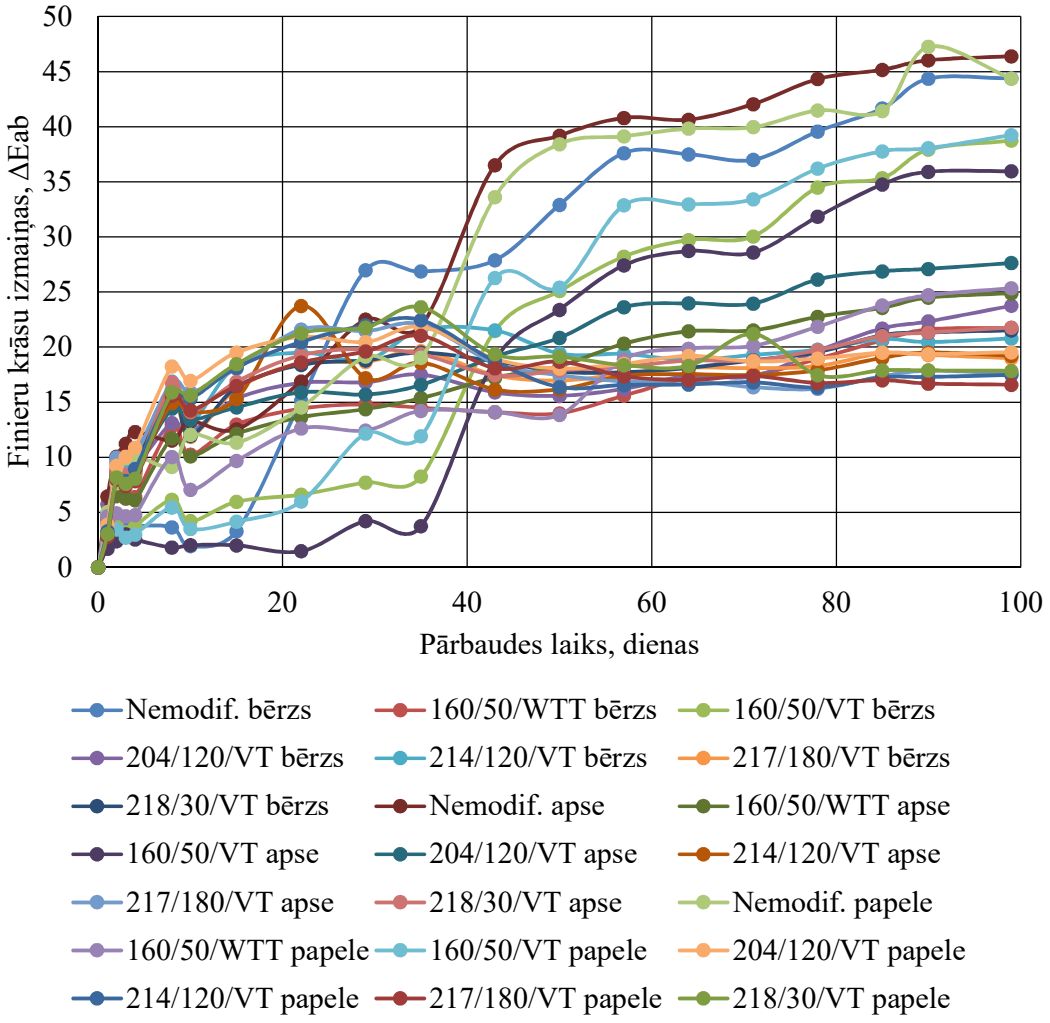
3.5. att. **Papeles FTIR spektru raksturojošais apgabals.**

FTIR spektri termiski modificētiem lapkoku finieriem literatūrā nav plaši pētīti, taču, pētot Thermowood procesā termiski modificētu egles masīvkoksni, kas modificēta 212 °C 90 min režīmā, pēc FTIR spektriem noskaidrots, ka termiskā modifikācija potenciāli varētu uzlabot koksnes bioizturību pret baltās trupes sēni (*Tramentes versicolor*) un brūnās trupes sēni (*Coniphora puteana*) (Ozgenc et al., 2018).

3.1.9. Finieru novecināšana āra apstākļos

Finieru krāsas izmaiņas, tos novecinot āra apstākļos attēlotas 3.6. attēlā Redzams, ka vislielākās kopējās krāsas izmaiņas notikušas nemodificētai apsei, papelei un bērzam (ΔEab attiecīgi 46.4, 44.4 un 44.4), kas apliecina, ka nemodificēta lapkoku koksne ir neizturīga ārējās vides ietekmē. Arī režīmā 160/50 VT modificētiem finieriem ir līdzīgi rezultāti (ΔEab attiecīgi 36.0, 39.2 un 38.7), tam seko 204/120 VT apse (ΔEab=27.6). Simts dienas pēc eksperimenta sākuma visi paraugi bija pārklājušies ar zilējumu, tāpēc šie beigu krāsas rādījumi lielā mērā raksturo paraugu bioloģiskā apauguma pakāpi. Dabiskās novecināšanas rezultātā notikušās paraugu krāsas izmaiņas savukārt raksturo rezultāti no 0 līdz 35. dienai. Sākotnējās krāsas izmaiņas vismazākās ir gaišākajiem paraugiem – 160/50 VT režīmā modificētajiem finieriem. Starp sugām visizturīgākā pret krāsas maiņu apkārtējās vides ietekmē ir apse. Dabiskās novecināšanas rezultātā paraugu raupjums pieaudzis daudz vairāk nekā mākslīgās novecināšanas gadījumā, kas saistāms ar biotisko un abiotisko faktoru sinerģiju (Keržič et al.,

2021). Kopumā pētījumā iekļautie apses, papeles un bērza finieri nav izturīgi pret apkārtējās vides ietekmi un tāpēc nebūtu rekomendējams bez tālākas apstrādes tos lietot āra apstākļos.

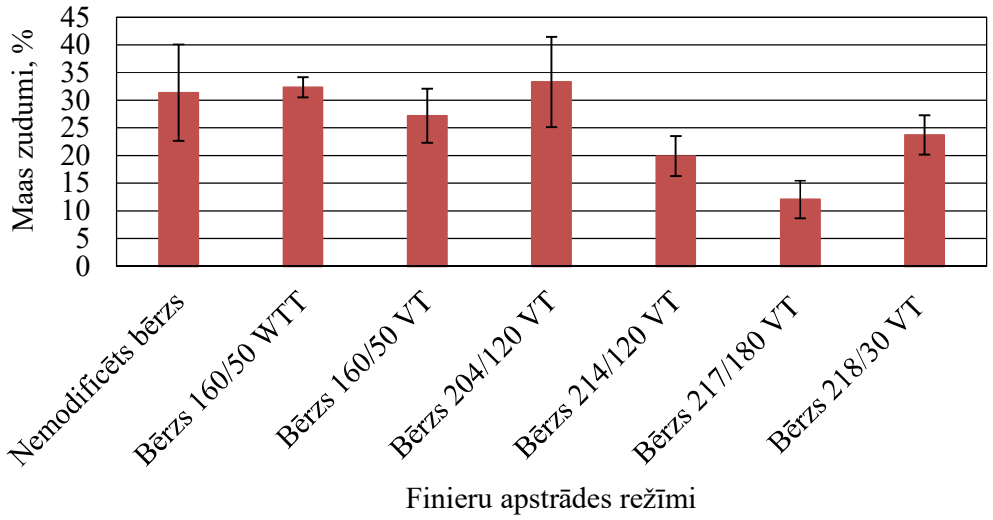


3.6. att. **Finieru kopējās krāsas izmaiņas, tos novecinot āra apstākļos**

Veicot FTIR spektru uzņemšanu pēc novecināšanas, praktiski nav novērojamas atšķirības starp modificēšanas režīmiem. Ir būtiski samazinājusies absorbcijas joslu intensitāte apgabalā no 1230 cm^{-1} līdz 1800 cm^{-1}, absorbcijas joslās, kas raksturo hemiceluložu un lignīna destrukciju apkārtējās vides ietekmē, saglabājoties absorbcijas joslām pie 1108 līdz 1110 cm^{-1}, 1159 līdz 1166 cm^{-1}, kas raksturo celulozi. Arī ksilāna C_1-H anomērā oglekļa raksturojošā absorbcijas josla pie 895 līdz 903 cm^{-1} ir saglabājusies pēc novecināšanas. Savukārt apses, kas modificēta WTT procesā 170 °C 1 h. FTIR spektrā pēc apstarošanas ar gaismu, ir novērotas izmaiņas 1730 cm^{-1} (nekonjugētas karbonilgrupas), 1160 cm^{-1} (ogļhidrāti) un 1510 cm^{-1}, 1460 cm^{-1} (lignīns), kas liecina par atšķirībām starp dabiskās un mākslīgās novecināšanas procesu (Cirule et al., 2021).

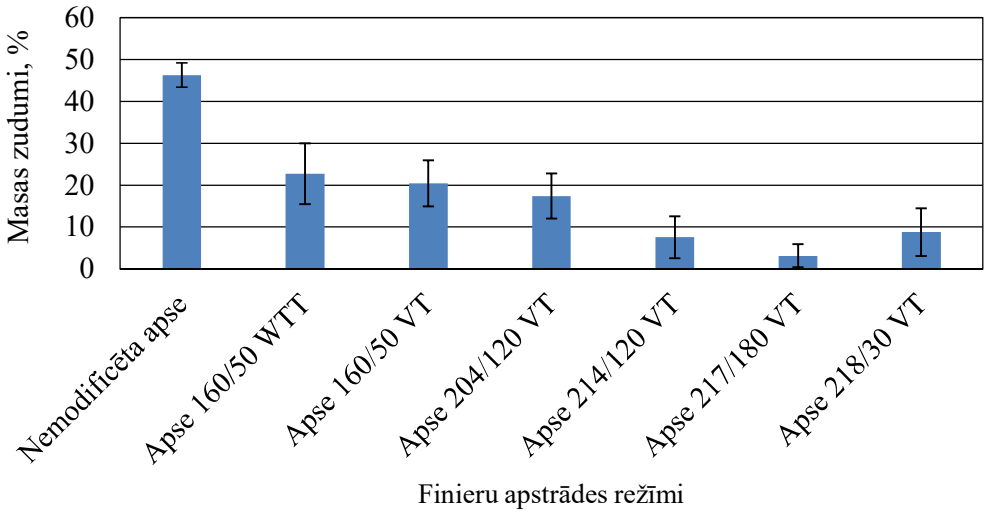
3.1.10. Finieru bioizturība

Finieru bioizturības indikatīvā testa rezultāti nozīmīgi atšķiras atkarībā no koksnes sugas (skat. 3.7., 3.8. un 3.9. att.). Bērza finieru izturība pret brūnās trupes sēni *Coniophora puteana* termiskās apstrādes rezultātā pieaug nedaudz, izņemot apstrādes režīmus 214/120 VT un 217/180 VT (skat. 3.7. att.).



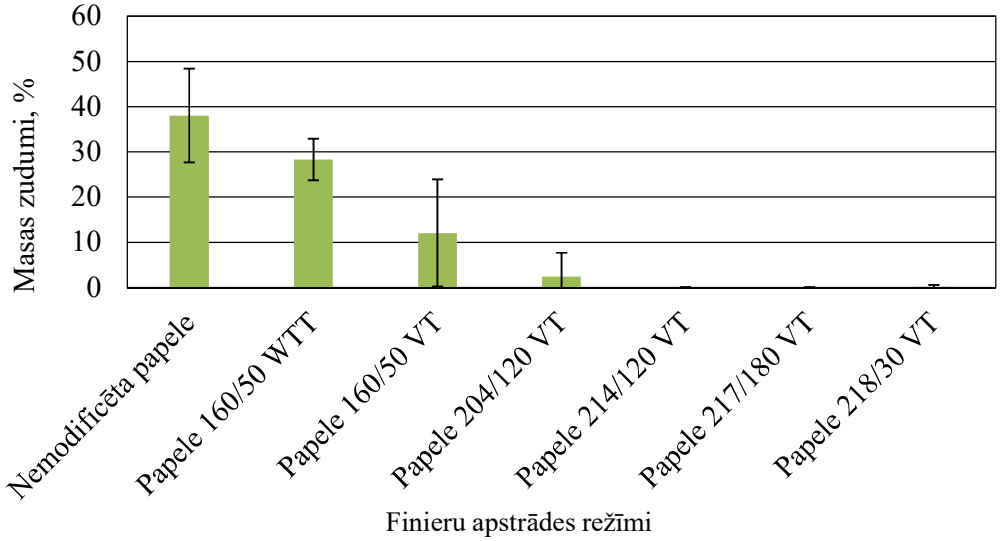
3.7. att. **Bērza finieru bioizturības rezultāti**

Tomēr pat labākais rezultāts nesasniedz standartā EN 12038 (2002) noteikto 3 % robežu. Savukārt uz apses finieriem termiskās apstrādes ietekme ir būtiska un 217/180 VT režīmā apstrādātā apse sasniedz standartā noteikto bioizturības robežvērtību (skat. 3.8. att.).



3.8 att **Apses finieru bioizturības rezultāti**

Uz papeli šī ietekme ir vēl nozīmīgāka un 214/120 VT un 217/180 VT režīmos netika novēroti masas zudumi bazīdijsēnes *Coniophora puteana* ietekmē (skat. 3.9. att.).

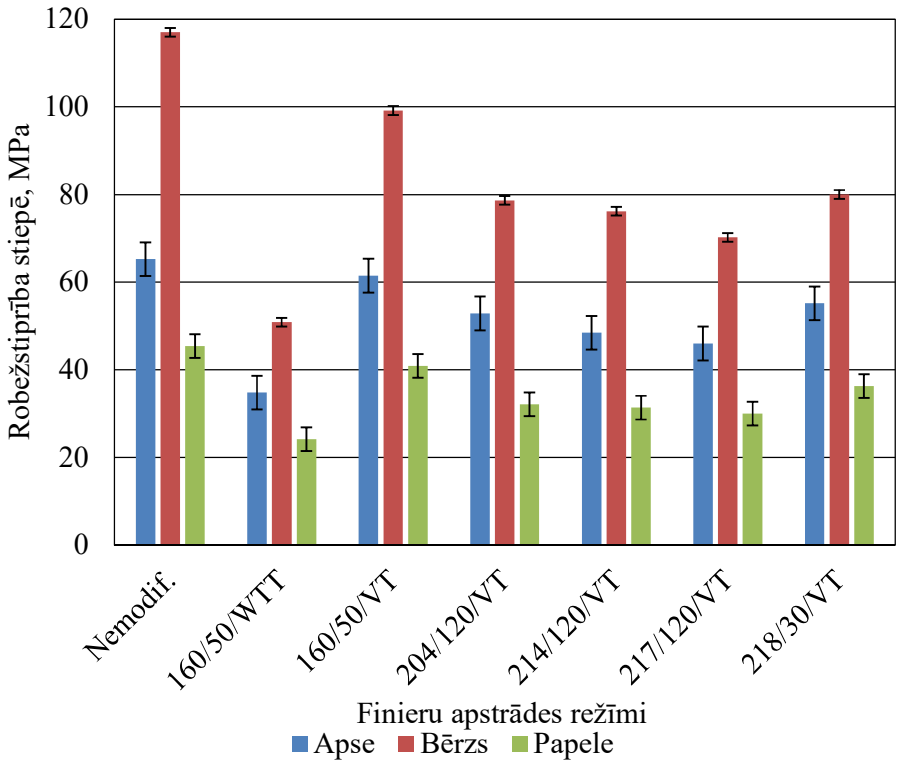


3.9. att **Papeles finieru bioizturības rezultāti**

Šie rezultāti norāda uz augstu bioizturības līmeni, jo masas zudumi zem 3% liecina par atbilstību 1. klasei – ļoti bioizturīgs materiāls. Kopumā, termiskā modifikācija ievērojami uzlabo papeles finieru izturību pret brūnās trupes sēni laboratorijas apstākļos. Literatūrā nav pieejami dati par termiski modificētu finieru bioizturību, taču masīvkoksni, egli, termiski modificējot piesātinātā tvaikā 160 °C pāris stundas, tās masas zudums *Coniphora putean*a ietekmē bija 35.6 ± 5.3%, taču 180 °C masas zudums bija tikai 1.1 ± 0.4% (Karlsson et al., 2011), kas raksturo termiskās modifikācijas temperatūras nozīmīgo ietekmi uz bioizturību. VT procesā modificētiem bērza finieriem ir augsta korelācija starp masas zudumiem pēc termiskās modifikācijas un bioizturību (r=0.97) (Meija-Feldmane et al., 2020).

3.1.11. Finieru robežstiprība stiepē

Robežstiprības novērtējuma datu kopā bojāto paraugu skaits ir nenozīmīgs, tādējādi izlašu apjoms vidēji ir 20 paraugi. Finieru robežstiprība ir viens no būtiskākajiem rādītājiem, kas ietekmē saplākšņu stiprību (skat. 3.10. att.).



3.10. att. **Finieru robežstiprība stiepē**

Tāpēc šiem konkrētajiem datiem veikta normalitātes pārbaude, lai noskaidrotu, vai ir iespējams veikt dispersiju analīzi un detalizētāk izpētīt rezultātus.

Pārbaudes, vai visu bērza finieru režīmu dati atbilst normālajam sadalījumam veic ar Kolmogorova-Smirnova vai Šapiro – Vilka testu. Testa rezultāti redzami 3.7. tabulā.

3.7. tabula

Normalitātes pārbaude bērza finieriem

Režīms	**Kolmogorova-Smirnova tests**			**Šapiro-Vilka tests**		
	Statistiskais nozīmīgums	**Brīvības pakāpes**	**p - vērtība**	**Statistiskais nozīmīgums**	**Brīvības pakāpes**	**p - vērtība**
Nemodificēti	0.09	20	0.20*	0.98	20	0.98
160/50/WTT	0.15	20	0.20*	0.94	20	0.278
160/50/VT	0.15	20	0.20	0.94	20	0.278
204/120/VT	0.16	20	0.20	0.93	20	0.13
214/120/VT	0.10	19	0.20	0.99	19	0.99
214/120/VT	0.098	19	0.20	0.99	19	0.99
217/180/VT	0.15	18	0.20	0.96	18	0.61
218/30/VT	0.17	17	0.20	0.92	17	0.14

Redzams, ka visiem režīmiem Šapiro-Vilka testā p-vērtība ir krietni lielāka par 0.05, tāpēc ar varbūtību 95% hipotēzi, ka dati neatbilst normālajam sadalījumam, var noraidīt.

Vairākās izlasēs datu skaits atšķiras, jo bija vairāki bojāti paraugi, kuru plīsums slogošanas laikā neatbilda prasībām. Ar Lēvena testu novērtē, vai visām datu kopām sakrīt dispersijas. Rezultāti attēloti 3.8. tabulā.

3.8. tabula

Bērza finieru robežstiprības rezultātu dispersiju salīdzinājums

Rādītājs	Levēna statistika	Pirmā brīvības pakāpe	Otrā brīvības pakāpe	p-vērtība
Aprēķināts pēc vidējā	1.35	4	89	0.26
Aprēķināts pēc mediānas	1.03	4	89	0.40
Aprēķināts pēc mediānas, ņemot vērā brīvības pakāpes	1.03	4	77.16	0.40
Aprēķināts pēc sakārtota vidējā	1.27	4	89	0.29

Tā kā visas p-vērtības > 0.05 (Levēna testā), tad var apgalvot, ka ar 95% ticamību hipotēzi H_0 ($H_0 : \delta_1^2 = \delta_2^2 = \delta_3^2 = \delta_4^2 = \delta_5^2,$) nevar noraidīt, un visu sešu izlašu dispersijas būtiski neatšķiras, tātad var veikt ANOVA dispersijas analīzi. Tās rezultāti tabulā 3.9. parāda, ka dati izlasēs atšķiras būtiski, jo p- vērtība=0.00 < 0.05, kā arī to apstiprina Fišera vērtība $F_{novērotais} = 26.51 > F_{(89;4)} = 2.47$, kurai izpildās nevienādība, pie tam, nav viltoti lielā F aprēķinātā vērtība, kas dažkārt izkropļo rezultātus.

3.9. tabula

Bērza finieru robežstiprības datu būtiskums

Parametrs	Dispersijas	Brīvības pakāpe	Standartkļūdas	F novērotais	p-vērtība
Aprēķinātā dispersija (ESS)	59778.32	6	9963.05	26.51	0.00
Novērtētā dispersija (RSS)	47721.44	127	375.76	-	-
Kopējā dispersija (TSS)	107499.75	133	-	-	-

Lai novērtētu termiskās modificēšanas rezultātus un saprastu, kurš režīms ir vispiemērotākais, ar Bonferroni testu salīdzina visus rezultātus pa pāriem, pētot iespējamās atšķirības savā starpā, lai izvēlētos piemērotāko. Bonferroni testa rezultāti redzami 3.10. tabulā.

3.10. tabula

Bērza finieru modificēšanas režīmu savstarpēja salīdzināšana pēc robežstiprības

Apskatāmais režīms	Salīdzināmie režīmi	Vidējo rādītāju atšķirība	Standartnovirze	p-vērtība	95% ticamība	
					Apakšējā robeža	Augšējā robeža
Nemodificēts	160/50/WTT	66.17*	6.13	0.00	47.17	85.18

3.10. tabulas noslēgums

Apskatāmais režīms	Salīdzināmie režīmi	Vidējo rādītāju atšķirība	Standartnovirze	p-vērtība	95% ticamība	
					Apakšējā robeža	Augšējā robeža
	160/50/VT	66.17*	6.13	0.00	47.17	85.18
	204/120/VT	38.34*	6.13	0.00	19.33	57.34
	214/120/VT	40.82*	6.21	0.00	21.57	60.07
	217/180/VT	46.83*	6.30	0.00	27.30	66.36
	218/30/VT	37.01*	6.40	0.00	17.18	56.83
160/50/WTT	Nemodificēts	-66.17*	6.13	0.00	-85.18	-47.17
	160/50/VT	0.00	6.13	1.00	-19.01	19.01
	204/120/VT	-27.84*	6.13	0.00	-46.84	-8.83
	214/120/VT	-25.35*	6.21	0.00	-44.60	-6.10
	217/180/VT	-19.34	6.30	0.06	-38.87	0.19
	218/30/VT	-29.16*	6.40	0.00	-48.99	-9.34
160/50/VT	Nemodificēts	-66.17	6.13	0.00	-85.18	-47.17
	160/50/WTT	0.00	6.13	1.00	-19.01	19.01
	204/120/VT	-27.84*	6.13	0.00	-46.84	-8.83
	214/120/VT	-25.35	6.21	0.00	-44.60	-6.10
	217/180/VT	-19.34	6.30	0.06	-38.87	0.19
	218/30/VT	-29.16	6.40	0.00	-48.99	-9.34
204/120/VT	Nemodificēts	-38.34*	6.13	0.00	-57.34	-19.33
	160/50/WTT	27.84*	6.13	0.00	8.83	46.84
	160/50/VT	27.84*	6.13	0.00	8.83	46.84
	214/120/VT	2.49	6.21	1.00	-16.77	21.74
	217/180/VT	8.50	6.30	1.00	-11.03	28.02
	218/30/VT	-1.33	6.40	1.00	-21.15	18.50
214/120/VT	Nemodificēts	-40.82	6.21	0.00	-60.07	-21.57
	160/50/WTT	25.35	6.21	0.00	6.10	44.60
	160/50/VT	25.35	6.21	0.00	6.10	44.60
	204/120/VT	-2.48	6.21	1.00	-21.74	16.77
	217/180/VT	6.01	6.38	1.00	-13.76	25.78
	218/30/VT	-3.81	6.47	1.00	-23.87	16.25
217/180/VT	Nemodificēts	-46.83	6.30	0.00	-66.36	-27.30
	160/50/WTT	19.34	6.30	0.06	-0.19	38.87
	160/50/VT	19.34	6.30	0.06	-0.19	38.87
	204/120/VT	-8.50	6.30	1.00	-28.02	11.03
	214/120/VT	-6.01	6.38	1.00	-25.78	13.76
	218/30/VT	-9.82	6.56	1.00	-30.15	10.50
218/30/VT	Nemodificēts	-37.01*	6.40	0.00	-56.83	-17.18
	160/50/WTT	29.16*	6.40	0.00	9.34	48.99
	160/50/VT	29.16	6.40	0.00	9.34	48.99
	204/120/VT	1.33	6.40	1.00	-18.50	21.15
	214/120/VT	3.81	6.47	1.00	-16.25	23.88
	217/180/VT	9.82	6.56	1.00	-10.50	30.15

*Vidējā vērtība ir būtiska pie ticamības līmeņa 95%

Katrs no režīmiem ir salīdzināts ar 6 pārējiem. Lai novērtētu, vai rezultāti būtiski atšķiras, vērtē p-vērtības. Ja vērtē rezultātus ar varbūtību 95%, tad teorētiskā p-vērtība pirms salīdzināšanas ir jākoriģē , tas ir, jādala ar C_5^2=10, tātad, teorētiskā p-vērtība ir 0.05:10=0.005.

No Bonferroni testa rezultātiem var secināt, ka visi termiski modificētie bērza finieri statistiski būtiski atšķiras nemodificētiem finieriem. Režīmi 204/120/VT, 214/120/VT un 218/30/VT sniedz līdzīgu efektu un savsatrpēji nav statistiski atšķirīgi. Un no šī var secināt, ka, ja nepieciešama maksimāla modificētības pakāpe, tad piemērotākais režīms ir 217/180/VT, kuram tad attiecīgi tālāk tiks veikts dzīves cikla novērtējums un uz kura bāzes tiks veikti ekonomiskie aprēķini.

Šāda datu matemātiskā analīze veikta tikai finieru robežstiprībai kā vienam no svarīgākajiem parametriem, kas ietekmē saplākšņa kā produkta stiprību un datu apstrāde veikta bērzam, jo tas robežstiprības stiepes testos uzrāda augstāko stiprību.

3.1.12. Finieru raksturošanas apakšnodaļas kopsavilkums

Rezultātu sadaļa par termiski modificētu bērza, apses un papeles finieru raksturojumu sniedz detalizētu pārskatu par termiskās apstrādes ietekmi uz materiālu fizikālajām, ķīmiskajām un bioloģiskajām īpašībām.

1. **Termiskās modifikācijas procesu salīdzinājums**. Termiskā apstrāde pazeminātā spiedienā (VT — Termovuoto process) ir saudzīgāka par apstrādi tvaika vidē (WTT). Tiek norādīts, ka pie vienādiem apstrādes režīmiem (160/50) WTT procesā radās 5.2 līdz 6.7% masas zudumi, kamēr VT procesā masas zudumi bija minimāli – 0.1 līdz 1.2%. Masas zudumi, kas ir galvenais termiskās apstrādes intensitātes raksturlielums, rodas galvenokārt hemiceluložu sadalīšanās dēļ, kas ar VT procesu tiek aizvadīti no sistēmas, nodrošinot lēnāku to tālāku noārdīšanos,.
2. **Fizikālās un mehāniskās īpašības**
   - Masas zudumi un blīvums: masas zudumi pieaug, palielinoties apstrādes temperatūrai un laikam. Apse konsekventi uzrādīja mazāko termiskās degradācijas līmeni visos režīmos. Kolmogorova-Smirnova tests apliecināja, ka termiski modificēto finieru blīvums visos režīmos būtiski atšķiras no nemodificētajiem.
   - Hidrofobitāte un mitruma samazināšanās efektivitāte (MEE): Termiski modificētai koksnei līdzsvara mitrums, salīdzinot ar nemodificētu, samazinās aptuveni divas reizes. MEE, kas raksturo modificētu finieru hidrofobitātes pieaugumu, labi korelē ar masas zudumiem (r=0.95 līdz 0.99). Kontaktleņķa vērtība virs 90° (kas liecina par virsmas hidrofobitāti) netika sasniegta tikai nemodificētai apsei, nemodificētai papelei un 160/50 VT režīmā apstrādātās apses finieriem.
   - Robežstiprība stiepē: termiskās modifikācijas rezultātā bērza finieru robežstiprība stiepē, salīdzinot ar nemodificētu finieri, statistiski būtiski samazinās. Ja nepieciešama maksimāla modificētības pakāpe, piemērotākais režīms ir 217/180/VT.
3. **Ķīmiskās un virsmas izmaiņas**
   - Krāsas un virsmas profils: termiskās apstrādes rezultātā koksne kļuva tumšāka, un krāsas izmaiņas (ΔE) visos režīmos bija vizuāli novērojamas. Gaišuma parametra (ΔL) negatīvās vērtības liecina par relatīvā lignīna satura pieaugumu finieros. Nemodificētam bērza finierim ir mazāks virsmas raupjums (Rzjis) nekā apsei un papelei.
   - FTIR spektroskopija: novērotas būtiskas izmaiņas absorbcijas joslās, kas raksturo C=O grupas un acil-skābekļa saites stiepšanos hemicelulozēs un ksilānā (1732 līdz 1740 cm^{-1} un 1231 līdz 1235 cm^{-1}), apstiprinot hemiceluložu destrukciju.

- Mikroskopija: Vizuāli novērots, ka, pieaugot termiskās apstrādes bargumam, šūnu sieniņu biezums samazinās, un VT apstrāde ir mazāk degradējoša nekā WTT.

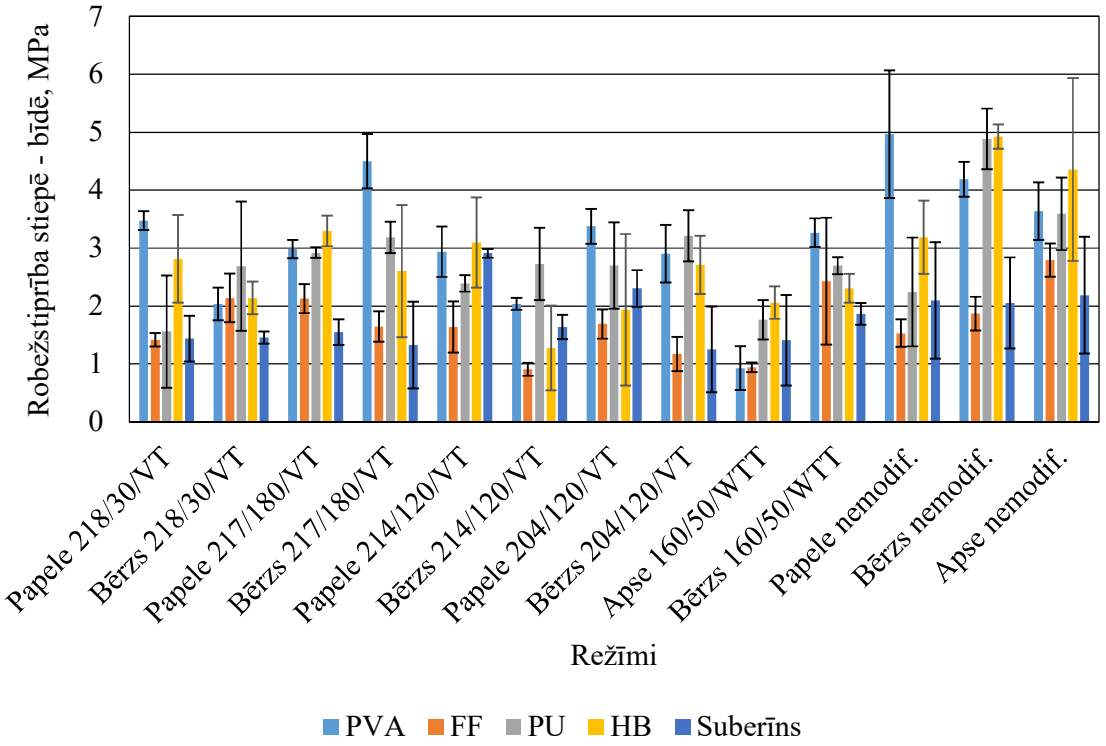
4. **Bioizturība un novecināšana**
   - Bioizturība: termiskās apstrādes ietekme uz finieru izturību pret brūnās trupes sēni (*Coniophora puteana*) ir atkarīga no sugas. Bērza finieru bioizturība pieaug nedaudz, bet apses un papeles finieriem tā ir nozīmīga. Papeles finieriem, kas apstrādāti 214/120 VT un 217/180 VT režīmos, netika novēroti masas zudumi, norādot uz augstu bioizturības līmeni.
   - Āra novecināšana: novecināšanas testos āra apstākļos visi nemodificētie finieri uzrādīja lielākās kopējās krāsas izmaiņas, apliecinot lapkoku koksnes neizturību pret ārējo vidi. Pēc 100 dienām visi paraugi bija pārklājušies ar zilējumu, kas liecina par bioloģisko apaugumu. Tāpēc šos finierus bez tālākas apstrādes nav ieteicams lietot āra apstākļos.

3.2. Saplākšņa līmēšana

Lai noskaidrotu iespējas termiski modificētos finierus pielietot saplākšņa ražošanai, vispirms veikts indikatīvais tests par dažādu komerciālo un inovatīvās suberīnskābju saistvielas pielietošanas iespējām. Pēc tam veikti pilnie testi atbilstoši standartu EN 314-1:2004 un EN 314-2:1993 prasībām.

3.2.1. Līmes adhēzijas izturība perpendikulāri šķiedrai

Pirms veikt pilnos saplākšņa līmēšanas testus ar komerciālajām līmēm un suberīnskābju saistvielu, veikts indikatīvais tests, ar kura palīdzību var noteikt līmes adhēzijas izturību perpendikulāri šķiedrai. Līmējuma stiprības rezultāti 3.11. attēlā.

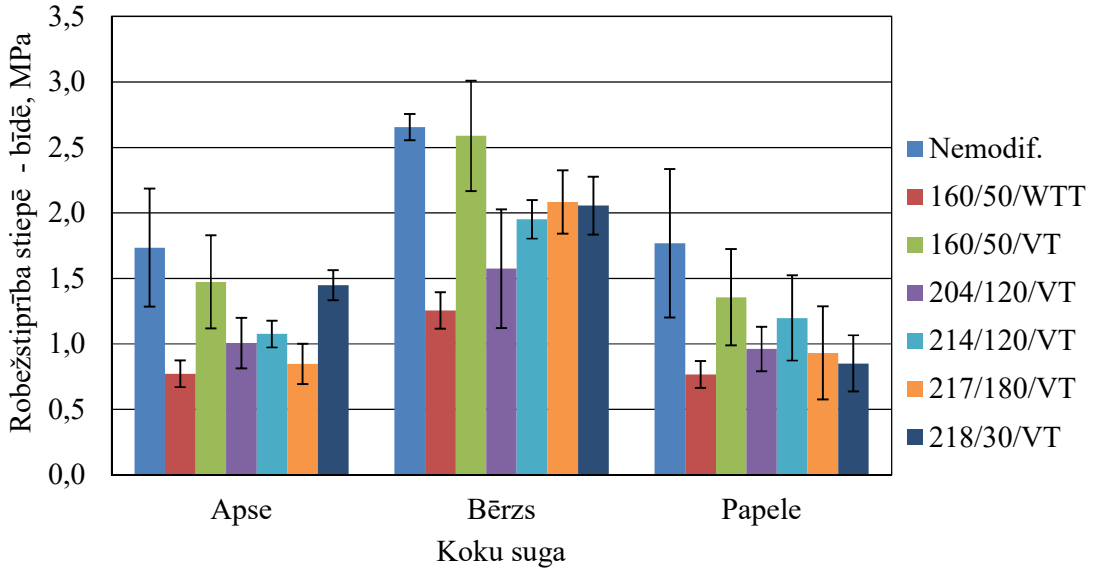


3.11. att. **Līmējuma stiprība**

Samērā augstu līmējuma stiprību – 2.5 - 4.5 MPa uzrāda 217/180/VT bērza finieri, kas, ņemot vērā arī citas šī materiāla īpašības varētu būt optimālais režīms finieru iegūšanai saplākšņa ražošanai, kas arī secināts no iepriekšējā nodaļā aprakstītajiem rezultātiem. Vājākā līmējuma stiprība ir finieru un fenola- formaldehīdu līmes (FF) savstarpējai adhēzijai, kas sakrīt ar Grīniņa (Grīniņš Juris, 2016) iegūtajiem rezultātiem 160/50 WTT režīma bērza finieru līmēšanā, kur apstrādēm pie 160 °C līmējuma kvalitāte ar FF samazinājās par 70%. Samērā vājus rezultātus uzrāda arī adhēzija starp termiski modificētiem finieriem un suberīnu, iespējams tāpēc, ka gan suberīnskābju, gan fenola formaldehīda līmju gadījumā to sacietēšanai nepieciešama paaugstināta temperatūra. Labāku līmējuma stiprību uzrāda PVA, PU un HB.

3.2.2. Ar fenola – formaldehīda (FF) sveķu līmi līmēti saplākšņi

Izmantojot FF, augstākos rezultātus līmējuma kvalitātes pārbaudēs jeb robežstiprībā stiepē-bīdē, pēc atbilstošās priekšapstrādes, sasniedza saplākšņi, kas izgatavoti no nemodificētiem finieriem (skat. 3.12. att.).



3.12. att. **Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes**

Augstākās robežstiprības stiepē-bīdē ir saplākšņiem no nemodificētajiem finieriem visām koku sugām, kam seko 160/50/VT režīms, apsei un bērzam 218/30/VT, bet papelei 214/120/VT režīms. Saplākšņi, kas izgatavoti no tvaika vidē termiski modificētiem finieriem (WTT 160/50), salīdzinot ar termiski nemodificētiem saplākšņa paraugiem vidēji uzrāda par 52% zemāku robežstiprību stiepē – bīdē. Tas liek secināt, ka vakuuma vidē termiski modificētie finieri ir piemērotāki saplākšņa ražošanai, izmantojot FF sveķu līmi, salīdzinot ar WTT tehnoloģijā modificētiem finieriem.

Kopējā tendence norāda, ka izmantojot FF līmi labākos rezultātus uzrāda saplākšņa paraugi, kuri ir izgatavoti no bērza finieriem.

Nosakot līmējuma kvalitāti jeb plīsumu pa koksni, tā atbilst standarta EN 314-1:2004 un EN 314-2:1993 prasībām, sasniedzot atbilstošu apjomu, procentos (skat. 3.11. tabulu).

3.11. tabula

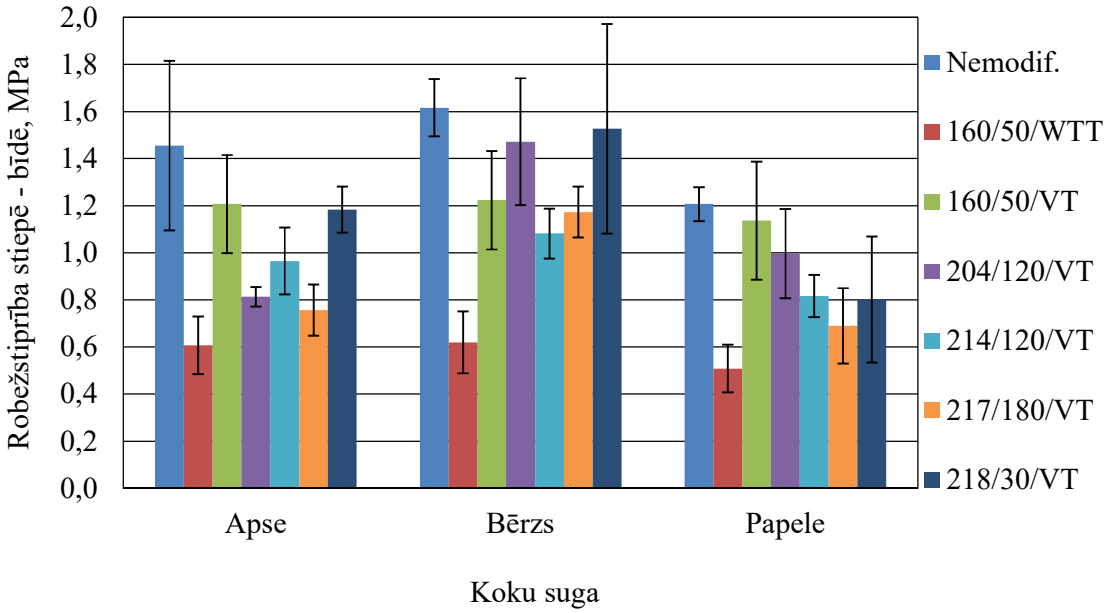
Ar FF līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h			24 h plīsums pa koksni, %			24 h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	85	95	55	1.74	2.66	1.77
160/50/WTT	●	●	●	95	100	100	0.77	1.26	0.77
160/50/VT	●	●	●	80	60	80	1.47	2.59	1.36
204/120/VT	●	●	●	100	100	60	1.01	1.57	0.96
214/120/VT	●	●	●	100	70	100	1.08	1.95	1.20
217/180/VT	●	●	●	100	45	80	0.85	2.08	0.93
218/30/VT	●	●	●	100	20	100	1.45	2.06	0.85

Piezīme: ● – atbilstošs 1. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 1. ekspluatācijas klasei.

Visi eksperimentālie saplākšņi atbilst pirmajai ekspluatācijas klasei atbilstoši standarta EN 314-2:1993 prasībām.

No saplākšņiem, kas izgatavoti pēc 2. priekšapstrādes metodes saskaņā ar standarta EN 314-2:1993 prasībām, visaugstāko robežstiprību stiepē - bīdē sasniedz termiski nemodificēti bērza saplākšņi 1.62 MPa (skat. 3.13. att.). Zemāko robežstiprību stiepē - bīdē sasniedz saplākšņi, kas salīmēti no WTT tehnoloģijā modificētiem apses, bērza un papeles finieriem 0.61 MPa, 0.62 MPa un 0.51 MPa. Līdzīgi kā pēc 1. priekšapstrādes veida (skat. 3.11. att.), robežstiprība stiepē - bīdē saplākšņa paraugiem, kas izgatavoti no WTT tehnoloģijā apstrādātiem finieriem ir vidēji par 56% zemāka, salīdzinot ar nemodificētiem finieriem un atšķirība ir nozīmīga. Vērojama tendence, ka saplākšņa paraugi, kas izgatavoti no Termovouto tehnoloģijā 160/50/VT termiski modificētiem finieriem, uzrāda augstākos rādītājus robežstiprībā stiepē – bīdē, un, palielinoties apstrādes temperatūrai, šis rādītājs samazinās. Izņēmums ir 218/30/VT režīms, kas uzrāda augstākus rādītājus nekā 217/180/VT režīms. Tātad termiskās apstrādes laiks pie līdzīgas temperatūras ietekmē līmējuma kvalitāti.



3.13. att. **Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes**

Līdzīgas tendences arī atrodamas iepriekš veiktos pētījumos - līmējot termiski modificētu masīvkoksni, palielinoties termiskās modifikācijas temperatūras režīmam, līmējuma šuves izturība samazinās (Masoumi et al., 2023).

Bērzs uzrāda salīdzinoši augstākus rezultātus režīmos 204/120/VT un 218/30/VT, salīdzinot ar apsi un papeli. Balstoties uz robežstiprības un plīsuma pa koksni datiem, visi paraugi atbilst 2. ekspluatācijas klasei (skat. 3.12. tabulu), atbilstoši standartam EN 314-2:1993.

3.12. tabula

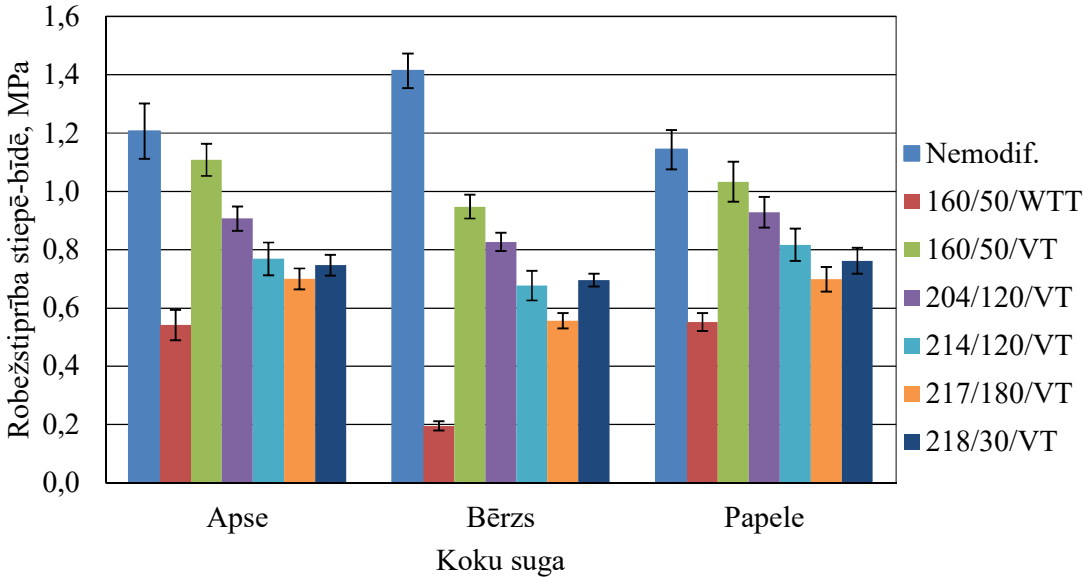
Ar FF līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h un 6h+1h			6h+1h plīsums pa koksni, %			6h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	65	85	65	1.46	1.62	1.21
160/50/WTT	●	●	●	100	95	100	0.61	0.62	0.51
160/50/VT	●	●	●	60	20	75	1.21	1.22	1.14
204/120/VT	●	●	●	90	100	84	0.81	1.47	1.00
214/120/VT	●	●	●	100	85	100	0.97	1.08	0.82
217/180/VT	●	●	●	100	90	100	0.76	1.17	0.69
218/30/VT	●	●	●	95	85	100	1.18	1.53	0.80

Piezīme: ● - atbilstošs 2. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 2. ekspluatācijas klasei.

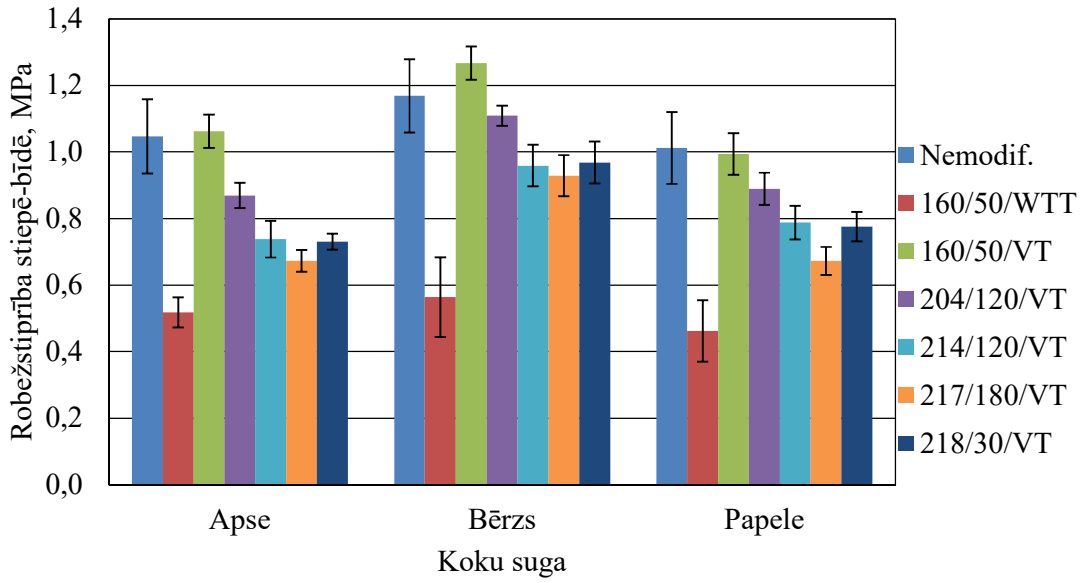
Pēc 2. ekspluatācijas klases priekšapstrādes, nemodificētie finieri uzrādīja robežstiprību virs 1 MPa. Tomēr bērza 160/50/WTT režīma saplākšņiem robežvērtība bija tikai 0.2 MPa, tādējādi šis režīms neatbilda 3. lietojuma klasei (3.13. tabula).

Lai noteiktu atbilstību saplākšņu lietojumam atbilstoši 3.ekspluatācijas klasei, paraugi izturēti priekšapstrādes režīmā, tos izturot 4 stundas vārošā ūdenī, 16 stundas 60±3 °C temperatūrā, 4 stundas vārošā ūdenī un 1h telpas temperatūrā, ūdenī 20±3 °C. Iegūtie rezultāti skatāmi 3.14. attēlā.



3.14. att. **Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes.**

Atbilstībai 3. ekspluatācijas klasei, paraugiem veikta priekšapstrāde tos izturot vārošā ūdenī 72 stundas. Iegūtie rezultāti skatāmi 3.15. attēlā.



3.15. att. **Ar FF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes**

Pēc trešās priekšapstrādes 160/50/WTT rezultāti bija augstāki, sasniedzot vidējo vērtību 0.56 MPa, tomēr ar to nepietika atbilstībai 3. ekspluatācijas klasei (skat. 3.13. tabulu), atbilstoši standartam EN 314-2:1993.

3.13. tabula

Ar FF līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h un 4h+16h+4h+1 un 72h+1h			72h+1h plīsums pa koksni, %			72h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	65	85	65	1.05	1.17	1.01
160/50/WTT	●	×	●	100	90	65	0.52	0.56	0.46
160/50/VT	●	●	●	60	20	75	1.06	1.27	0.99
204/120/VT	●	●	●	90	90	70	0.87	1.11	0.89
214/120/VT	●	●	●	75	85	85	0.74	0.96	0.79
217/180/VT	●	●	●	65	80	60	0.67	0.93	0.67
218/30/VT	●	●	●	60	80	85	0.73	0.97	0.78

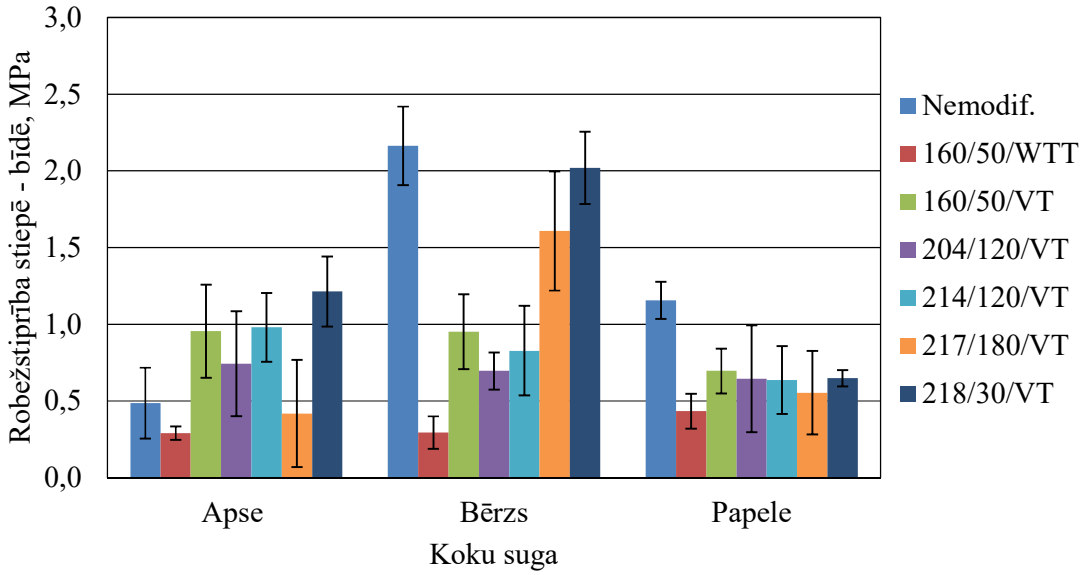
Piezīme: ● - atbilstošs 3. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 3. ekspluatācijas klasei.

Visi ar FF līmētie saplākšņi atbilst 3. ekspluatācijas klasei – lietošanai āra apstākļos, izņemot 160/50/WTT pārāk lielās finieru degradācijas dēļ termiskās apstrādes laikā, kā arī tāpēc, ka WTT procesa laikā koksnes destrukcijas produkti netiek aizvākti, kā tas notiek VT procesa gadījumā, bet paliek uz finieru virsmas, tādējādi traucējot adhēzijas veidošanos.

3.2.3. Saplākšņi līmēti ar hibrīda polimēra (HB) līmi

Līmēšanai izmantojot hibrīda polimēra līmi HB *Construct* līmi, augstākus vidējos rādītājus stiepē - bīdē, uzrādīja saplākšņi, kas izgatavoti no nemodificētiem bērza finieriem. Zemāko robežštiprību stiepē - bīdē joprojām uzrāda tvaika vidē termiski modificētu finieru saplākšņi. Tātad līdzīga tendence kā ar FF līmētu saplākšņu gadījumā. Arī nemodificētas apses saplākšņi HB *Construct* līmes gadījumā uzrādīja zemus radītājus. Vispārēji analizējot HB *Construct* līmes piemērotību, jāmin, ka saplākšņi uzrādīja zemākus kvantitatīvos un kvalitatīvos rādītājus.

Augstāko robežstiprību stiepē - bīdē, apstrādājot pēc 1. paraugu izturēšanas veida, uzrādīja nemodificētie bērza saplākšņi 2.16 MPa. Savukārt zemāko robežstiprību stiepē - bīdē visām pētītajām koku sugām, apstrādājot pēc 1. paraugu izturēšanas veida, uzrādīja saplākšņi, kas apstrādāti tvaika vidē (160/50/WTT režīmā), attiecīgi: apse 0.29 MPa, bērzs 0.29 MPa un papele 0.43 MPa. Vakuuma vidē 218/30/VT režīmā apstrādātie finieri, uzrādīja augstu robežstiprību stiepē - bīdē 2.02 MPa, kas būtiski neatšķīrās no termiski nemodificētiem bērza saplākšņiem (skat. 3.16. att.). Apses un bērza saplākšņiem, apstrādājot pēc 1. paraugu izturēšanas veida, vērojama tendece, ka, palielinoties termiskās modifikācijas temperatūrai un laikam, robežstiprība stiepē - bīdē paaugstinās.



3.16. att. **Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē – bīdē pēc 24h priekšapstrādes**

Ļoti svārstīgie rezultāti visām pētītajām koku sugām atspoguļojās arī novērtējumā – plīsums pa koksni, kā rezultātā, apstrādājot pēc 1. priekšapstrādes veida, atbilda tikai daži no izmantotajiem termiskās modifikācijas veidiem un režīmiem (skat. 3.15. tabulu).

3.14. tabula

Ar HB līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h			24 h plīsums pa koksni, %			24 h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	×	●	●	5	100	5	0.49	2.16	1.16
160/50/WTT	●	×	●	100	55	80	0.29	0.29	0.43
160/50/VT	×	×	×	15	15	20	0.96	0.95	0.70

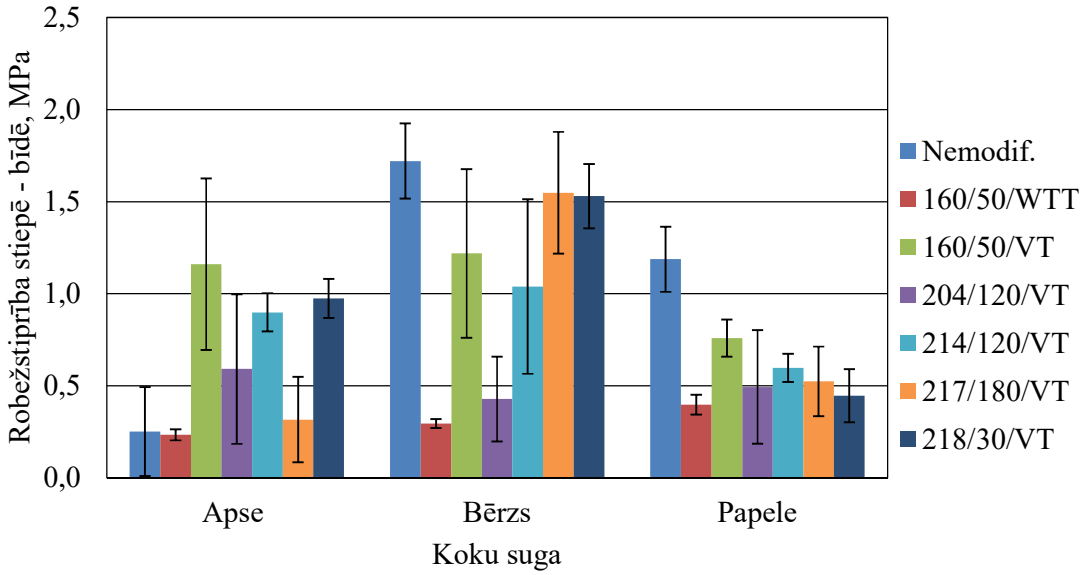
3.14. tabulas nobeigums

Modifikācijas režīms	24 h			24 h plīsums pa koksni, %			24 h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
204/120/VT	×	×	×	30	25	40	0.74	0.70	0.65
214/120/VT	●	×	●	80	30	65	0.98	0.83	0.64
217/180/VT	×	●	×	50	100	40	0.42	1.61	0.55
218/30/VT	●	●	×	95	95	25	1.21	2.02	0.65

Piezīme: ● - atbilstošs 1. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 1. ekspluatācijas klasei.

Tomēr, neskatoties uz iegūtajiem rezultātiem, saplākšņus visām koku sugām pārbaudīja, apstrādājot 2. priekšapstrādes veidā.

Apses un bērza saplākšņi, kas apstrādāti tvaika vidē, pēc termiskās modifikācijas režīma 160/50/WTT, vidēji uzrāda par 75% zemāku robežstiprību stiepē - bīdē, nekā saplākšņi, kas izgatavoti no vakuuma vidē termiski modificētiem finieriem pēc termiskās modifikācijas režīma 160/50/VT. Papeles saplākšņiem šī starpība sasniedza vidēji 34%. Atšķirībā no saplākšņiem, kas līmēti ar FF sveķu līmi, *HB Construct* līme apses saplākšņu tvaika vidē apstrādes gadījumā, robežstiprība stiepē - bīdē nemodificētiem saplākšņiem, iegūtās vērtības ir zemākas. Tas varētu liecināt, ka hibrīda polimēra līme *HB Construct* īsti nav piemērota termiski nemodificētas apses finieru līmēšanai. Savukārt papeles saplākšņiem ir vērojama tendence, ka, pieaugot termiskās modifikācijas temperatūrai un laikam, robežstiprība spiedē - bīdē samazinās. Līdzīgi tas ir novērots Masoumi pētījumos (Masoumi et al., 2023).



3.17. att. **Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes**

Ļoti svārstīgie rezultāti visām pētītajām koku sugām atspoguļojās arī novērtējumā – plīsums pa koksni, kā rezultātā, apstrādājot paraugus pēc 2. priekšapstrādes veida, atbilda tikai daži no izmantotajiem termiskās modifikācijas veidiem un režīmiem (skat. 3.15. tabulu).

3.15. tabula

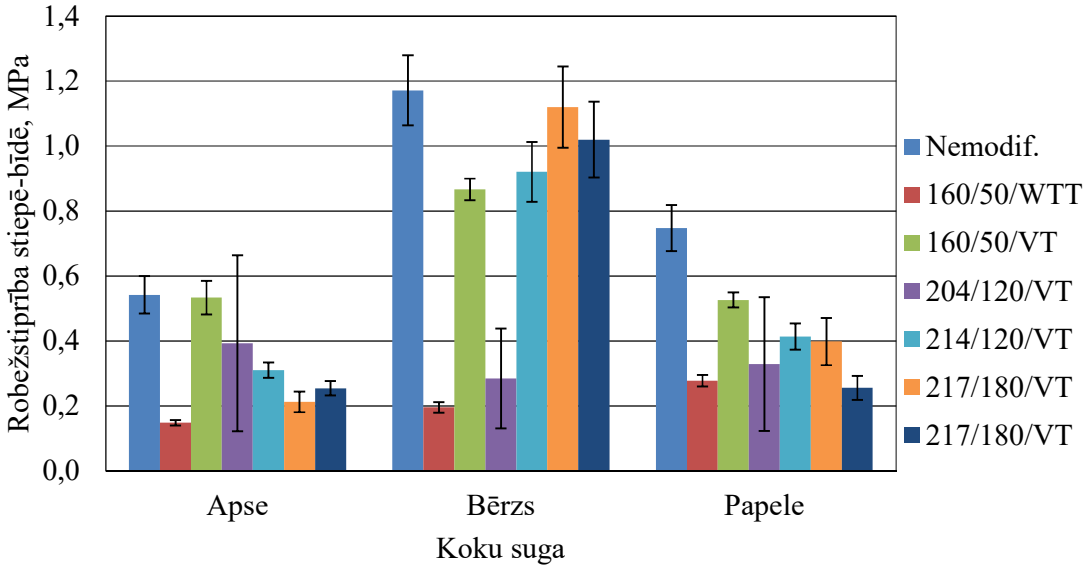
Ar HB līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h un 6h+1h			6h+1h plīsums pa koksni, %			6h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	×	●	●	15	100	5	0.25	1.72	1.19
160/50/WTT	●	×	●	100	75	100	0.23	0.29	0.4
160/50/VT	×	×	×	30	30	25	1.16	1.22	0.76
204/120/VT	×	×	×	45	10	40	0.59	0.43	0.49
214/120/VT	●	×	●	95	50	85	0.90	1.04	0.60
217/180/VT	×	●	×	35	100	15	0.32	1.55	0.52
218/30/VT	●	●	×	100	100	20	0.97	1.53	0.45

Piezīme: ● - atbilstošs 2. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 2. ekspluatācijas klasei.

Tomēr, neskatoties uz negatīvo rezultātu, saplākšņus visām koku sugām pārbaudīja, apstrādājot pēc 3., un 4. paraugu priekšapstrādes veida. Tas darīts tāpēc, lai veiktu salīdzinājumu katram no paraugu apstrādes veidiem. Arī šajā gadījumā novērotas līdzīgas tendences.

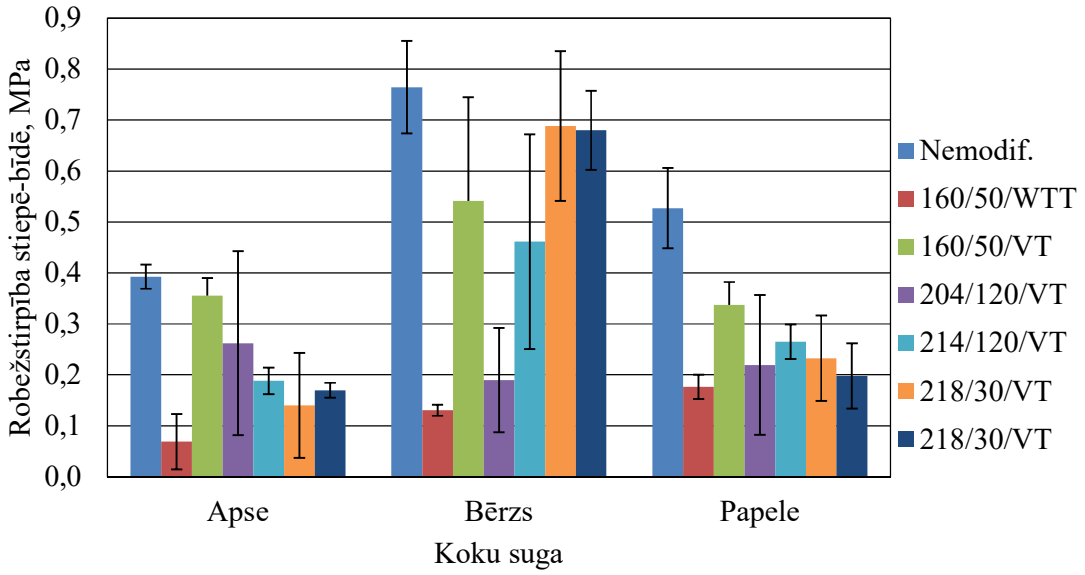
Apses un bērza saplākšņi, kas apstrādāti tvaika vidē, pēc termiskās modifikācijas režīma 160/50/WTT, vidēji uzrāda par 50% zemāku robežstiprību stiepē - bīdē, nekā saplākšņi, kas izgatavoti no Termovouto termiski modificētiem finieriem pēc termiskās modifikācijas režīma 160/50/VT. Papeles saplākšņiem šī starpība vidēji ir 45%. Atšķirībā no saplākšņiem, kas līmēti ar FF sveķu līmi, *HB Construct* līmes (skat. 3.18. att.) apses saplākšņu tvaika vidē apstrādes gadījumā, robežstiprība stiepē - bīdē nemodificētiem saplākšņiem, iegūtās vērtības ir zemākas. Savukārt papeles saplākšņiem ir vērojama tendence, ka, pieaugot termiskās modifikācijas temperatūrai un laikam, robežstiprība spiedē - bīdē samazinās.



3.18. att. **Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes**

Arī pēc 4. priekšapstrādes veida rezultāti ir līdzīgi, kā pēc 1., 2., un 3. paraugu priekšapstrādes veida (skat. 3.19. att.). Tikai robežstiprību stiepē - bīdē samazinās vairāk kā par

piektdaļu. Visas vidējās vērtības visām koku sugām un visiem apstrādes režīmiem nesasniedz minimālo vērtību 1 MPa. Tas nozīmē, ka plīsumam pa koksni ir jābūt nozīmīgi augstākam.



3.19. att. **Ar HB līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes.**

Izvērtējot visus iegūtos rezultātus, gan kvantitatīvos – robežstiprību stiepē – bīdē, līmējot ar hibrīda līmi *HB Construct*, gan kvalitatīvos – plīsuma raksturu. Trešai ekspluatācijas klasei atbilst tikai termiski nemodificēti bērza finieri (skat. 3.16. tabulu).

3.16. tabula

Ar HB līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

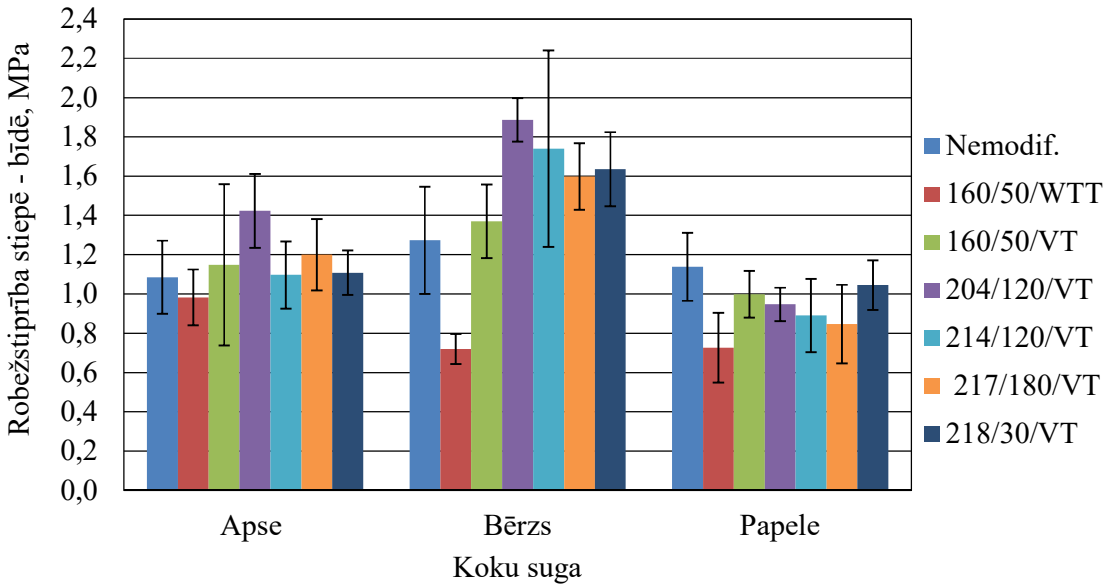
Modifikācijas režīms	24 h un 4h+16h+4h+1 un 72h+1h			72h+1h plīsums pa koksni, %			72h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	×	●	×	30	65	30	0.39	0.76	0.53
160/50/WTT	×	×	×	75	75	75	0.07	0.13	0.18
160/50/VT	×	×	×	40	30	30	0.36	0.54	0.34
204/120/VT	×	×	×	40	20	40	0.26	0.19	0.22
214/120/VT	×	×	×	45	50	55	0.19	0.46	0.27
217/180/VT	×	×	×	30	45	30	0.14	0.69	0.23
218/30/VT	×	×	×	35	35	20	0.17	0.68	0.20

Piezīme: ● – atbilstošs 3. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 3. ekspluatācijas klasei.

Iegūtie rezultāti liecina, ka hibrīda līme *HB Construct* ir izmantojama tikai nemodificēta bērza koksnes finieriem, saplākšņu izgatavošanai, kas paredzēti 3. ekspluatācijas klasei.

3.2.4. Saplākšņi līmēti ar melamīna-urīnvielas-formaldehīda (MUF) līmi

Saplākšņa paraugiem, kuru līmēšanā ir izmantota melamīna - urīnvielas - formaldehīda sveķu līme, augstākos rādītājus robežstiprībā stiepē-bīdē uzrāda saplākšņa paraugi, kas ir izgatavoti no vakuuma vidē termiski modificētiem bērza finieriem, izmantojot termiskās modifikācijas režīmu 204/120/VT (skat. 3.20. att.).



3.20. att. **Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes.**

Viszemākos rādītājus robežstiprībā stiepē-bīdē uzrāda saplākšņa paraugi, kas izgatavoti no tvaika vidē termiski modificētiem (160/50/WTT) bērza un papeles finieriem. Kopumā visi saplākšņa paraugi, kas līmēti ar MUF līmi un izturējuši 24h priekšapstrādi, atbilst 1. ekspluatācijas klasei (iekštelpām) atbilstoši EN 314-2:1993 standarta prasībām (3.17. tabula).

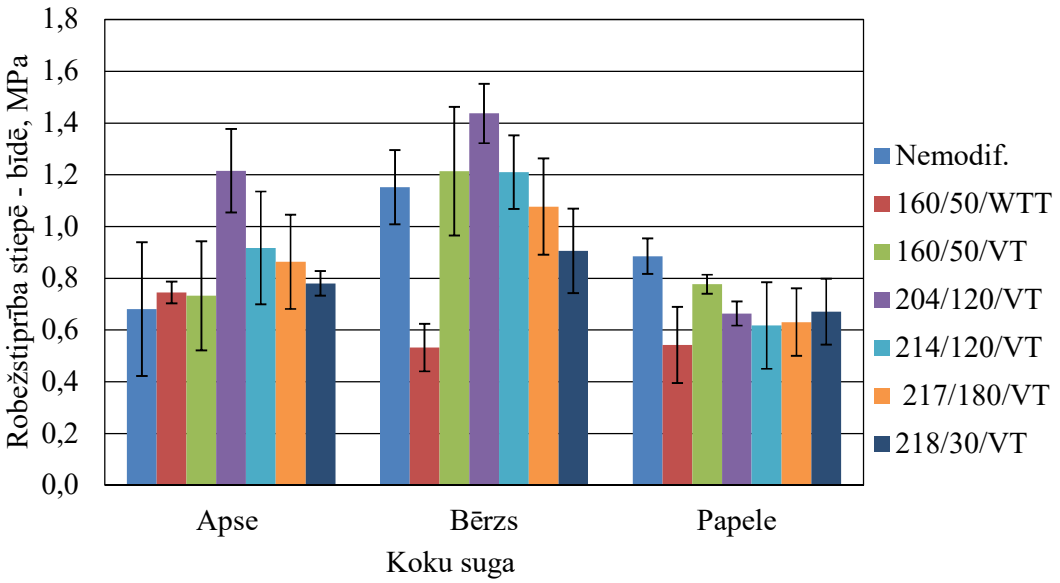
3.17. tabula

Ar MUF līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h			24 h plīsums pa koksni, %			24 h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	40	45	75	1.09	1.27	1.14
160/50/WTT	●	●	●	100	95	100	0.98	0.72	0.73
160/50/VT	●	●	●	65	90	70	1.15	1.37	1.00
204/120/VT	●	●	●	90	80	80	1.42	1.89	0.95
214/120/VT	●	●	●	100	65	80	1.10	1.74	0.89
217/180/VT	●	●	●	100	60	80	1.20	1.60	0.85
218/30/VT	●	●	●	100	40	100	1.11	1.64	1.05

Piezīme: ● - atbilstošs 1. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 1. ekspluatācijas klasei.

Ņemot vērā arī plīsuma raksturu, visi ar MUF līmi salīmētie saplākšņi (skat. 3.21. att.) atbilda 1. ekspluatācijas klasei (3.17. tabula).



3.21. att. **Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes**

Lai novērtētu iegūto saplākšņu atbilstību 2. ekspluatācijas klasei, veikta arī otrā priekšapstrāde. Pēc šīs priekšapstrādes redzams, ka vājāka robežstiprība stiepē-bīdē ir saplākšņiem, kas izgatavoti no termiski modificētas papeles, ja tos salīdzina ar modificētas apses un bērza saplākšņa rezultātiem (3.18. tabula).

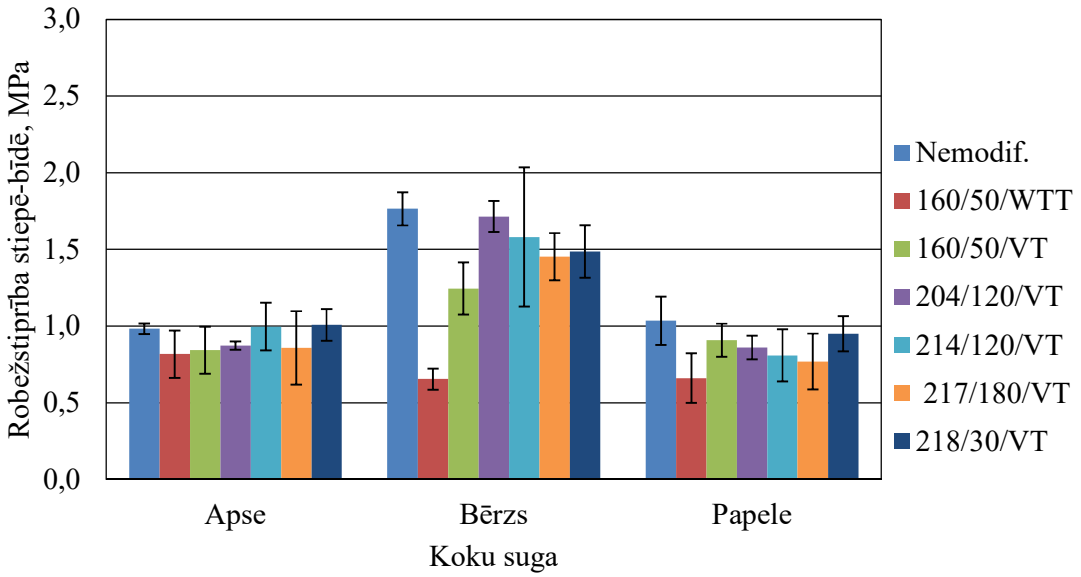
3.18. tabula

Ar MUF līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h un 6h+1h			6h+1h plīsums pa koksni, %			6h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	×	●	×	10	30	25	0.68	1.15	0.89
160/50/WTT	●	×	●	100	75	100	0.75	0.53	0.54
160/50/VT	×	●	×	15	55	20	0.73	1.21	0.78
204/120/VT	●	●	●	85	25	45	1.22	1.44	0.66
214/120/VT	●	●	×	100	5	30	0.92	1.21	0.62
217/180/VT	●	●	×	75	30	10	0.86	1.08	0.63
218/30/VT	●	×	×	55	5	25	0.78	0.91	0.67

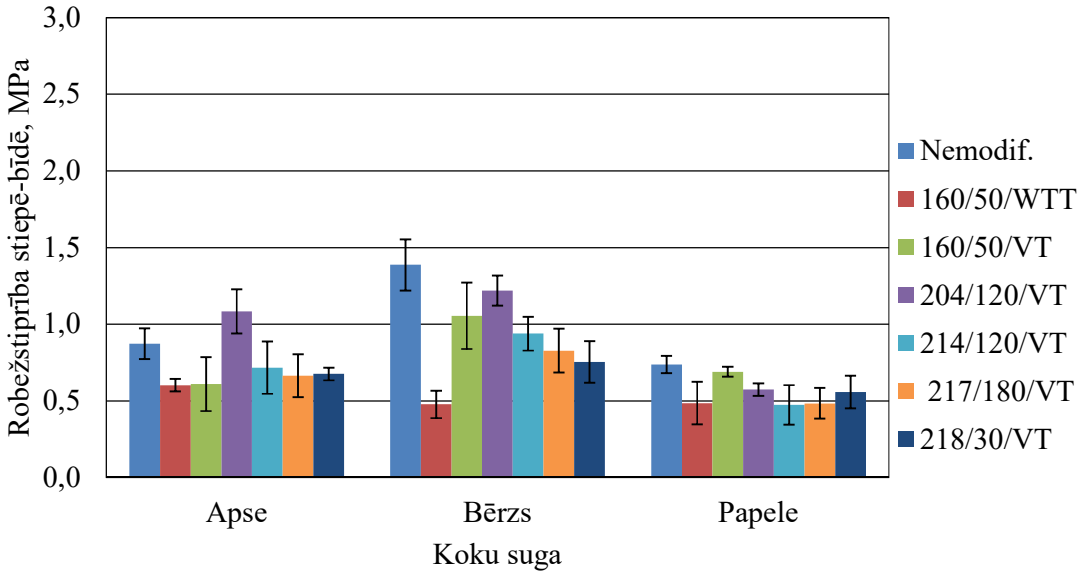
Piezīme: ● - atbilstošs 2. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 2. ekspluatācijas klasei.

3.18. tabulā redzams, ka papildus robežstiprības stiepē-bīdē rezultātiem, izvērtējot plīsuma kvalitatīvos rādītājus vienīgais režīms, kurā apstrādātos un ar MUF salīmētos visu sugu saplākšņus var atzīt par 2. ekspluatācijas klasei atbilstošajiem ir 204/120/VT režīms (skat. 3.22. att.).



3.22. att. **Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes**

Lai novērtētu iegūto saplākšņu atbilstību 3. ekspluatācijas klasei, tikai veikta 3. (skat. 3.21. att.) un 4. (skat. 3.23. att.) priekšapstrāde. Pēc trešās priekšapstrādes būtiski augstāki ir bērza robežstiprības stiepē-bīdē rezultāti, kas, izņemot režīmu 160/50/WTT, pārsniedz 1 MPa, kas nozīmē, ka plīsuma raksturs nav jāvērtē. Gan apses, gan papeles saplākšņu gadījumā šis rādītājs ir nozīmīgs.



3.23. att. **Ar MUF līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes**

Pēc 4. priekšapstrādes robežstiprības stiepē-bīdē rezultāti ir zemāki nekā pēc 3. priekšapstrādes un arī bērza saplākšņa gadījumā, izņemot nemodificēto bērzu un 204/120/VT plīsuma raksturs ir nozīmīgs. Kopējie rezultāti, kas raksturo atbilstību 3. ekspluatācijas klasei ir apkopoti 3.19. tabulā.

3.19 tabula

Ar MUF līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

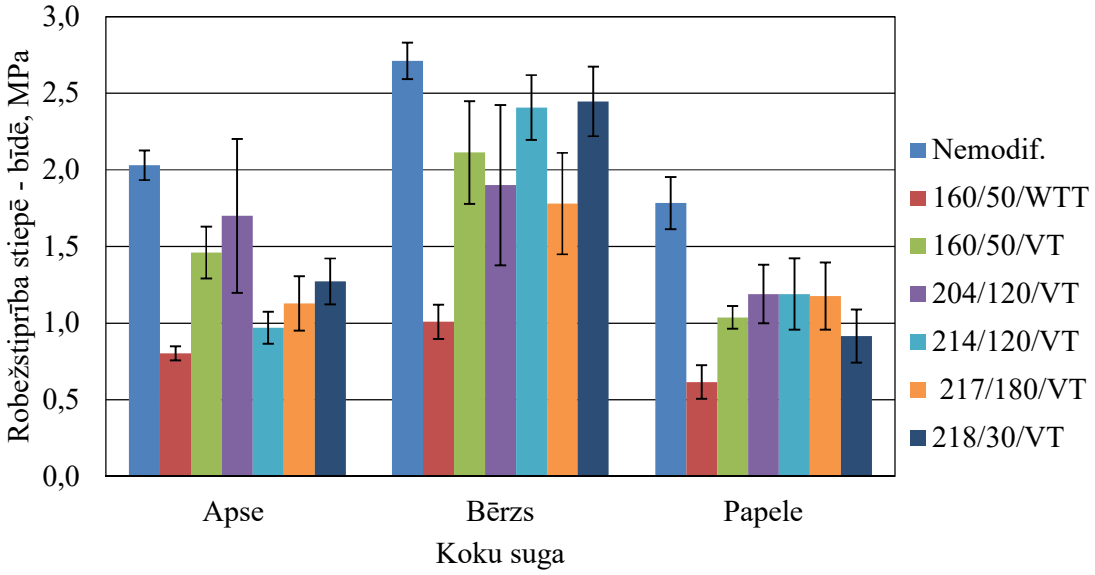
Modifikācijas režīms	24 h un 4h+16h+4h+1 un 72h+1h			72h+1h plīsums pa koksni,%			72h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	×	●	×	25	30	25	0.87	1.39	0.74
160/50/WTT	×	●	×	35	65	40	0.60	0.48	0.49
160/50/VT	×	●	×	25	60	30	0.61	1.06	0.69
204/120/VT	●	●	×	45	75	45	1.08	1.22	0.57
214/120/VT	●	●	×	50	45	30	0.72	0.94	0.47
217/180/VT	●	×	×	45	30	20	0.66	0.83	0.49
218/30/VT	●	●	×	45	50	20	0.68	0.75	0.56

Piezīme: ● - atbilstošs 3. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 3. ekspluatācijas klasei.

Kā redzams no tabulā apkopotajiem rezultātiem, papeles saplākšņi, kas līmēti ar MUF līmi nav piemēroti lietošanai 3. ekspluatācijas klasē (āra apstākļos), apses saplākšņi var tikt lietoti šādos apstākļos tikai, ja līmēti no saplākšņiem, kuru modifikācijas režīms ir bargāks par 204/120/VT, savukārt bērza saplākšņus var lietot gandrīz visus, izņemot 217/180/VT, kas arī ir režīms ar vislielākajiem masas zudumiem un tādējādi lielāko finiera sadalīšanos termiskās modifikācijas ietekmē.

3.2.5. Saplākšņi līmēti ar poliuretāna (PU) līmi

Poliuretāna līme tiek plaši lietota konstrukciju koksnes līmēšanā, tāpēc tā uzrāda visaugstāko robežstiprību stiepē-bīdē arī saplākšņu līmēšanā (skat. 3.24. att.).



3.24. att. **Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes**

Pēc pirmās priekšapstrādes (skat. 3.24. att.), kas izmantojama visām ekspluatācijas klasēm, bērzs uzrāda visaugstākos rezultātus, kam seko apse un, visbeidzot papele. Līdzīgi kā citu komerciālo līmju gadījumā, arī šeit 160/50/WTT režīms uzrāda visvājākos rezultātus, kas skaidrojams ar modifikācijas procesu tehniskajām atšķirībām un tādējādi iegūto finieru destrukcijas pakāpi un destrukcijas produktu atrašanos uz finieru virsmas.

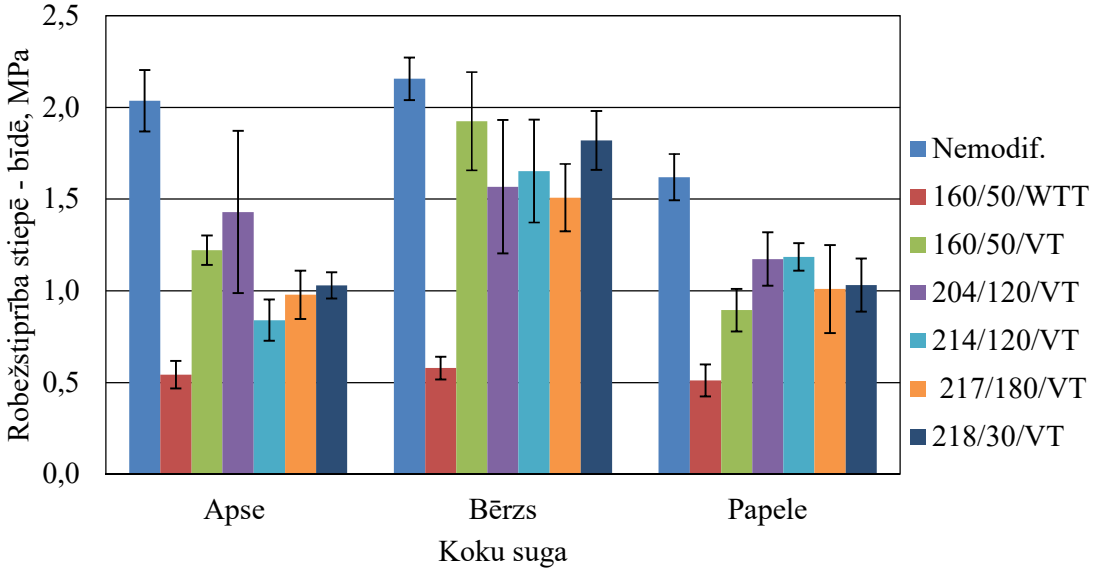
3.20. tabula

Ar PU līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h			24 h plīsums pa koksni, %			24 h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	95	95	90	2.03	2.71	1.78
160/50/WTT	●	●	●	100	80	100	0.80	1.01	0.62
160/50/VT	●	●	●	80	100	80	1.46	2.11	1.04
204/120/VT	●	●	●	100	90	100	1.70	1.90	1.19
214/120/VT	●	●	●	100	90	100	0.97	2.41	1.19
217/180/VT	●	●	●	95	100	100	1.13	1.78	1.18
218/30/VT	●	●	●	100	95	100	1.27	2.45	0.92

Piezīme: ● - atbilstošs 1. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 1. ekspluatācijas klasei.

Ņemot vērā robežstiprības stiepē-bīdē rādītājus (skat. 3.25. att.) un plīsuma raksturu, visi eksperimentāli izgatavotie saplākšņi atbilst to lietojumam 1. ekspluatācijas klasē (skat. 3.20. tabulu).



3.25. att. **Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 6h+1h priekšapstrādes**

Robežstiprības stiepē - bīdē rādītāji, kas nosaka atbilstību 2. ekspluatācijas klasei, tāpat kā aprakstīts iepriekš, ir būtiski zemāki saplākšņiem, kas līmēti no160/50/WTT finieriem, taču to plīsuma raksturs ļauj visiem pētītajiem saplākšņiem atbilst lietojumam 2. ekpluatācijas klasē (skat. tabulu 3.21.).

3.21 tabula

Ar PU līmētu saplākšņu atbilstība 2. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

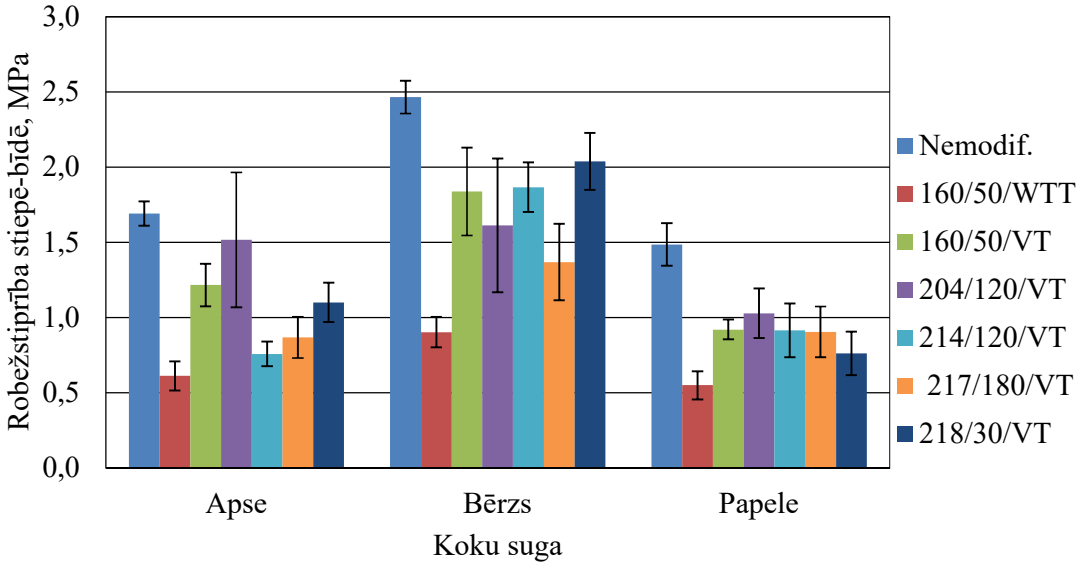
Modifikācijas režīms	24 h un 6h+1h			6h+1h plīsums pa koksni, %			6h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	95	75	85	2.04	2.16	1.62

3.21. tabulas nobeigums

Modifikācijas režīms	24 h un 6h+1h			6h+1h plīsums pa koksni, %			6h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
160/50/WTT	●	●	●	100	90	95	0.54	0.58	0.51
160/50/VT	●	●	●	45	90	60	1.22	1.93	0.90
204/120/VT	●	●	●	100	95	100	1.43	1.57	1.17
214/120/VT	●	●	●	100	85	100	0.84	1.65	1.19
217/180/VT	●	●	●	100	100	80	0.98	1.51	1.01
218/30/VT	●	●	●	100	100	100	1.03	1.82	1.03

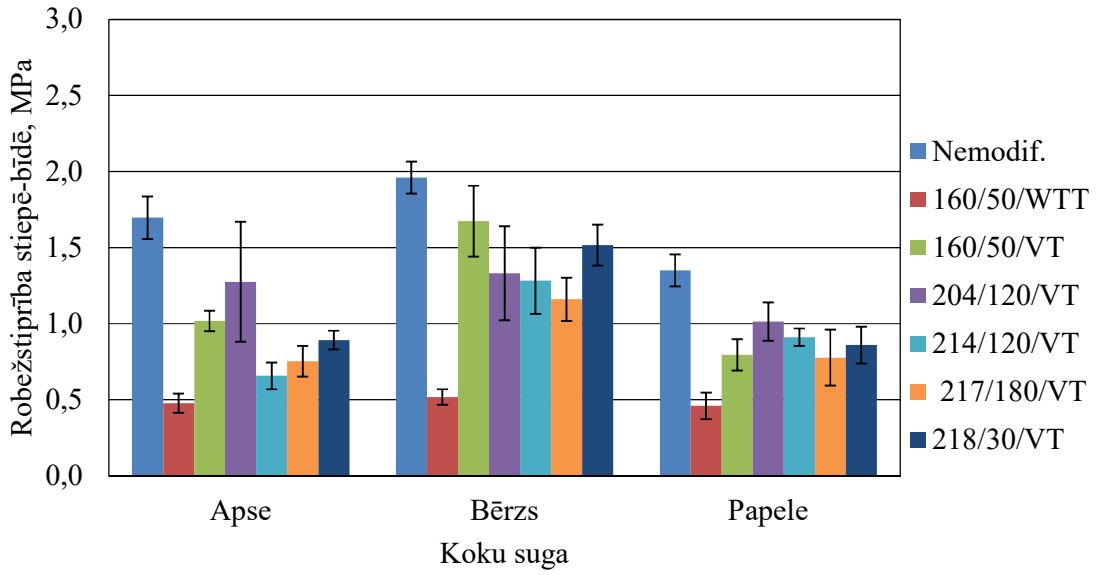
Piezīme: ● - atbilstošs 2. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 2. ekspluatācijas klasei.

Šī tabula rāda, ka visi pētītie saplākšņi, kas līmēti ar poliuretāna līmi (skat. 3.26. att.), atbilst lietojumam 2. ekspluatācijas klasē (aizsargātos āra apstākļos).



3.26. att. **Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes**

Attēlā 3.26. redzami rezultāti pēc 3. priekšapstrādes. Kā redzams, nemodificētus finierus PU līme salīmē lieliski apses rezultāts – 1.69 MPa, bērza – 2.47 MPa, papeles – 1.49 MPa. Vājākie rezultāti saplākšņiem no 160/50/WTT režīmā modificētajiem finieriem. Rezultāti pēc 4. priekšapstrādes veida redzami 3.27. attēlā.



3.27. att. **Ar PU līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes**

Arī pēc pēdējās priekšapstrādes, novērojami ļoti labi robežstiprības stiepē-bīdē rezultāti saplākšņiem, kas līmēti no nemodificētiem finieriem – apsei 1.70 MPa, bērzam 1.96 MPa un papelei 1.35 MPa. 160/50/WTT attiecīgi 0.48 MPa, 0.52 MPa un 0.46 MPa.

3.22. tabulā apkopoti rezultāti par saplākšņu atbilstību 3. ekspluatācijas klasei un redzams, ka visi ar PU līmētie bērza saplākšņi tai atbilst, izņemot 160/50/WTT. Šis režīms neatbilst 3. ekspluatācijas klasei nevienai no darbā aplūkotajām koku sugām.

3.22 tabula

Ar PU līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h un 4h+16h+4h+1 un 72h+1h			72h+1h plīsums pa koksni,%			72h+1h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	25	30	25	1.70	1.96	1.35
160/50/WTT	×	×	×	35	65	40	0.48	0.52	0.46
160/50/VT	●	●	×	25	60	30	1.02	1.67	0.80
204/120/VT	●	●	●	50	75	45	1.28	1.33	1.01
214/120/VT	×	●	●	50	45	30	0.66	1.28	0.91
217/180/VT	×	●	×	45	25	20	0.75	1.16	0.78
218/30/VT	×	●	×	45	50	20	0.89	1.52	0.86

Piezīme:● – atbilstošs 3. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 3. ekspluatācijas klasei.

3.2.6. Saplākšņi līmēti ar suberīnskābju (SA) saistvielu

Iepriekš aprakstītā saplākšņu līmēšana ar komerciālajām līmēm veikta, lai salīdzinātu iegūtos rezultātus ar tiem, kas iegūti saplākšņus līmējot ar suberīnskābes saistvielu un kuri aprakstīti šajā apakšnodaļā. SA saistvielas patēriņš un saplākšņu sapresēšanās pakāpes rezultāti attēloti 3.23. tabulā.

3.23. tabula

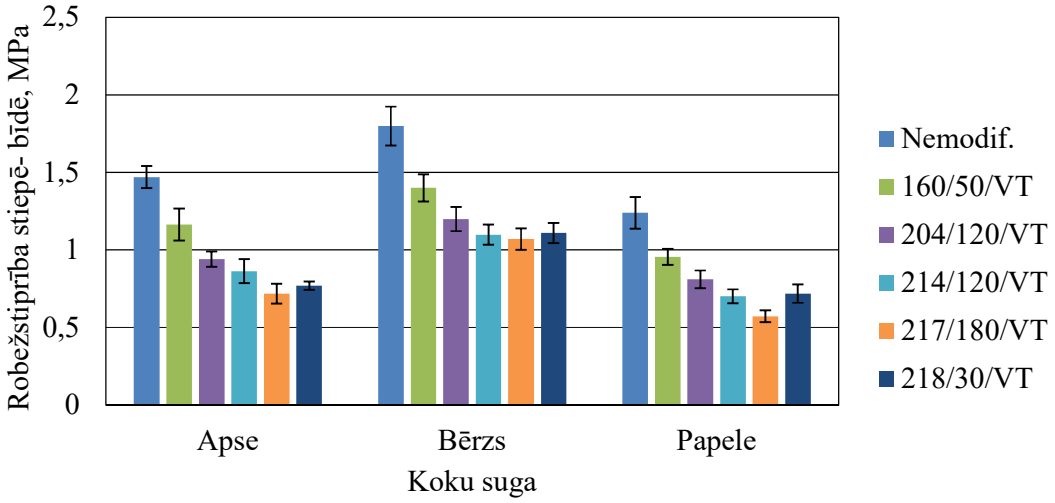
SA patēriņš un CR vidējās vērtības

Suga	Apse				Bērzs				Papele			
Režīms	**CR,%**	**SD**	**SA, g·m^{-2}**	**SD**	**CR,%**	**SD**	**SA, g·m^{-2}**	**SD**	**CR,%**	**SD**	**SA, g·m^{-2}**	**SD**
Nemodificēts	9.4	0.1	95	0.1	15.0	0.2	93	0.2	11.4	0.1	95	0.3
160/50/WTT	9.4	0.2	85	0.3	14.8	1.0	85	0.3	11.5	0.2	86	0.4
160/50/ VT	9.4	0.1	92	0.2	14.8	0.2	90	0.4	11.1	0.2	93	0.2
204/120/VT	9.5	0.3	90	0.9	15.3	0.1	89	0.1	10.7	0.6	91	0.2
214/120/VT	9.6	0.5	88	1.8	15.3	0.9	88	0.1	11.1	0.4	90	0.1
217/180/VT	9.2	0.2	86	0.8	14.6	0.3	86	0.2	11.4	0.2	87	0.3
218/30/VT	9.3	0.0	88	0.4	14.7	0.5	85	0.3	11.6	0.4	89	0.4

Novērojama tendence SA patēriņā — tas samazinās, palielinoties termiskās modifikācijas temperatūrai un ilgumam. Šī tendence ir saistīta ar termiski modificēto finieru virsmas hidrofobitāti. Tomēr līmes sausnas patēriņš dažādos termiskās modifikācijas apstākļos būtiski neatšķiras: vidēji 89 ± 3 g·m^{-2} apses, 88 ± 3 g·m^{-2} bērza un 90 ± 3 g·m^{-2} papeles finieriem.

Visaugstākā sapresēšanās pakāpe sasniegta bērza saplāksnim, ar CR 15.3 ± 0.1% režīmā 204/120/VT un 15.3 ± 0.9% režīmā 214/120/VT. Iepriekšējie pētījumi rāda, ka CR ir atkarīgs no blīvuma, un nemodificētam bērza saplāksnim tas var svārstīties no 12% augstākā bērza finieru blīvuma grupā (644 - 690 kg·m^{-3}) līdz 18% zemākā blīvuma grupā (502 - 540 kg·m^{-3}) (Kūliņš et al., 2021). Zemākais CR šajā pētījumā — 9.2±0.2% novērots apses saplāksnim 217/180/VT, savukārt papeles saplāksnim zemākais CR bija 10.7 ± 0.6% 204/120/VT. Nemodificētas apses saplākšņa CR (9.4 ± 0.1%) ir zemāks nekā nemodificētā bērza saplākšņa CR (15 ± 0.2%), kas ir pretrunā Kallakas u.c. (Kallakas et al., 2020) secinājumiem, kuri norādīja, ka 7 slāņu saplāksnim ar 5 iekšējiem apses finieriem CR ir augstāks nekā 7 slāņu bērza saplāksnim.

Ar SA līmēta saplākšņa robežstiprība stiepē-bīdē noteikta tāpat kā komerciālo līmju gadījumā. Iegūtie rezultāti attēloti 3.28. attēlā.



3.28. att. **Ar SA līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 24h priekšapstrādes**

Kā redzams 3.28. attēlā, iepriekš uzrādītais režīms 160/50/WTT nav iekļauts šajā un nākamajos attēlos, jo pie metodikā aprakstītā saplākšņa presēšanas režīma nebija iespējams ar SA salīmēt tvaika vides režīmā apstrādātos finierus. Tika novērota iegūto paraugu delaminācija tūlīt pēc presēšanas. Labākie rezultāti, kā ierasts, nemodificētas koksnes gadījumā, jo šiem

finieriem ir visvairāk pieejamās hidroksilgrupas, kas var iesaistīties adhēzijas veidošanā, salīdzinājumā ar termiski modificētiem finieriem (skat. 3.24. tabulu).

3.24 tabula

Ar SA līmētu saplākšņu atbilstība 1. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

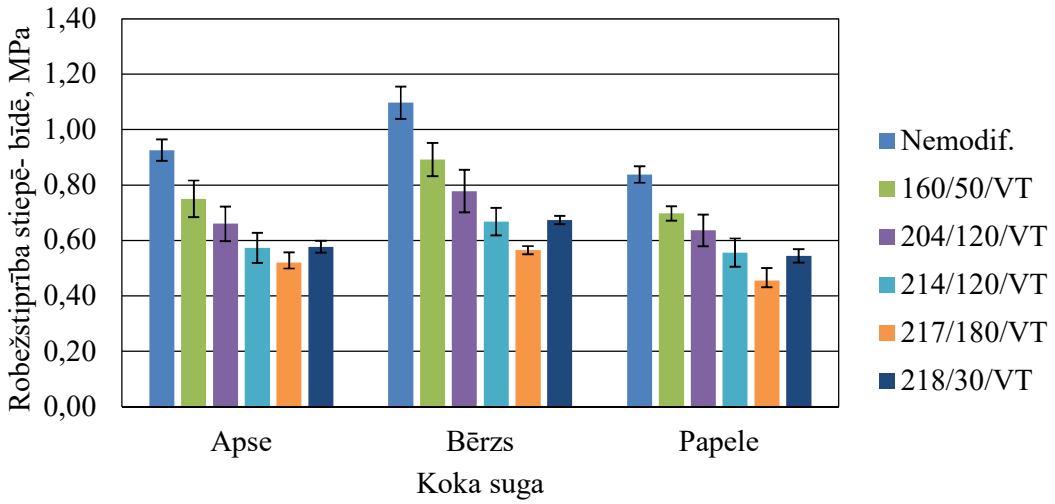
Modifikācijas režīms	24 h			24 h plīsums pa koksni, %			24 h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	100	100	100	1.47	1.80	1.24
160/50/VT	●	●	●	50	75	95	1.16	1.40	0.96
204/120/VT	●	●	●	55	80	100	0.94	1.20	0.81
214/120/VT	●	●	●	70	80	100	0.86	1.10	0.70
217/180/VT	●	●	●	90	80	70	0.72	1.07	0.57
218/30/VT	●	●	●	70	80	60	0.77	1.11	0.72

Piezīme: ● - atbilstošs 1. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 1. ekspluatācijas klasei.

Kā redzams 3.24. tabulā, visi iegūtie eksperimentālie saplākšņi atbilst lietošanai 1. ekspluatācijas klasē.

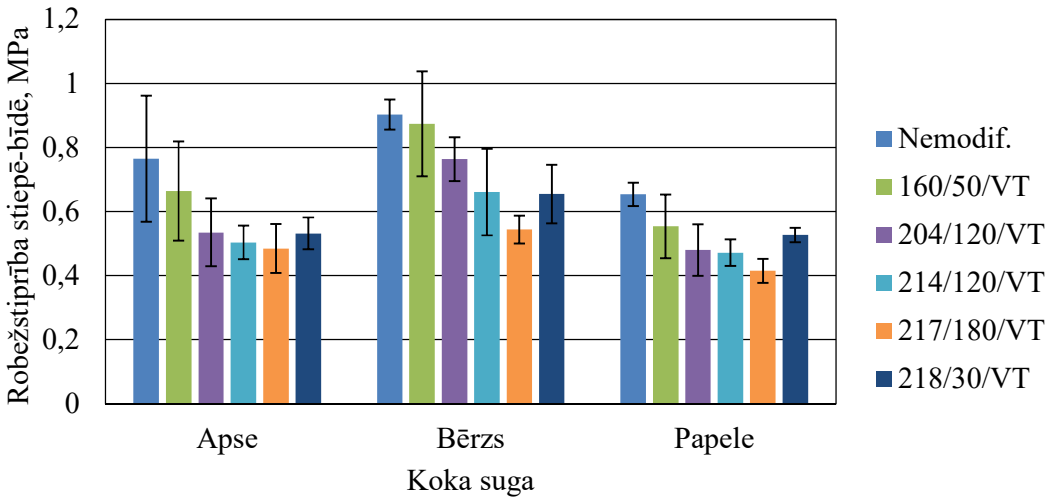
2. ekspluatācijas klase netika pārbaudīta paraugu nepietiekama apjoma dēļ.

Lai pārliecinātos par iespēju ar SA līmētus saplākšņus lietot 3. ekspluatācijas klasē (āra apstākļos), veikta trešā (skat. 3.29. att.) un ceturtā (skat. 3.30. att.) priekšapstrāde.



3.29. att. **Ar SA līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 4h+16h+4h+1h priekšapstrādes**

Pēc trešās priekšapstrādes augstākā robežstiprība stiepē–bīdē ir saplākšņiem no nemodificētiem finieriem - 0.93 MPa apsei, 1.10 MPa bērzam un 0.84 MPa papelei. Zemākās vērtības – saplākšņiem no 217/180/VT režīmā modificētiem finieriem, attiecīgi 0.52 MPa, 0.57 MPa un 0.46 MPa.



3.30. att. **Ar SA līmētu saplākšņu robežstiprība stiepē–bīdē pēc 72h+1h priekšapstrādes**

Pēc ceturtās priekšapstrādes augstākā robežstiprība stiepē – bīdē ir saplākšņiem no nemodificētiem finieriem - 0.77 MPa apsei, 0.90 MPa bērzam un 0.65 MPa papelei. Zemākās vērtības – saplākšņiem no 217/180/VT režīmā modificētiem finieriem, attiecīgi 0.49 MPa, 0.54 MPa un 0.42 MPa. Tomēr, neskatoties uz samērā zemajām robežstiprības spiedē-bīdē vērtībām, ievērtējot plīsuma raksturu, 3.25. tabulā apkopota informācija, ka visi eksperimentālie saplākšņi atbilst 3. ekspluatācijas klasei (lietošanai āra apstākļos).

3.25. tabula

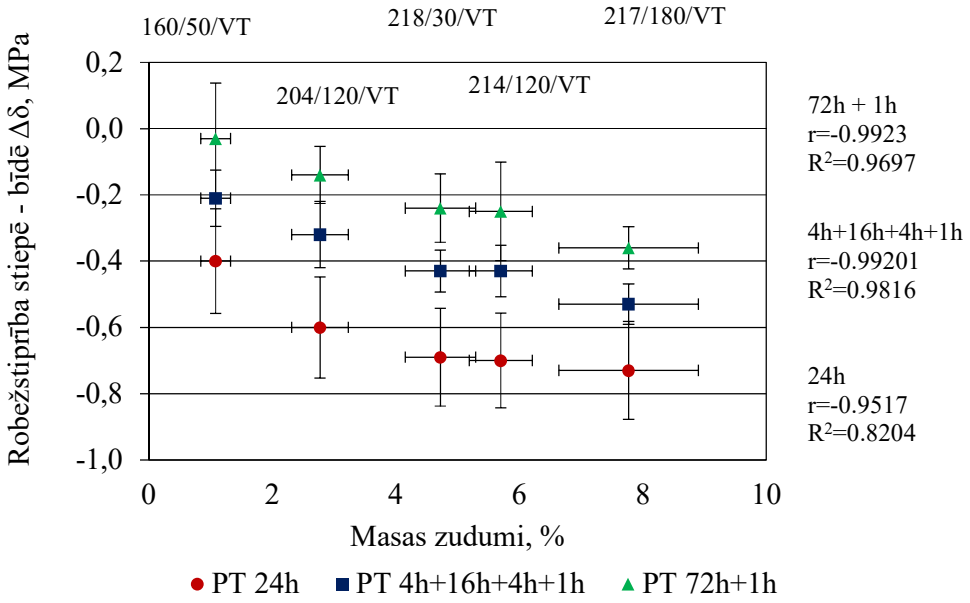
Ar SA līmētu saplākšņu atbilstība 3. ekspluatācijas klasei saskaņā ar standartu EN 314-2

Modifikācijas režīms	24 h un 4 h+16 h+4 h+1 h un 72 h+1 h			72 h+1 h plīsums pa koksni, %			72 h+1 h robežstiprība, MPa		
	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele	Apse	Bērzs	Papele
Nemodificēts	●	●	●	65	60	65	0.77	0.90	0.65
160/50/VT	●	●	●	65	60	65	0.66	0.87	0.55
204/120/VT	●	●	●	65	65	75	0.54	0.76	0.48
214/120/VT	●	●	●	75	75	75	0.50	0.66	0.47
217/180/VT	●	●	●	65	65	80	0.49	0.54	0.42
218/30/VT	●	●	●	65	75	75	0.53	0.66	0.53

Piezīme: ● - atbilstošs 3. ekspluatācijas klasei; × – neatbilstošs 3. ekspluatācijas klasei.

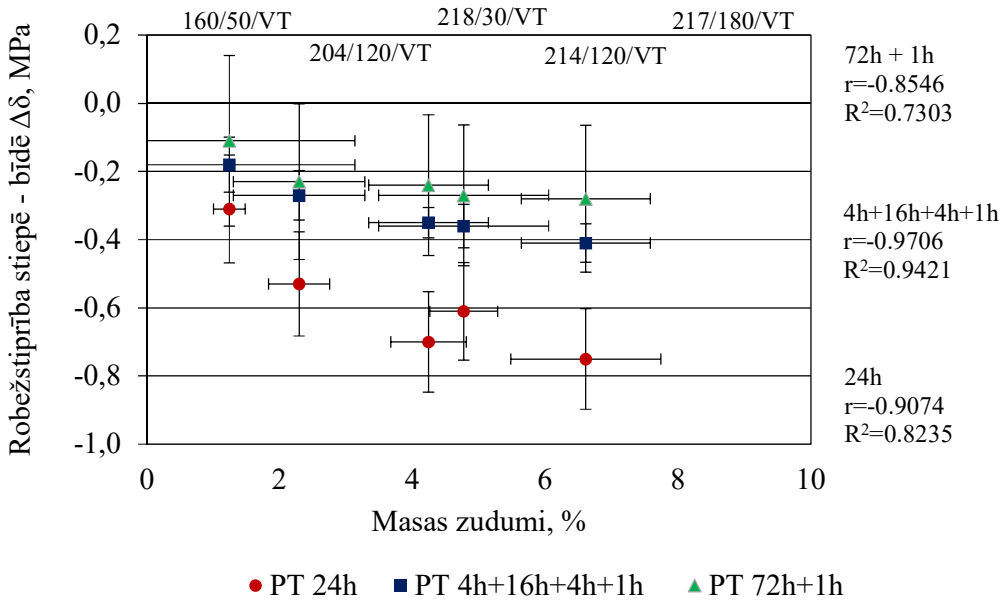
Termiskās modifikācijas pakāpi viena no būtiskākajām raksturojošām īpašībām ir masas zudumi. Šo masas zudumu korelācija ar robežstiprības izmaiņām aprakstīta publikācijā (Meija et al., 2025) un tālāk redzamajos attēlos. Attēlā 3.31. redzamas masas zudumu un robežstiprības stiepē – bīdē izmaiņu korelācijas pēc visām trijām priekšapstrādes metodēm, kas minētas iepriekš. Novērota tendence, ka, palielinoties finiera masas zudumiem, saplākšņa stiepes-bīdes robežstiprība samazinās. T-tests parādīja, ka modificētās stiepes-bīdes robežstiprības samazinājums visiem bērza saplākšņa paraugiem ir statistiski nozīmīgs, salīdzinot ar nemodificētajiem paraugiem ($p < 0.05$). Izņēmums ir bērza saplāksnis 160/50/VT pēc 72 h + 1 h priekšapstrādes (PT), kur $p = 0.59$. No izstrādātajiem korelācijas modeļiem redzams, ka, izvēloties kā faktoru bērza finiera masas zudumu, kas rodas termiskās modifikācijas procesā, savukārt kā funkciju - ar suberīnskābes līmi līmēta saplākšņa stiepes-bīdes stiprības atšķirību pēc 24 h priekšapstrādes starp nemodificētu paraugu un modificētiem paraugiem, novērojama cieša korelācija.

Redzams, ka starp datiem pastāv negatīva, cieša korelatīvā saite (r=- 0,9517), tātad - lineārās saistības ciešums starp abiem rādītājiem ir 95. Līdzīgi arī pēc priekšapstrādēm 72h+1h un 4h+16h+4h+1h pastāv cieša korelatīvā saite attiecīgi (r=-0.9923 un r=-0.9921), ticamība attiecīgi 97% un 98%.



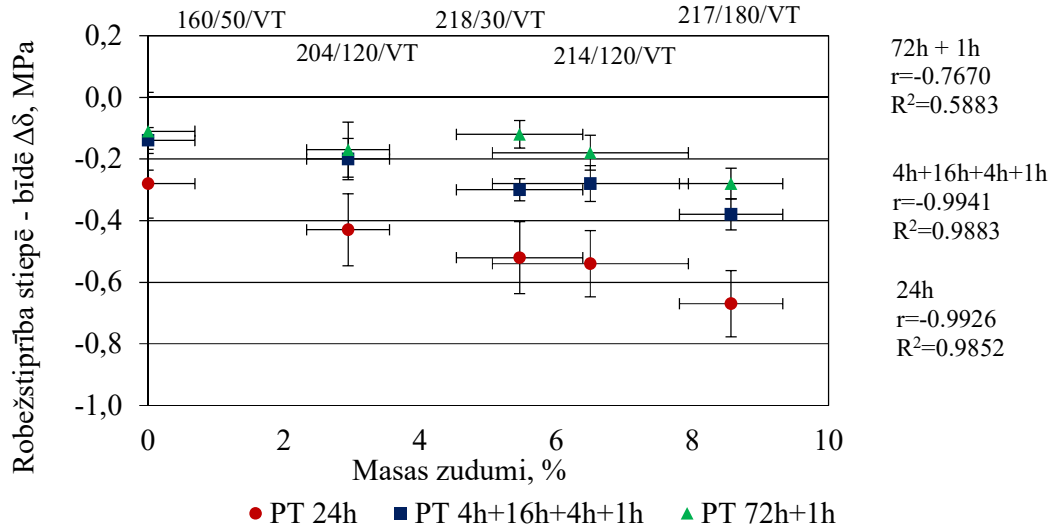
3.31. att. **Bērza saplākšņa robežstiprības zudumu un finieru masas zudumu korelācija**

Pēc priekšapstrādes 24 h nemodificētajam apses saplāksnim stiepes–bīdes robežstiprība bija 1.47±0.17 MPa; pēc priekšapstrādes 4h+16h+4h+1h atbilstošā vērtība bija 0.93±0.04 MPa, bet pēc priekšapstrādes 72h+1h – 0.77±0.20 MPa. Izturības samazinājums Δδ atkarībā no masas zuduma pēc visiem apses paraugu priekš apstrādes veidiem ir parādīts 3.32. attēlā. Līdzīga tendence novērota arī bērza saplāksnim – palielinoties finieru masas zudumiem, saplākšņa stiepes–bīdes robežstiprība samazinājās, ar nelielu izņēmumu modificēšanas apstākļos 217/180/VT. T-tests parādīja, ka modificēto saplākšņu stiepes–bīdes robežstiprības samazinājums visiem apses saplākšņa paraugiem ir statistiski nozīmīgs salīdzinājumā ar nemodificētajiem paraugiem ($p < 0.05$). Izņēmums ir apses saplāksnis 160/50/VT pēc 72h+1h priekšapstrādes, kur $p = 0.22$. Aplūkojot korelācijas koeficientus pēc visām priekšapstrādēm, pastāv negatīva cieša korelatīvā saite ar lineārās saistības ciešumu virs 73%.



3.32. att. **Apses saplākšņa robežstiprības zudumu un finieru masas zudumu korelācija**

Pēc priekšapstrādes 24 h nemodificētajam papeles saplāksnim stiepes-bīdes robežstiprība bija 1.24±0.10 MPa; pēc priekšapstrādes 4 h+16 h+4 h+1 h atbilstošā vērtība bija 0.84±0.03 MPa, bet pēc priekšapstrādes 72 h +1 h – 0.65±0.04 MPa. Izturības samazinājums Δδ atkarībā no masas zuduma pēc visiem papeles paraugu priekšapstrādes veidiem ir parādīts 3.33. attēlā. Līdzīga tendence novērota bērza un apses saplāksnim – palielinoties finieru masas zudumiem, saplākšņa stiepes-bīdes robežstiprība samazinājās, izņemot režīmus 204/120/VT un 214/120/VT. T-tests parādīja, ka modificētās stiepes-bīdes robežstiprības atšķirības visiem papeles saplākšņa paraugiem ir statistiski nozīmīgas, salīdzinot ar nemodificētajiem paraugiem ($p < 0.05$). Aplūkojot korelācijas koeficientus pēc visām priekšapstrādēm, pastāv negatīva cieša korelatīvā saite ar lineārās saistības ciešumu virs 59%.



3.33. att. **Papeles saplākšņa robežstiprības zudumu un finieru masas zudumu korelācija**

3.2.7. Saplākšņu līmēšanas apakšnodaļas kopsavilkums

Rezultātu sadaļa par saplākšņa līmēšanu (3.2. apakšnodaļa) sniedz detalizētu izvērtējumu par dažādu komerciālo līmju un inovatīvās suberīnskābju (SA) saistvielas piemērotību termiski modificēto bērza, apses un papeles finieru līmēšanai, salīdzinot iegūto saplākšņu stiprību un atbilstību ekspluatācijas klasēm saskaņā ar standartu EN 314-2:1993.

1. **Salīdzinājums starp komerciālajām līmēm un SA saistvielu**
   • Robežstiprība stiepē-bīdē**:** augstāko robežstiprību stiepē-bīdē visos paraugos uzrādīja saplākšņi, kas līmēti ar poliuretāna (PU) līmi un fenola-formaldehīda (FF) sveķu līmi. Tām sekoja melamīna-urīnvielas-formaldehīda (MUF) sveķu līme, suberīnskābes (SA) līme, bet viszemākos rezultātus uzrādīja hibrīda polimēra (HB) līme;
   • Finieru termiskās modifikācijas ietekme: Termovouto procesā (VT) termiski modificēti finieri uzrādīja augstāku robežstiprību stiepē - bīdē nekā finieri, kas modificēti tvaika vidē (WTT). Saplākšņi no 160/50/VT režīmā modificētiem finieriem vidēji uzrādīja par 50% augstāku robežstiprību stiepē - bīdē, salīdzinot ar 160/50/WTT režīmā modificētajiem finieriem;
   • WTT režīma trūkumi: saplākšņa paraugiem no tvaika vidē (WTT) termiski modificētiem finieriem (160/50/WTT) novēroti visvājākie rezultāti. Tas skaidrojams ar to, ka WTT procesā koksnes destrukcijas produkti netiek aizvākti, paliekot uz finieru virsmas un traucējot adhēzijas veidošanos, atšķirībā no VT procesa.

2. **Suberīnskābju saistvielas (SA) rezultāti**
   • Ekspluatācijas klase: saplākšņi, kas līmēti ar suberīnskābju saistvielu, kas iegūta no bērza tāss, gan no nemodificētiem, gan visos VT režīmos modificētiem finieriem (apse, bērzs, papele) atbilst 3. ekspluatācijas klasei (lietošanai āra apstākļos). Tomēr ar SA nebija iespējams salīmēt WTT režīmā apstrādātos finierus, jo novērota delaminācija tūlīt pēc presēšanas;
   • SA Patēriņš: suberīnskābju saistvielas patēriņš (vidēji 88 – 90 $g \cdot m^{-2}$) samazinājās, palielinoties termiskās modifikācijas intensitātei, kas ir saistīts ar termiski modificēto finieru virsmas hidrofobitāti.

3**. Saplākšņa atbilstība ekspluatācijas klasēm**
   Pārbaudīta saplākšņa atbilstība 1. (iekštelpām), 2. (aizsargātiem āra apstākļiem) un 3. (āra apstākļiem) ekspluatācijas klasēm, veicot atbilstošas priekšapstrādes (PT). Iegūtie rezultāti apkopoti 3.26. tabulā.

3.26. tabula

Dažādu līmju salīdzinājums

Līmes tips	**Atbilstošās koku sugas**	**Atbilstība 3. ekspluatācijas klasei (āra apstākļi)**	**Secinājumi**
Fenola-formaldehīda sveķi (FF)	apse, bērzs, papele	Atbilst visiem VT režīmiem, izņemot 160/50/WTT.	WTT režīms finieriem bija pārāk degradējošs, lai nodrošinātu atbilstību 3. klasei ar FF līmi.
Melamīna-urīnvielas-formaldehīda līme (MUF)	bērzs	Bērza saplākšņi atbilst gandrīz visos režīmos.	Papeles saplākšņi nav piemēroti 3. ekspluatācijas klasei.

3.26. tabulas nobeigums

Līmes tips	Atbilstošās koku sugas	Atbilstība 3. ekspluatācijas klasei (āra apstākļi)	Secinājumi
Hibrīdā polimēra līme (HB)	bērzs	Atbilst tikai saplākšņiem no nemodificētiem bērza finieriem.	HB līme nav ieteicama termiski modificētiem finieriem 3. ekspluatācijas klasei.
Poliuretāna līme (PU)	bērzs, apse, papele	Visi bērza saplākšņi atbilst, izņemot 160/50/WTT. Apse un papele (atkarībā no režīma) atbilst.	PU līme nodrošināja visaugstāko robežstiprību stiepē-bīdē.
Suberīnskābju saistviela (SA)	apse, bērzs, papele	Atbilst visiem VT režīmiem.	Visi eksperimentālie saplākšņi atbilst 3. klasei, neskatoties uz samērā zemajām robežstiprības vērtībām, jo ievērtēts augstais plīsums pa koksni.

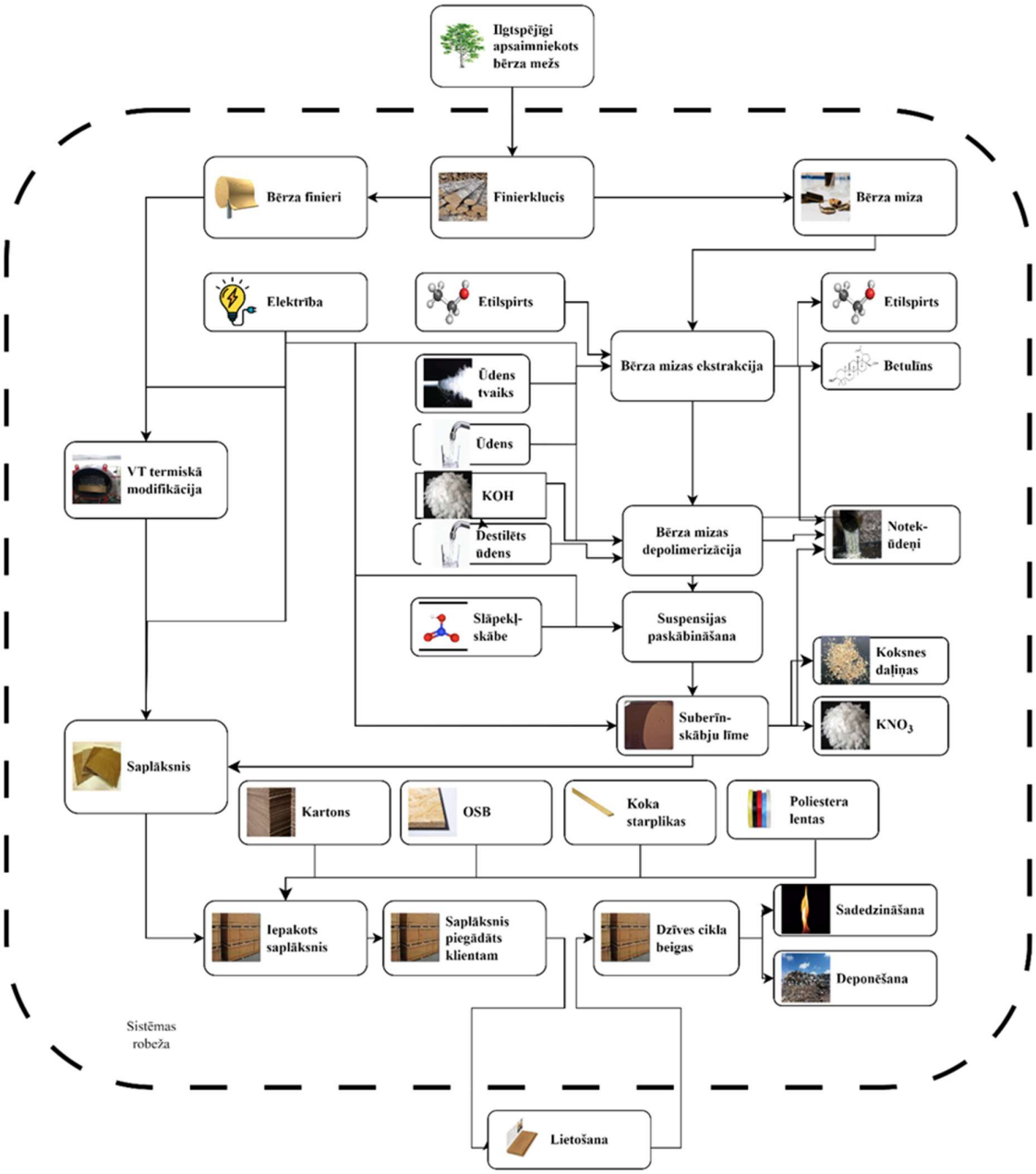
4. **Korelācija starp masas zudumiem un stiprību**
   Novērota korelācija, kas liecina, ka, palielinoties finiera masas zudumiem (ML) termiskās modifikācijas rezultātā, saplākšņa robežstiprība stiepē - bīdē samazinās. Šis stiprības samazinājums bērza saplākšņa gadījumā bija statistiski nozīmīgs, salīdzinot ar nemodificētajiem paraugiem ($p < 0.05$).

5. **Plīsuma raksturs**
   Vidēji vislielākie plīsumi pa koksni (95%) novēroti saplākšņa paraugiem, kuru izgatavošanā izmantoti WTT režīmā modificēti finieri. Tas norāda uz zemākām finieru mehāniskajām īpašībām šajā režīmā. Savukārt mazākie plīsumi pa koksni (55–60%) novēroti 160/50/VT režīmā un nemodificētiem finieriem, jo tiem saglabātas labākas mehāniskās īpašības, salīdzinot ar pārējiem modificēšanas režīmiem.
   Termiski modificētiem finieriem (īpaši 214/120/VT, 217/180/VT un 218/30/VT) biežāk novēroti plīsumi saplākšņa ārējā kārtā, nevis tikai līmes šuvē, kas varētu norādīt uz to, ka esošā standarta EN 314-1:2004 metodika var nebūt pilnībā piemērota termiski modificētas koksnes līmējuma kvalitātes vērtēšanai.

Šī analīze parāda, ka termiski modificētos finierus, kas apstrādāti Termovuoto (VT) procesā, ir iespējams izmantot āra apstākļiem piemērota saplākšņa ražošanai, izmantojot gan komerciālās līmes (FF, PU), gan videi draudzīgo suberīnskābju saistvielu.

3.3. Dzīves cikla novērtējums

Dzīves cikla novērtējums veikts inovatīvam nišas produktam – saplāksnim no 217/180/VT režīmā termiski modificētiem bērza finieriem, kas līmēts ar suberīnskābju saistvielu. Pilns dzīves cikla novērtējums atbilstoši standartiem ISO 14044 un ISO 14040 atrodams darba 1. pielikumā. Darbā apskatītā dzīves cikla novērtējuma sistēmas robeža redzama 3.34. attēlā . Ārpus tvēruma ir ilgstpējīgi apsaimniekots bērza mežs, jo informācija par to pieejama literatūrā (Kuka et al., 2020), kā arī par saplākšņa lietošanas fāzi, jo saplāksnim kā materiālam ir iespējami daudz un dažādi pielietošanas veidi.



3.34. att. **Dzīves cikla novērtējuma sistēmas robeža**

Dzīves cikla novērtējuma (LCA) rezultāti, kas izmantoti vides izmaksu aprēķinam, ir atspoguļoti 3.27. tabulā.

3.27. tabula

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

Ietekmes uz vidi kategorija	Mērvienība	Rezultāts
Sauszemes paskābināšanās	kg SO_2-ekviv.	44.51
Klimata pārmaiņas	kg CO_2-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^2*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_x-ekviv.	17.71
Fotoķīmisko oksidantu veidošanās: ietekme uz sauszemes ekosistēmām	kg NO_x-ekviv.	18.31
Ūdens izmantošana	m^3	722.54

Galvenais ietekmes uz vidi veidojošais faktors eksperimentālajam saplāksnim ir kartupeļu audzēšana, pielietojot tradicionālās lauksaimniecības metodes, lai no kartupeļiem fermentācijas procesā iegūtu etilspirtu, kas nepieciešams bērza tāss ekstrakcijai suberīnskābes saistvielas iegūšanas procesā.

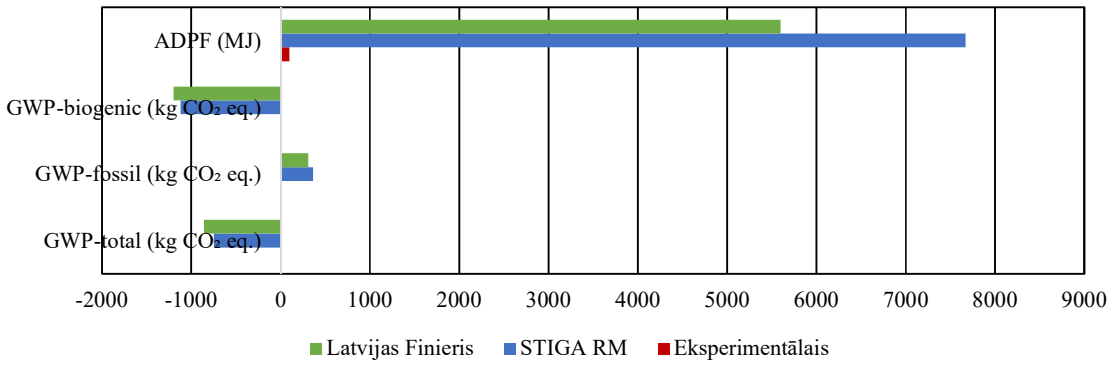
Lai dzīves cikla novērtējuma dati būtu salīdzināmi ar nemodificēta bērza saplākšņa ražotāju datiem, kas norādīti to produktu vides deklarācijās, tika sašaurināts dzīves cikla tvērums, tajā ietverot tikai procesus no šūpuļa līdz rūpnīcas vārtiem jeb moduļus A1-A3. Par funkcionālo vienību izvēloties 1 m^3 saplākšņa. Kā ietekmes uz vidi novērtējuma metode izvēlēta EPD izstrādē lietotā, kas definēta standartā EN 15804+A2:2020. Iegūtie rezultāti moduļiem A1-A3 ir redzami 3.28. tabulā.

3.28 tabula

Ietekmes uz vidi novērtējums saskaņā ar standartu EN 15804+A2:2020

Ietekmes uz vidi kategorija	Mērvienība	Rezultāts
Globālās sasilšanas potenciāls – kopējais (GWP-total)	kg CO_2 ekviv.	4.33
Globālās sasilšanas potenciāls – fosilais (GWP-fossil)	kg CO_2 ekviv.	8.05
Globālās sasilšanas potenciāls - biogēniskais (GWP-biogenic)	kg CO_2 ekviv.	-3.79
Globālās sasilšanas potenciāls – zemes lietojums un zemes lietojuma izmaiņas (GWP-luluc)	kg CO_2 ekviv.	0.06
Stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls (ODP)	kg CFC-11 ekviv.	0.00000031
Paskābināšanās potenciāls (AP)	mol H^+ ekviv.	0.11
Eitrofikācijas potenciāls – saldūdens (EP-freshwater)	kg P ekviv.	0.0041
Eitrofikācijas potenciāls – jūras ūdens (EP-marine)	kg N ekviv.	0.06
Eitrofikācijas potenciāls – sauszeme (EP-terrestrial)	mol N ekviv.	0.44
Fotoķīmiskais ozona rašanās potenciāls (POCP)	kg NMVOC ekviv.	0.04
Abiotiskās noplicināšanās potenciāls – metāli un minerāli (ADPE)	kg Sb ekviv.	0.000041
Abiotiskās noplicināšanās potenciāls – fosilie resursi (ADPF)	MJ	98.37
Ūdens izsīkšanas potenciāls (WDP)	m^3 pasaule, ekviv.	48.73

3.35. attēlā redzama četru ietekmes uz vidi kategoriju salīdzinājums bērza eksperimentālajam saplāksnim 217/180/VT, kas līmēts ar suberīnskābes saistvielu, SIA STIGA RM ražotam nemodificēta bērza saplāksnim, kas līmēts ar fenola-formaldehīda līmi un A/S Latvijas Finieris ražotam nemodificēta bērza saplāksnim, kas līmēts ar fenola-formaldehīda līmi.

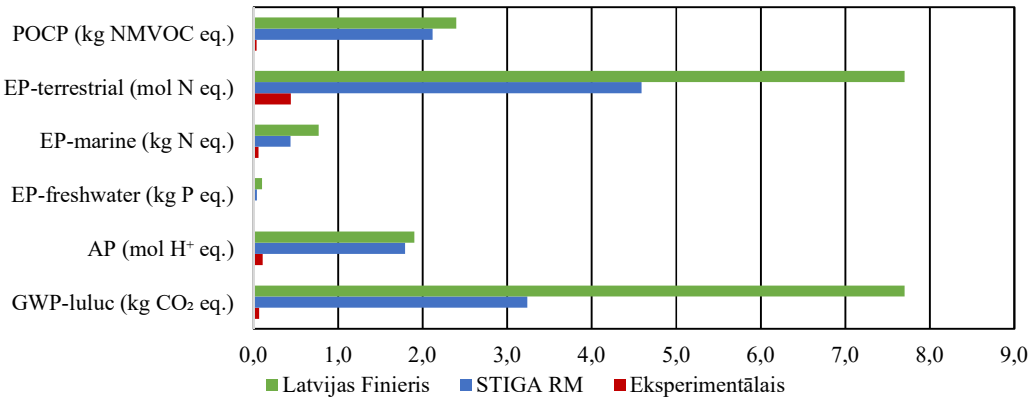


3.35. att. **Globālās sasilšanas potenciāls – kopējais; globālās sasilšanas potenciāls – fosilais; globālās sasilšanas potenciāls - biogēniskais un abiotiskās noplicināšanās potenciāls – fosilie resursi ietekmes uz vidi salīdzinājums saplākšņiem**

Eksperimentāli iegūtais saplāksnis uzrāda būtiskas atšķirības visās četrās kategorijās. ADPF kategorijā būtiski mazāka ietekme saistīta ar to, ka LCA aprēķinā ārpus sistēmas

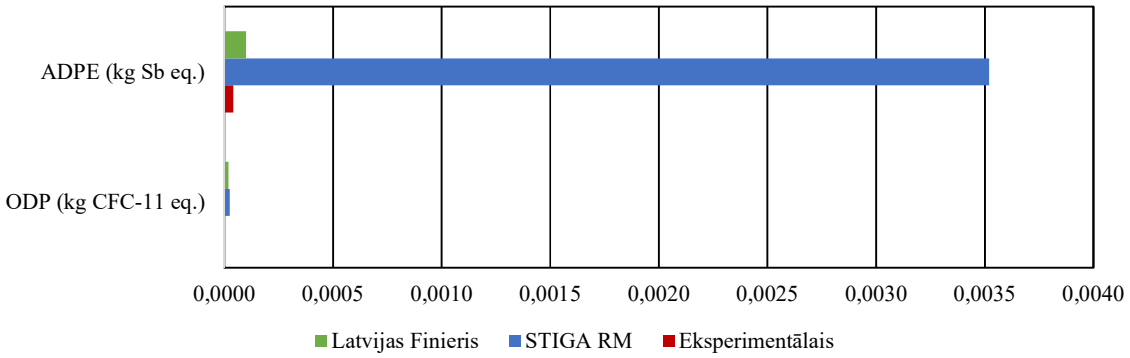
robežām eksperimentālā saplākšņa gadījumā ir iekārtas – laboratorijas izmēra termiskās modifikācijas autoklāvi, prese, un suberīnskābju saistvielas iegūšanas iekārta. GWP rādītājus savukārt būtiski ietekmē iepriekšminētais faktors, kā arī termiskās modificēšanas procesā patērētā elektroenerģija un etanola iegūšanai audzētie kartupeļi.

Attēlā 3.36. redzams nākamo sešu ietekmes uz vidi kategoriju salīdzinājums.



3.36. att. **Fotoķīmiskais ozona rašanās potenciāls; eitrofikācijas potenciāls – sauszeme; eitrofikācijas potenciāls – jūras ūdens; eitrofikācijas potenciāls – saldūdens; paskābināšanās potenciāls; globālās sasilšanas potenciāls – zemes lietojums un zemes lietojuma izmaiņas ietekmes uz vidi salīdzinājums saplākšņiem**

Arī šajā rādītāju grupā redzams, ka eksperimentālā saplākšņa ietekme uz vidi ir būtiski mazāka nekā rūpnieciski ražotu saplākšņu gadījumā. Atšķirību iemesli uzskaitīti jau iepriekš. Un, visbeidzot, pēdējo divu ietekmes uz vidi kategoriju salīdzinājums redzams 3.37. attēlā.



3.37. att. **Abiotiskās noplicināšanās potenciāls – metāli un minerāli; stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls ietekmes uz vidi salīdzinājums saplākšņiem**

Eksperimentālā saplākšņa ietekme uz vidi ir mazāka visās ietekmes uz vidi kategorijās. Galvenā eksperimentālā saplākšņa ietekmes veidojošā komponente ir kartupeļu audzēšana, izmantojot tradicionālo lauksaimniecības praksi, lai no kartupeļiem fermentācijas procesā iegūtu etanolu, kas savukārt tiek izmantots suberīnskābes saistvielas iegūšanas procesā. Zīmīgi, ka arī zemes izmantošanas un zemes izmantošanas maiņas (ZIZIM) kategorijā kartupeļu audzēšana rada lielāku ietekmi nekā bērzu birzs.

3.4. Izmaksu aprēķins

Aprēķinātā tirgus cena eksperimentālajam saplāksnim ir 2176.85 EUR par 1 m^3. Izmaksu sadalījums norādīts 3.29. tabulā. Vieglākai uztveramībai, veikts arī pārrēķins uz 9 mm saplākšņa m^2.

3.29 tabula

Eksperimentālā saplākšņa cena

Pozīcija	Izmaksas, EUR·m^{-3}	Izmaksas, EUR·m^{-2} (9 mm)
Ražošanas izmaksas	**1799.05**	**16.19**
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
Kopējās izmaksas	**1978.95**	**17.81**
Peļņa	197.90	1.78
Iekārtu iegāde	125 289.00	125 289.00
Cena	**2176.85**	**19.59**

Rēķinot saplāksni ar dzīves ciklu 30 gadi, kura laikā bērza saplāksnis būs jānomaina pēc 25 gadiem, bet jākrāso reizi 3 gados, kamēr eksperimentālā saplākšņa dzīves laiks būs 30 gadi un tas būs jākrāso reizi 4 gados. Neto pašreizējā vērtība (NPV) aprēķini rāda, ka eksperimentālā saplākšņa kopējās izmaksas 30 gadu periodā, ņemot vērā diskonta likmi 4% būs 4803.40 EUR, kamēr nemodificēta bērza saplāksnim tās būs 5636.49 EUR. Detalizēts aprēķins – 1. pielikumā.

Ņemot vērā naudas plūsmu, aprēķinātā iekšējā peļņas norma - IRR ir 12%, kas ir lielāka par diskonta likmi 4%. Pārdodot 35 m^3 (3889 m^2 9 mm) eksperimentālā saplākšņa gadā, kapitālieguldījumi atmaksāsies astoņos gados. 3.30. tabulā var redzēt vides izmaksu aprēķinu, kāds būtu jāiegulda katrā no vides kategorijām to radītās ietekmes dzēšanai.

3.30. 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
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

3.30.tabulas nobeigums

Nr.p.k.	Ietekmes uz vidi kategorija	Summa, EUR
18	Ūdens lietošana	294.08

Kopā eksperimentālā saplākšņa ietekmes uz vidi dzēšanai būtu jāiegulda 6976.19 EUR (3.30. tabulas rādītāju summa) uz 1 saražoto m^3 saplākšņa jeb 62.79 EUR uz 1 m^2 9 mm eksperimentālā saplākšņa. Papildus informācija par dzīves cikla novērtējuma un dzīves cikla izmaksu aprēķiniem, kā arī sociālā dzīves cikla novērtējums 1. pielikumā.

4. 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 5.2 līdz 6.7%, kamēr VT 0 līdz 1.2% . 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 saplākšņa līmēšanai, gan nemodificētie, gan visos VT režīmos modificētie finieri (apse, bērzs, papele) atbilst trešajai ekspluatācijas klasei, kas nozīmē, ka saplāksni, kas līmēts ar šo saistvielu, var lietot āra apstākļos.

3. Iegūtā eksperimentālā saplākšņa ietekme uz vidi ir mazāka nekā nemodificētam bērza saplāksnim, visās ietekmes uz vidi kategorijās, taču jāņem vērā darbā apskatītā LCA tvērums.

4. Eksperimentāli iegūtais saplāksnis 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 saplākšņa no termiski modificētas koksnes akustiskās īpašības, tā kā ir publikācijas, kas uzrāda akustisko īpašību uzlabojumu koksnē, arī šis ir viens no izveidotā materiāla izmantošanas veidiem, kas ir izpētes vērts.

2. Ar eksperimentāliem datiem jāpamato ar suberīnskābju saistvielu līmēta bērza saplākšņa izmaiņas novecinot 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 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 koksnei. Taču vēl aizvien trūkst precīzu datu par ar suberīnskābi salīmēta saplākšņa 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 vadītājai 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.

INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

1. Ahmed, S. A., Sehlstedt-Persson, M., & Morén, T. (2013). Mould susceptibility of Scots pine (Pinus sylvestris L.) sapwood: Impact of drying, thermal modification, and copper-based preservative. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *85*, 284–288. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.06.031
2. Allegretti, O., Brunetti, M., Cuccui, I., Ferrari, S., Nocetti, M., & Terziev, N. (2012a). Thermo-vacuum modification of spruce (picea abies karst.) and fir (abies alba mill.) wood. *BioResources*, *7*(3), 3656–3669. https://doi.org/10.15376/biores.7.3.3656-3669
3. Allegretti, O., Cuccui, I., Terziev, N., & Sorini, L. (2020). A model to predict the kinetics of mass loss in wood during thermo-vacuum modification. *Holzforschung*, *Hill 2006*. https://doi.org/10.1515/hf-2020-0127
4. Arhipova, I., & Bāliņa, S. (2003). *Statistika ar Microsoft Excel ikvienam.1.,2.daļa*. Datorzinību centrs.
5. Arias, A., González-Rodríguez, S., Vetroni Barros, M., Salvador, R., de Francisco, A. C., Moro Piekarski, C., & Moreira, M. T. (2021). Recent developments in bio-based adhesives from renewable natural resources. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 314). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127892
6. Attia, A., Aboelenin, R., Kheder, S., Mohmed, G., & El-Shafey, S. (2015). The Effect of Activation Method on the Adsorption Performance of Saw-Dust Activated Carbon. *British Journal of Applied Science & Technology*, *7*(3), 302–315. https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/15664
7. Bastani, A., Militz, H., Adamopoulos, S., & Rohumaa, A. (2016). Development of bonding strength of modified birch veneers during adhesive curing.. *Wood Research*. 61(2), 205-2014
8. Bekhta, P., Pipíška, T., Gryc, V., Sedliačik, J., Král, P., Ráheľ, J., & Vaněrek, J. (2023). Properties of Plywood Panels Composed of Thermally Densified and Non-Densified Alder and Birch Veneers. *Forests*, *14*(1). https://doi.org/10.3390/f14010096
9. Biziks, V., Andersons, B., Beękova, Ļ., Kapača, E., & Militz, H. (2013). Changes in the microstructure of birch wood after hydrothermal treatment. *Wood Science and Technology*, *47*(4), 717–735. https://doi.org/10.1007/s00226-013-0531-1
10. Biziks, V., Andersons, B., Sansonetti, E., Andersone, I., Militz, H., & Grinins, J. (2015). One-stage thermo-hydro treatment (THT) of hardwoods: an analysis of form stability after five soaking-drying cycles. *Holzforschung*, *69*(5), 563–571. https://doi.org/10.1515/hf-2014-0083
11. Biziks, V., Van Den Bulcke, J., Grinins, J., Militz, H., Andersons, B., Andersone, I., Dhaene, J., & Van Acker, J. (2016). Assessment of wood microstructural changes after one-stage thermo-hydro treatment (THT) by micro X-ray computed tomography. *Holzforschung*, *70*(2), 167–177. https://doi.org/10.1515/hf-2014-0337
12. Bland, J. M., & Altman, D. G. (1995). Multiple significance tests: the Bonferroni method. *BMJ*, *310*, 170.
13. Bodîrlău, R., & Teacă, C. A. (2009). Fourier transform infrared spectroscopy and thermal analysis of lignocellulose fillers treated with organic anhydrides. *Romanian Reports of Physics*, *54*(1–2), 93–104.
14. Brischke, C., Welzbacher, C. R., Brandt, K., & Rapp, A. O. (2007). Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE L*a*b* color data on homogenized wood samples. Holzforschung, 61(1), 19–22. https://doi.org/10.1515/HF.2007.004
15. Buro Veritas Latvia. SIA. (2024). *Environmental Product Declaration*. www.environdec.com

16. Candelier, K., & Dibdiakova, J. (2021). A review on life cycle assessments of thermally modified wood. In *Holzforschung* (Vol. 75, Issue 3, pp. 199–224). De Gruyter Open Ltd. https://doi.org/10.1515/hf-2020-0102
17. Candelier, K., Dumarcay, S., Petrissans, A., Gerardin, P., & Petrissans, M. (2014). Advantage of Vacuum versus nitrogen to achieve inert atmosphere during softwood thermal modification. In *Pro Ligno 10 (4)*, 10–17.
18. Candelier, K., Thevenon, M. F., Petrissans, A., Dumarcay, S., Gerardin, P., & Petrissans, M. (2016). Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. In *Annals of Forest Science* (Vol. 73, Issue 3). https://doi.org/10.1007/s13595-016-0541-x
19. Chaouch, M., Petrissans, M., Petrissans, A., & Gerardin, P. (2010). Prediction of Decay Resistance of Different Softwood and Hardwood Species after Heat Treatment Based on Analysis of Wood Elemental Composition. *The Fifth European Conference on Wood Modification : ECWM5,* 135–1141.
20. Chaouch, M., Pétrissans, M., Pétrissans, A., & Gérardin, P. (2010b). Use of wood elemental composition to predict heat treatment intensity and decay resistance of different softwood and hardwood species. *Polymer Degradation and Stability*, *95*(12), 2255–2259. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.09.010
21. Chung, H., Park, Y., Yang, S. Y., Kim, H., Han, Y., Chang, Y. S., & Yeo, H. (2017). Effect of heat treatment temperature and time on sound absorption coefficient of Larix kaempferi wood. *Journal of Wood Science*, *63*(6), 575–579. https://doi.org/10.1007/s10086-017-1662-z
22. Cirule, D., & Kuka, E. (2015). Effect of thermal modification on wood colour. Proceeding of Research of Rural Development. Jelgava
23. Cirule, D., Kuka, E., Kevers, M., Andersone, I., & Andersons, B. (2021). Photodegradation of unmodified and thermally modified wood due to indoor lighting. Forests, 12(8). https://doi.org/10.3390/f12081060
24. Cirule, D., Verovkins, A., Andersone, I., Kuka, E., & Andersons, B. (2020). Thermally modified birch wood interaction with liquids. *European Journal of Wood and Wood Products*, *78*(5), 849–857. https://doi.org/10.1007/s00107-020-01568-z
25. Coates, J. (2000). Interpretation of infrared Spectra, A Practical Approach. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (pp. 10815–10837). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9780470027318
26. Cordier, M., Johannsen, N., Kietz, B., Berthold, D., & Mai, C. (2025). Plywood Manufacturing Using Various Combinations of Hardwood Species. *Forests*, *16*(4). https://doi.org/10.3390/f16040622
27. Curasi, S., Melton, J., Humphreys, E., Arora, V., Beaver, J., Cannon, A., Chen, J., Hermosilla, T., Lee, S. C., & Wulder, M. (2025). Canada's forests are shifting from a recovery-driven carbon sink to a disturbance-driven carbon source. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7935375/v1
28. De Vries, J., De Bruyn, S., Boerdijk, S., Juijn, D., Bijleveld, M., Van Der Giesen, C., Korteland, M., Odenhoven, N., Van Santen, W., & Pápai, S. (2024). *Environmental Prices Handbook 2024: EU27 version*. www.ce.nl
29. Diouf, P. N., Stevanovic, T., Cloutier, A., Fang, C.-H., Blanchet, P., Koubaa, A., & Mariotti, N. (2011). Effects of thermo-hygro-mechanical densification on the surface characteristics of trembling aspen and hybrid poplar wood veneers. *Applied Surface Science*, *257*(8), 3558–3564. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.074
30. Ecoinvent. (2024). *Ecoinvent v3.11*. https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/?_gl=1*1e7wuej*_up*MQ..*_ga*MTY4NzYxNzM2NS4xNzU0NDg3ODg1*_ga_C1J3MVCVZN*czE3NTQ0ODc4ODQkbzEkZzEkdDE3NTQ0ODc4OTAkajU0JGwwJGgw*_ga_3P8YT7402Y*czE3NTQ0ODc4ODQkbzEkZzEkdDE3NTQ0ODc4OTAkajU0JGwwJGgw
31. ECOLWOOD - https://www.ecolwood.com/fr/

32. Ercin, D., & Yurum, Y. (2003). Carbonisation of Fir (Abies bornmulleriana) wood in an open pyrolysis system at 50-300C. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *67*(1), 11–22.
33. Esteves, B. M., & Pereira, H. M. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, *4*(1), 370–404. https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404
34. European Panel Federation. (2024). *Plywood - European Panel Federation*. https://europanels.org/the-wood-based-panel-industry/types-of-wood-based-panels-economic-impact/plywood/
35. Faix, O. (1992). *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (pp. 233–241). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74065-7_16
36. Febrianto, F., Syafii, W., & Barata, A. (2000). Natural durability of Teak Wood (*Tectona grandis* l.f. at various age classess). Jurnal Teknologi Hasil Hutan, 13 (2).
37. Forest Service, U., & Products Laboratory, F. (2010). *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. www.fpl.fs.fed.us.
38. Freeman, M. H., & McIntyre, C. R. (2008). A comprehensive review of copper-based wood preservatives. Forest Products Journal, 58 (11), 6–27.
39. Gao, J., Kim, J. S., Terziev, N., & Daniel, G. (2016). Decay resistance of softwoods and hardwoods thermally modified by the Thermovouto type thermo-vacuum process to brown rot and white rot fungi. *Holzforschung*, *70*(9), 877–884. https://doi.org/10.1515/hf-2015-0244
40. Gayda, S. V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of circular economy. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 51, 4–16. https://doi.org/10.36930/42255101
41. Gérardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood— a review. *Annals of Forest Science*, *73*(3), 559–570. https://doi.org/10.1007/s13595-015-0531-4
42. GreenDelta. (2006). *openLCA*. https://www.openlca.org/
43. Grīniņš Juris. (2016). Bērza saplākšņa īpašību uzlabošana ar hidrotermiskās modifikācijas paņēmienu. RTU, Rīga
44. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organisations 2020 - Life Cycle Initiative. (2020). https://www.lifecycleinitiative.org/library/guidelines-for-social-life-cycle-assessment-of-products-and-organisations-2020/
45. Gupta, B. S., Jelle, B. P., & Rüther, P. (n.d.). *FTIR Spectroscopy as a Tool to Predict Service Life of Wooden Cladding*. Retrieved 1 March 2019, from https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18755.pdf
46. Herrera-Builes, J. F., Osorio, J. A., Sepulveda, V., & Ananias, R. (2022). Chemical and structural changes of ocote pine (Pinus oocarpa) wood caused by thermal modification. Revista Facultad Nacional de Agronomia Medellin, 75(2), 9999–10007. https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n2.97576
47. Hill, C. A. S. (2006). Thermal Modification of Wood. *Wood Modification*, 99–127. https://doi.org/10.1002/0470021748.ch5
48. Hoffmeyer, D., & Munch-Andersen, J. (2024). Withdrawal capacity of screws in plywood and manufacturer dependencies. *Engineering Structures*, *321*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118973
49. Hussin, M. H., Abd Latif, N. H., Hamidon, T. S., Idris, N. N., Hashim, R., Appaturi, J. N., Brosse, N., Ziegler-Devin, I., Chrusiel, L., Fatriasari, W., Syamani, F. A., Iswanto, A. H., Hua, L. S., Al Edrus, S. S. A. O., Lum, W. C., Antov, P., Savov, V., Rahandi Lubis, M. A., Kristak, L., … Sedliačik, J. (2022). Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, *21*, 3909–3946. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.156
50. IBM Corp. (2010). IBM SPSS Statistics for Windows (Version 19.0). IBM Corp.

51. Jämsä, S., Ahola, P., & Viitaniemi, P. (2000). Long-term natural weathering of coated ThermoWood. *Pigment and Resin Technology*, *29*(2), 68–74. https://doi.org/10.1108/03699420010317807
52. Jančíková, V., & Jablonský, M. (2025). Thermal Modification of Wood—A Review. In Sustainable Chemistry (Vol. 6, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/suschem6030019
53. Jebrane, M., Cuccui, I., Allegretti, O., Jr, U., & Terziev, N. (2018). *Thermowood ® vs Termovuoto process – comparison of thermally modified timber in industrial conditions*. *September*.
54. Jia, L., Chu, J., Ma, L., Qi, X., & Kumar, A. (2019). Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(11). https://doi.org/10.3390/ijerph16112037
55. Jones, D., Sandberg, D., Goli, G., & Todaro, L. (2019). *Wood modification in Europe : a state-of-the-art about processes, products and applications* (p. 123).
56. Kacuráková, M. (2000). FT-IR study of plant cell wall model compounds: pectic polysaccharides and hemicelluloses. *Carbohydrate Polymers*, *43*(2), 195–203. https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00151-X
57. Kallakas, H., Rohumaa, A., Vahermets, H., & Kers, J. (2020). Effect of different hardwood species and lay-up schemes on the mechanical properties of plywood. *Forests*, *11*(6), 1–13. https://doi.org/10.3390/f11060649
58. Karlsson, O., Sidorova, E., & Morén, T. (2011). Influence of heat transferring media on durability of thermally modified wood. BioResources, 6(1), 356–372.
59. Karthikeyan Dhanakotti. (2024). *Evaluating Distributional Differences: One-Sample vs Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Tests*. https://dkaarthick.medium.com/evaluating-distributional-differences-one-sample-vs-two-sample-kolmogorov-smirnov-tests-20db357998a9
60. Keržič, E., Lesar, B., & Humar, M. (2021). Influence of Weathering on Surface Roughness of Thermally modified Wood. *BioResources*, *16*(3), 4675–4692.
61. Khademi Bami, L., & Mohebby, B. (2011). Bioresistance of poplar wood compressed by combined hydro-thermo-mechanical wood modification (CHTM): Soft rot and brown-rot. International Biodeterioration and Biodegradation, 65(6), 866–870. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.03.011
62. Kim, J. S., Gao, J., Terziev, N., Allegretti, O., & Daniel, G. (2015). Chemical and ultrastructural changes of ash wood thermally modified (TMW) using the thermo-vacuum process: II. Immunocytochemical study of the distribution of noncellulosic polysaccharides. *Holzforschung*, *69*(5), 615–625. https://doi.org/10.1515/hf-2014-0149
63. Kocaefe, D., Poncsak, S., & Boluk, Y. (2008). Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. BioResources, 3(2), 517–537
64. Korkut, S., Korkut, D. S., Kocaefe, D., Elustondo, D., Bajraktari, A., & Çakicier, N. (2012). Effect of thermal modification on the properties of narrow-leaved ash and chestnut. *Industrial Crops and Products*, *35*(1), 287–294. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.07.016
65. Kotilainen, R. (2000). *Chemical changes in wood during heating at 150-260 C*. University of Jyväskylä.
66. Kral, P., & Hrazsky, J. (2006). jfs_jfs-200606-0004. *Journal of Forest Science*, *52*(6), 285–292.
67. Krutul, D., Antczak, A., Radomski, A., Drożdżek, M., Kłosińska, T., & Zawadzki, J. (2019). The chemical composition of poplar wood in relation to the species and the age of trees (Vol. 107).
68. Kúdela, J., Kubovský, I., & Andrejko, M. (2024). Discolouration and Chemical Changes of Beech Wood After CO2 Laser Engraving. Forests, 15(12). https://doi.org/10.3390/f15122211

69. Kuka, E., Cirule, D., Andersone, I., Miklasevics, Z., & Andersons, B. (2020). Life cycle inventory for currently harvested birch roundwood. European Journal of Wood and Wood Products, 78(5), 859–870. https://doi.org/10.1007/s00107-020-01544-7
70. Kūliņš, L., Meija, A., Roziņš, R., Liepa, K. H., & Spulle, U. (2021). Influence of Veneer Density on Plywood Thickness and Some Mechanical Properties. *Rural Sustainability Research*, *46*(341), 66–74. https://doi.org/10.2478/plua-2021-0018
71. Lebow, S. (2004). Alternatives to Chromated Copper Arsenate for Residential Construction. Proceedings of Environmental Impacts of Preservative-Treated Wood, 1–9. www.fpl.fs.fed.us.
72. Li, D., & Neumann, A. W. (1992). Equation of state for interfacial tensions of solid-liquid systems. *Advances in Colloid and Interface Science*, *39*, 299–345. https://doi.org/10.1016/0001-8686(92)80064-5
73. Liu, Y., Hu, J., Gao, J., Guo, H., Chen, Y., Cheng, Q., & Via, B. K. (2015). Wood Veneer Dyeing Enhancement by Ultrasonic-assisted Treatment. *BioResources*, *10*(1), 1198–1212. https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1198-1212
74. Lovrić, A., Zdravković, V., & Furtula, M. (2014). INFLUENCE OF THERMAL MODIFICATION ON COLOUR OF POPLAR (POPULUS X EURAMERICANA) ROTARY CUT VENEER. *Wood Research*, *59*(2), 661–670. http://www.centrumdp.sk/wr/201404/12.pdf
75. Lynn Gamache, S., & Omar Espinoza, A. (2017). Professional Consumer Perceptions of Thermally-Modified Wood. BioResources; 12: 9487-9501.
76. Mania, P., Flach, A., & Pilarska, M. (2023). Sound Wave Absorption Coefficient and Sound Velocity in Thermally Modified Wood. *Applied Sciences (Switzerland)*, *13*(14). https://doi.org/10.3390/app13148136
77. Masoumi, A., Balma, F. X. Z., & Bond, B. H. (2023). Adhesive bonding performance of thermally modified yellow poplar. *BioResources*, *18*(4), 8151–8162.
78. 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 (Switzerland)*, *17*(5). https://doi.org/10.3390/su17051990
79. 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), 4150–4164.
80. Mohajerani, A., Vajna, J., & Ellcock, R. (2018). Chromated copper arsenate timber: A review of products, leachate studies and recycling. Journal of Cleaner Production, 179, 292–307. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.01.111
81. Mondal, I., Groves, M., Driver, E. M., Vittori, W., & Halden, R. U. (2024). Carcinogenic formaldehyde in U.S. residential buildings: Mass inventories, human health impacts, and associated healthcare costs. *Science of the Total Environment*, *944*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173640
82. Morozovs, A., Irbe, I., & Bukšāns, E. (2018). Koksnes ķīmiskā pārstrāde un aizsardzība. Izdevniecība 'Avots'.
83. Nakano, K., Hattori, N., Koide, M., Imago, M., Yamada, Y., Ogawa, T., & Toyoshima, Y. (2025). Environmental impacts of structural and concrete formwork plywood in Japan. *Journal of Wood Science*, *71*(1). https://doi.org/10.1186/s10086-025-02202-3
84. Nandasiri, H. I. S. I., & De Silva, R. C. L. (2019). Improving shelf life of commercial borate-glycol based wood preservatives. In International Research Symposium on Pure and Applied Sciences.
85. Negro, F., Cremonini, C., Properzi, M., & Zanuttini, R. (2015). Sound absorption coefficient of perforated plywood: An experimental case study. Conference WCTE 2010, Riva Garda, Italy

86. Ozgenc, O., Durmaz, S., Hakki Boyaci, I., & Eksi-Kocak, H. (2018). ATR-FTIR spectroscopic analysis of thermally modified wood degraded by rot fungi. Drewno , 61(201). https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.247.02
87. OpenAI. (2025). *ChatGPT (GPT-5.1) [LLM]*. https://chat.openai.com
88. Papadopoulou, E., & Chrissafis, K. (2011). Thermal study of phenol–formaldehyde resin modified with cashew nut shell liquid. *Thermochimica Acta*, *512*(1–2), 105–109. https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.09.008
89. Pétrissans, M., Chaouch, M., Gérardin, P., Dumarçay, S., & Pétrissans, A. (2013). Effect of heat treatment intensity on some conferred properties of different European softwood and hardwood species. *Wood Science and Technology*, *47*(4), 663–673. https://doi.org/10.1007/s00226-013-0533-z
90. Pfriem, A. (2015). Thermally modified wood for use in musical instruments. *Drvna Industrija*, *66*(3), 251–253. https://doi.org/10.5552/drind.2015.1426
91. Pizzi, A. ., & Mittal, K. L. . (2003). Handbook of adhesive technology. 1024.
92. Plomion, C., Leprovost, G., & Stokes, A. (2001). Wood formation in trees. In Plant Physiology (Vol. 127, Issue 4, pp. 1513–1523). American Society of Plant Biologists. https://doi.org/10.1104/pp.010816
93. Radosavljevic, V. (2025). Human Exposure to Pentachlorophenol. Assessing Human Exposure to Key Chemical Carcinogens, 91–97. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84441-6_22
94. Rajković, J. , V, & Miklečič, J. (2018). Weathering Resistance of Modified Wood-A Review. *Jubillee Annual 2017-2018 of the Croatian Academy of Engineering*, 223–246.
95. Ramata Luīze. (2024). *Suberīnskābes saistvielas izmantošanas iespējas termiski modificētiem apses (Populus tremula L.), bērza (Betula pendula Roth.) un papeles (Populus x canadensis MOench.) finieriem*.
96. ReCiPe metode - https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe
97. Revina, I. (2002). Ekonometrija. Latvijas universitāte.
98. Rižikovs Jānis, Pāže Aigars, Makars Raimonds, & Tupčiauskas Ramūnas. (2021). *A method for obtaining thermoreactive binders for a production of wood composite materials from birch outer bark*.
99. Ruponen, J., Čermák, P., Rhême, M., & Rautkari, L. (2015). Reducing the moisture sensitivity of linear friction welded birch (Betula pendula L.) wood through thermal modification. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *29*(22), 2461–2474. https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1069721
100. Sandak, A., Sandak, J., & Allegretti, O. (2015). Quality control of vacuum thermally modified wood with near infrared spectroscopy. *Vacuum*, *114*, 44–48. https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2014.12.027
101. Sandak, A., Sandak, J., Cuccui, I., Allegretti, O., Zanuttini, R., Negro, F., Cremonini, C., Rosso, L., & Castro, G. (2015b). Thermal modification of poplar veneers in vacuum conditions. *European Conference on Wood Modification 2015 Thermal*, 1–7.
102. Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*, *8*(1), 64–88. https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935
103. Sandberg, D., Kutnar, A., & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies - A review. In *IForest* (Vol. 10, Issue 6, pp. 895–908). SISEF - Italian Society of Silviculture and Forest Ecology. https://doi.org/10.3832/ifor2380-010
104. Santoni, I., & Pizzo, B. (2011). Effect of surface conditions related to machining and air exposure on wettability of different Mediterranean wood species. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *31*(7), 743–753. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.07.002
105. Saroj, S., Sarangi, R. K., Das, D., & Nayak, R. K. (2019). Enhancemenet of Mechanical and Vibrational Properties of Plywood for Packaging and Container Applications.

Materials Today: Proceedings, *18*, 3952–3957. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.336
106. Shapiro, S. S., & Wilk, A. M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples)! *Biometrika*, *52*, 591–611. http://biomet.oxfordjournals.org/
107. Shirmohammadli, Y., Pizzi, A., Raftery, G. M., & Hashemi, A. (2023). One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review. In *International Journal of Adhesion and Adhesives* (Vol. 123). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103358
108. Šillers Haralds. (2022). TERMISKI MODIFICĒTU APSES, BĒRZA UN PAPELES FINIERU LĪMĒŠANA. LBTU, Jelgava
109. Slabejová, G., Langová, N., & Deáková, V. (2017). Influence of silicone resin modification on veneer tensile strength and deformation. Acta Facultatis Xylologiae, 59(1), 41–47. https://doi.org/10.17423/afx.2017.59.1.04
110. Spulle, U., Meija, A., Kūliņš, L., Kopeika, E., Liepa, K. H., Šillers, H., & Zudrags, K. (2021). Influence of Hot Pressing Technological Parameters on Plywood Bending Properties. *BioResources*, *16*(4), 7550–7561. https://doi.org/10.15376/BIORES.16.4.7550-7561
111. Stokland, J. N., Siitonen, J., & Jonsson, B. G. (2012). Biodiversity in Dead Wood. Cambridge University Press.
112. Suhaimi, B. E., Mojtaba, S., Hua, L. S., & Zaidon, A. (2019). A METHOD OF MAKING COMPREG PALM WOOD (Patent WO2014057583A1 2014-04-17). https://www.sumobrain.com/patents/wipo/Method-making-compreg-palm-wood/WO2019017762A1.html
113. Tarmian, A., & Mastouri, A. (2019). Changes in moisture exclusion efficiency and crystallinity of thermally modified wood with aging. IForest, 12(1), 92–97. https://doi.org/10.3832/ifor2723-011
114. Thoemen, Heiko. (2010). *Wood-based Panels - An Introduction for Specialists*. Brunel University Press.
115. United Nations. (2015). *Paris Agreement*.
116. Veizović, M., Straže, A., Todorović, N., Čufar, K., Merela, M., & Milić, G. (2018). Characterization of subfossil oak wood from central Serbia using SEM and FTIR spectroscopy. In G. Milič, N. Todorovič, T. Palija, & A. Kutnar (Eds.), *Living with modified wood* (pp. 80–81). University of Belgrade.
117. Villasante, A., Laina, R., Rojas, J. A. M., Rojas, I. M., & Vignote, S. (2013). Mechanical properties of wood from Pinus sylvestris L. treated with light organic solvent preservative and with waterbone copper azole. Forest Systems, 22(3), 416–422. https://doi.org/10.5424/fs/2013223-03857
118. Walker, K., Rajput, H., Murray, A., Stratton, G. W., Murray, G., & He, Q. (2023). Fungal Resistance and Leaching Behavior of Wood Treated with Creosote Diluted with a Mixture of Biodiesel and Diesel. Forests, 14(3). https://doi.org/10.3390/f14030625
119. Wan, R., Xiong, X., Fu, S., Xiong, D., & Xu, X. (2025). Life cycle assessment and optimization scenarios of sofas: a case study in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–17. https://doi.org/10.1007/S11367-025-02447-6/METRICS
120. WDE-Maspell - https://www.wde-maspell.com/
121. Willems, W., Gérardin, P., & Militz, H. (2013). The average carbon oxidation state of thermally modified wood as a marker for its decay resistance against Basidiomycetes. *Polymer Degradation and Stability*, *98*(11), 2140–2145. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.003
122. Xiong, G., Hong, L., Ju, Z., Lu, X., & Jin, J. (2023). Curing Process of Phenol Formaldehyde Resin for Plywood under Vacuum Conditions. *Journal of Renewable Materials*, *11*(9), 3447–3461. https://doi.org/10.32604/jrm.2023.027430

123. Xu, J., Zhang, Y., Shen, Y., Li, C., Wang, Y., Ma, Z., & Sun, W. (2019). New perspective on wood thermal modification: Relevance between the evolution of chemical structure and physical-mechanical properties, and online analysis of release of VOCs. *Polymers*, *11*(7). https://doi.org/10.3390/polym11071145
124. Yadav, P., Korpinen, R., Räty, T., Korkalo, P., Räsänen, K., Tienaho, J., & Saranpää, P. (2024). Life cycle assessment of suberin and betulin production from birch bark. *Journal of Cleaner Production*, *474*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143570
125. Zanuttini, R., Castro, G., Cremonini, C., Negro, F., & Palanti, S. (2020). Thermo-vacuum treatment of poplar (Populus spp.) plywood. *Holzforschung*, *74*(1), 60–67. https://doi.org/10.1515/hf-2019-0049
126. Zudrags, K. (2024). *Birch Plywood from Stiga RM*. https://stigarm.lv/

Standarti un normatīvi

1. AWPA E10-08. *Standard method of testing wood preservatives by laboratory soil-block cultures.* Birmingham:American Wood-Preservers Association (AWPA), 2008.
2. ISO 13061-1:2014. *Physical and mechanical properties of wood Test methods for small clear wood specimens.* International Organization for Standardization. Switzerland, 1975.
3. ISO 13061-2:2014. *Physical and mechanical properties of wood Test methods for small clear wood specimens.* International Organization for Standardization. Switzerland, 1975.
4. LVS EN 113-2:2021. *Koksnes un koksnes materiālu ilgmūžība. Testa metode aizsarglīdzekļiem pret koksni noārdošām bazīdijsēnēm. 2.daļa. Dabiskās vai paaugstinātās ilgmūžības novērtēšana.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
5. LVS EN 15804+A2+AC:2022. *Ilgtspējīga būvniecība. Izstrādājumu vides deklarācijas. Pamatnoteikumi būvizstrādājumu kategoriju noteikšanai.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
6. LVS EN 1995-1-1+AC+A1:2012 5. *Eirokodekss: Koka konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: Vispārīgi. Vispārīgie noteikumi un noteikumi būvēm.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
7. LVS EN 252:2015. *Lauka testa metode koksnes konservanta relatīvās aizsardzības efektivitātes noteikšanai tā saskarē ar zemi*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
8. LVS EN 314-1:2005. *Saplāksnis - Līmējuma kvalitāte - 1.daļa: Testa metodes.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
9. LVS EN 314-2:2000. *Saplāksnis - Līmēšanas kvalitāte - 2.daļa: Prasības.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
10. LVS EN 335:2013. *Koksnes un tās izstrādājumu ilgizturība. Lietojumklases: Definīcijas, to piemērošana masīvkoksnei un koksnes izstrādājumiem.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
11. LVS EN 350:2016. *Koksnes un koksnes materiālu ilgmūžība. Koksnes un koksnes materiālu testēšana un klasificēšana pēc izturības pret bioloģiskajiem aģentiem.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
12. LVS EN 351-1:2023. *Koksnes un koka izstrādājumu ilgizturība. Antiseptizētā masīvkoksne. 1.daļa: Antiseptizējošo vielu iespiešanās un saglabāšanās klasifikācija.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
13. LVS EN 927-3:2020. *Krāsas un lakas. Pārklājumu materiāli un pārklājumu sistēmas koksnei ārdarbos. 3.daļa: Dabiskās novecināšanas tests.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
14. LVS EN ISO 14025:2022. *Vides marķējumi un deklarācijas. Trešā tipa vides deklarācijas.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.

15. LVS EN ISO 14040+A1:2022. *Vides pārvaldība. Dzīves cikla novērtēšana. Principi un struktūra.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
16. LVS EN ISO 14044:2006/A2:2021. *Vides pārvaldība. Dzīves cikla novērtēšana. Prasības un vadlīnijas.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
17. LVS EN ISO 4624:2023. *Krāsas un lakas. Adhēzijas noteikšana ar atraušanas testu.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
18. LVS EN ISO/CIE 11664-4:2019. *Kolorimetrija. 4.daļa: CIE 1976 L*a*b* krāstelpa.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
19. NVN-ENV 12038:2002. *Durability of wood and wood-based products - Wood-based panels - Method of test for determining the resistance against wood-destroying basidiomycetes*. Šobrīd aizstāts ar EN 113-3:2023.
20. *ГОСТ 20800-75. Шпон лущеный. Методы испытаний*. (1976). https://internet-law.ru/gosts/gost/25650/

PIELIKUMI

1. pielikums

Report

Life Cycle Assessment (LCC and S-LCA) of Plywood from Thermally Modified Birch Veneers Bonded with Suberinic Acids Adhesive

***Mg. sc. ing.* Anete Meija**

Jelgava

2025

INTRODUCTION

Wood-based materials are considered materials of the future; however, like any other material, they possess certain disadvantages, such as anisotropy, biodegradation caused by fungi, and swelling and shrinkage. Plywood is a material whose structure addresses the problem of anisotropy, while thermal modification of wood is a method used to improve its dimensional stability and biological durability. The adhesive used in plywood production is also of great importance. Instead of phenol-formaldehyde adhesives, suberic acid-based adhesives derived from outer birch bark can be successfully used. These adhesives ensure better indoor air quality and have been proven suitable for plywood applications under outdoor conditions. At first glance, the composition of such a material appears green and environmentally friendly; however, whether this is truly the case can only be determined by conducting a complete life cycle assessment.

1. GOAL AND SCOPE

1.1. General info – This LCA focuses on plywood produced from birch veneers thermally modified using the Termovuoto® process at 217 °C for 3 hours, bonded with a suberinic acid adhesive derived from birch bark, and intended for outdoor applications (bonding class 3 according to EN 314-2) (Meija et al., 2025).

1.2. Function of product system - Niche construction material (moisture-resistant plywood with zero formaldehyde emissions)

1.3. Functional unit, reference flows, key parameters – functional unit -1m^3, reference flow - ordinary birch plywood, glued with phenol-formaldehyde resin; key parameters- density 615$kg \cdot m^{-3}$, Bonding class 3.

1.4. Flowchart & system boundary – The flowchart is presented in Figure 1. The system boundary covers the entire life cycle from cradle to grave, excluding the use phase due to the diverse potential applications of plywood.

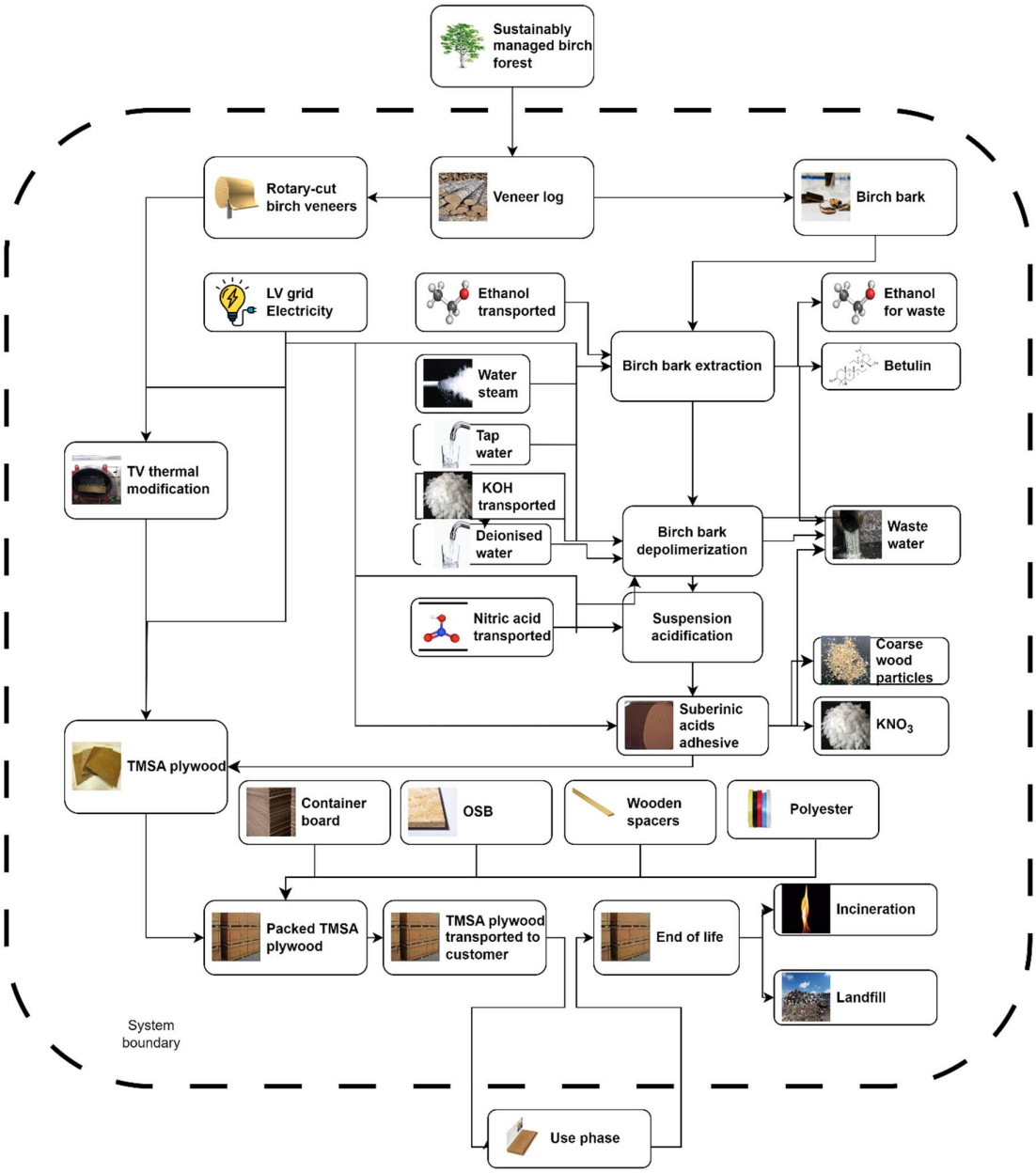


Fig. 1.1. **System boundary**

2. LIFE CYCLE INVENTORY

2.1. Inventory table

The inventory table is shown below (Table 2.1); all amounts are calculated to **1 m^3** of plywood.

Table 2.1

Inventory table

Name of process/material	**Amount per FU**	**Source (please add the source of the data, such as "Ecoinvent" or any other)**	**Comments**
Function		Construction material - plywood	Manufacturing place _ Riga, Dzerbenes 27 (experimental material), where both TM and glue manufacturing happen.
Functional unit (FU)	$1m^3$ or 615 kg of plywood	Experimental data	plywood density 615 $kg \cdot m^{-3}$
Raw materials extraction (5-10)	68.4 kg	Experimental data	
1Birch bark	68.4 kg	Experimental data	
2 Ethanol 96%	615.62 kg	Experimental data	density 789 $kg \cdot m^{-3}$, 90% of it can be potentially recycled
3 KOH	22.80 kg	Experimental data	
4 HNO_3	27.77kg	Experimental data	
5 Birch veneers	657.78 kg	Experimental data	
Transportation kg·km transported to the manufacturing			
Birch bark		Ecoinvent 3.11.	
Distance	10 km		Birch bark from Latvijas finieris "Furniers" Skaistkalnes iela 2A, Zemgales priekšpilsēta, Riga, Latvia
Type of the lorry	EURO 5	EURO 5 Lorries are mentioned by plywood manufacturers in Latvijas finieris and Stiga RM EPD`s (Latvia)	7.5-16t
Birch veneers		Ecoinvent 3.11.	
Distance	10 km		Birch bark from Latvijas finieris "Furniers" Skaistkalnes iela 2A, Zemgales priekšpilsēta, Riga, Latvia
Type of the lorry	EURO 5	Ecoinvent 3.11.	7.5-16t
Ethanol		Ecoinvent 3.11.	7.5-16t
Distance	130km		Ethanol- Kalsnava, Latvia, from fermentation
Type of the lorry	EURO 5	Ecoinvent 3.11.	7.5-16t

Table 2.1. continue

Name of process/material	Amount per FU	Source (please add the source of the data, such as "Ecoinvent" or any other)	Comments
KOH		Ecoinvent 3.11.	
Distance to distributor	1712 km		VYNOVA THANN, FRANCE
Distance from distributor to manufacturing	25 km		KOH from Brenntag Ciedri, Ķekavas novads
Type of the lorry	EURO 5	Ecoinvent 3.11.	7.5-16t
HNO_3		Ecoinvent 3.11.	
Distance to distributor	1010 km		BASF, Germany
Distance from distributor to manufacturing	25 km		HNO_3 from Brenntag Ciedri, Ķekavas novads, Latvia
Type of the lorry	EURO 5	Ecoinvent 3.11.	
Manufacturing (please add stages separately)			
Birch bark extraction			
Water usage			
water steam	71.82 kg		
tap water	19000.68 kg		
Electricity	266.08 kWh		
Birch bark depolimerization			
Water usage			
Water steam	71.82kg	Experimental data	
Tap water	1901.57 kg	Experimental data	
Purified water	569.79kg	Experimental data	
Electricity	19.02 kWh	Experimental data	
Acidification			
Water usage	0		
Electricity	19.02 kWh	Experimental data	
Production of suberinic acid adhesive			
Water usage	285.23 kg	Experimental data	
Electricity	19.02 kWh	Experimental data	
Production of thermally modified veneers			
Water usage	0		
Electricity	1280.94 kWh	For 0.5 m^3 of veneers, heating - 440 kWh, vacuum 8.55 kWh, circulation 128,44 kWh - experimental data	
Production of plywood			
Water usage	0		

Table 2.1. end

Name of process/material	Amount per FU	Source (please add the source of the data, such as "Ecoinvent" or any other)	Comments
Electricity	278 kWh	Dryer efficiency - 60%, press efficiency - 50%	1.8 $kJ \cdot kg^{-1}K^{-1}$ - specific heat of wood, 190 - temperature difference 25 °C and 215 °C- pressing temperature
Packaging			
Container board	1.23 kg	EPD of birch plywood manufacturer "Latvijas finieris" 0.2%	
OSB	12. 915 kg	EPD of birch plywood manufacturer "Latvijas finieris" 2.1%	
Polyester	0.615 kg	EPD of birch plywood manufacturer "Latvijas finieris" 0.1%	
Wooden spacers	6.765 kg	EPD of birch plywood manufacturer "Latvijas finieris" 0.1%	
Transportation kg/km transported to the consumer			
Distance	300 km	Assume the customer is in Latvia	
Type of the lorry	EURO 5	Ecoinvent 3.11.	7.5-16t
Usage stage (optional)			
Excluded			
Transportation $kg \cdot km^{-1}$ transported to the waste treatment facility			

2.2.Allocation

Two allocation points have been identified in the system.

The first occurs during birch bark extraction, which produces two outputs: a triterpene extract (betulin) and extracted birch bark intended for depolymerisation. A mass-based (physical) allocation was applied using experimental data, where betulin represents 11.51 wt% of the total output and the extracted birch bark accounts for 88.49 wt%. When calculated per functional unit, this corresponds to 526.01 kg of ethanol-extracted birch outer bark mixture and 68.40 kg of betulin and extractives mixture, giving a total of 594.41 kg. As betulin is a commercially valuable compound widely used in cosmetics, it cannot be considered waste.

The second allocation point occurs at the end-of-life stage. It is assumed that, for a total panel mass of 615 kg, 307.5 kg is sent to landfill and 307.5 kg to incineration.

In all other processes, allocation is not required, as only waste without economic value is generated.

2.3 Assumptions and limitations

Assumptions

1. Functional unit- 1 m^3 of TMSA plywood; density 615 $kg \cdot m^{-3}$
2. Manufacturing place - Riga, Dzerbenes 27 (experimental material), both TM and glue manufacturing happen there
3. Packaging the same as for common birch plywood manufactured by Latvijas Finieris (EPD)
4. Container board from Stora Enso Packaging Riga Tiraines iela 5, Riga
5. OSB from Kronospan Riga Daugavgrīvas šoseja 7B, Rīga (LV-1016)
6. PET polyester strapping SIA Oberts, Mārupītes gatve 9a, Mārupe, Mārupes novads, LV-2167, Latvija
7. Wooden spacers SIA Gaujas koks Gaujas iela 24/34, Vangaži, Vangažu pilsēta, Ropažu novads, LV-2136
8. Transport - freigth, lorry, 7.5-16 metric tonnes, diesel, EURO5 for all distances
9. KOH from Brenntag Ciedri, Ķekavas novads – local supplier
10. KOH manufacturer - VYNOVA located in THANN, FRANCE
11. HNO_3 from Brenntag Ciedri, Ķekavas novads – local supplier
12. HNO_3 manufacturer - BASF, Germany
13. Ethanol production - Kalsnava, Latvija, from fermentation of potatoes
14. Birch bark and veneers from Latvijas finieris "Furniers" Skaistkalnes iela 2A, Zemgales priekšpilsēta, Rīga
15. The customer is in Latvia, distance to end-user – 300 km
16. Plywood production: dryer efficiency - 60%, press efficiency - 50%
17. Electricity – medium voltage as it would be in a factory; Latvia mix
18. Landfill – Getliņi Eko in Riga

Limitations

Data availability in the Ecoinvent database:

1. Veneer log from birch, imported from Europe, is not considered to benefit from using birch from local Latvian forests
2. Most of the data - Europe, not specific to Latvia, except for the electricity mix
3. Sustainable birch forestry in Latvia is excluded from the system boundary (Kuka et al., 2020), as well as the use phase of plywood as a material, may have different applications
4. Nitric acid concentration in Ecoinvent 50%, HNO_3 concentration used in process - 65%
5. Thermal modification process emissions to the air and water are not modelled due to the lack of experimental data.
6. Data gathered from the experimental process, not from the existing large-scale manufacturing process

3. LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT

3.1.Environmental profile

Mid-point impact on the environment categories, LCIA method EF v3.1:

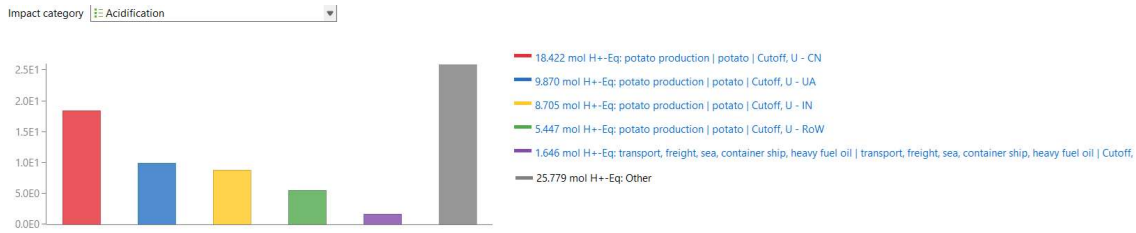


Fig. 3.1. **Acidification**

The primary contributor to this impact on the environment category is potato production, as conventional agriculture relies on nitrogen-containing fertilisers. The total impact assessment result in this category according to EF v3.1. method is 69.87 mol $H^{+}_{eq.}$, where 62.50 mol $H^{+}_{eq.}$, comes from potato production upstream processes. Potatoes are used for ethanol production in the factory Kalsnava, and then for birch bark extraction.

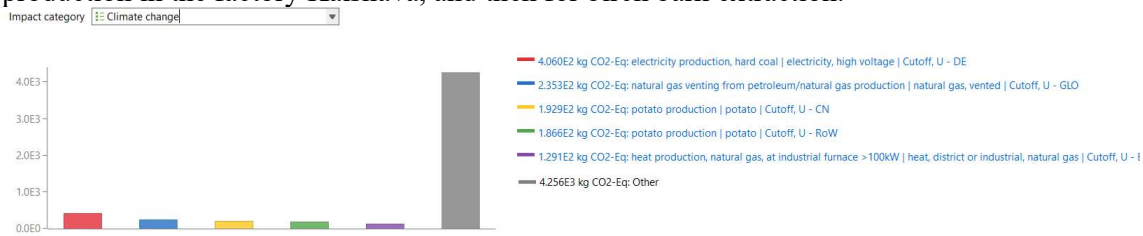


Fig. 3.2. **Climate change total**

The primary contributor to the total climate change category is the production of suberinic acid adhesive; upstream processes account for 78.14% of the total impact, mainly due to ethanol production from potatoes, while the production of thermally modified veneers accounts for only 16.58%. The total impact in this category is 5405 kg $CO_{2\ eq.}$

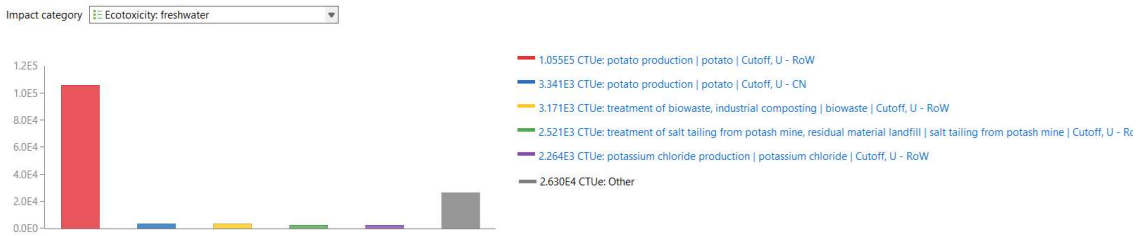


Fig. 3.3. **Ecotoxicity: freshwater**

Also in this category, the agricultural process – potato production gives the most significant impact. The total amount in this category is 143100 CTUe.

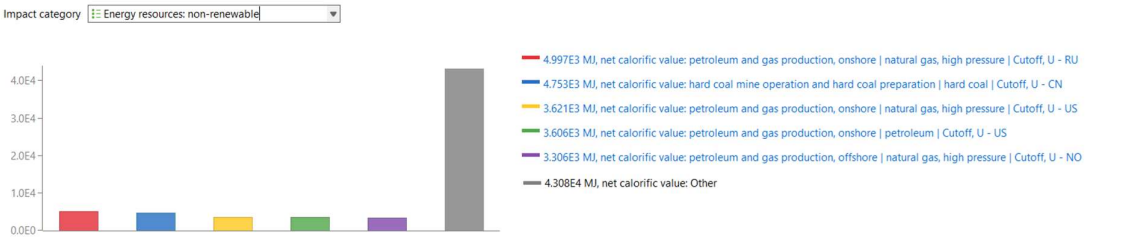


Fig. 3.4. **Energy resources: non-renewable**

The most significant contributor to this impact category is ethanol production from potatoes, where the upstream total of this process is 64.89% of total emissions. Total amount in this impact category 63360 MJ, net calorific value.

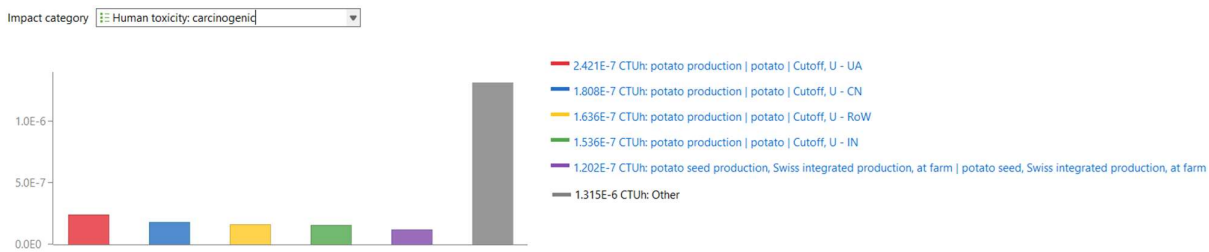


Fig. 3.5. **Human toxicity: carcinogenic**

And again, agriculture seems to be the most significant process influencing the result. Ethanol production from potatoes accounts for 89.68% of upstream. The processes are not carcinogenic; the total impact is 0.000002175 CTUh.

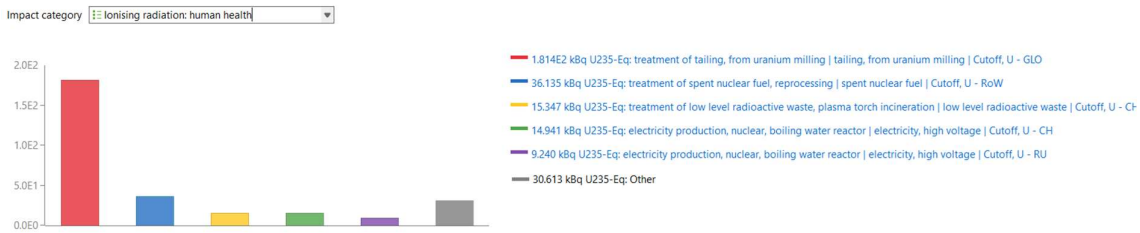


Fig.3.6. **Ionising radiation: human health**

The primary contributor is the treatment of uranium milling tailings. The contribution between the two main processes- plywood thermal modification and suberinic acids adhesive production is significant. 52.86% upstream total for suberinic acids adhesive and 38.16% for thermally modified veneers. The total impact is 287.6 kBq $U235_{eq.}$

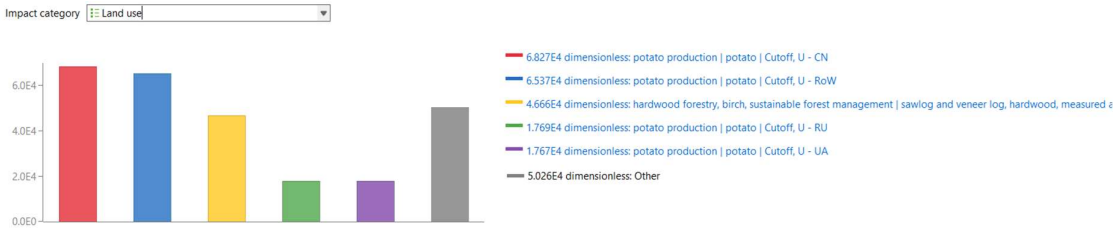


Fig. 3.7. **Land use**

Agriculture and potato production contribute more to the Land Use category (80.29%) than birch wood forestry (17.56%) for this particular product. Total impact 265900 (dimensionless).

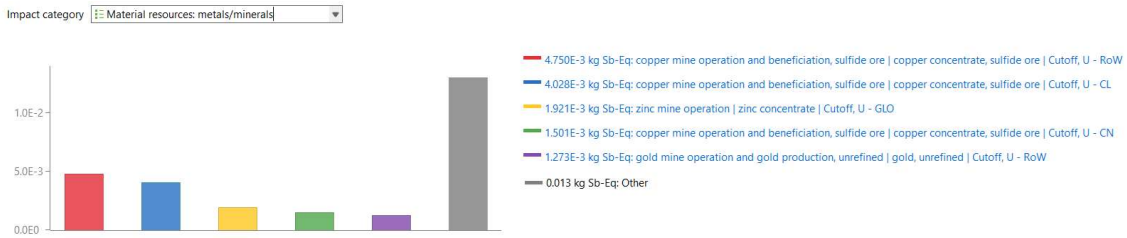


Fig. 3.8. **Material resources: metals/minerals**

Also, this category main impacts are related to potato production. Total impact 0.026 kg $Sb_{eq.}$

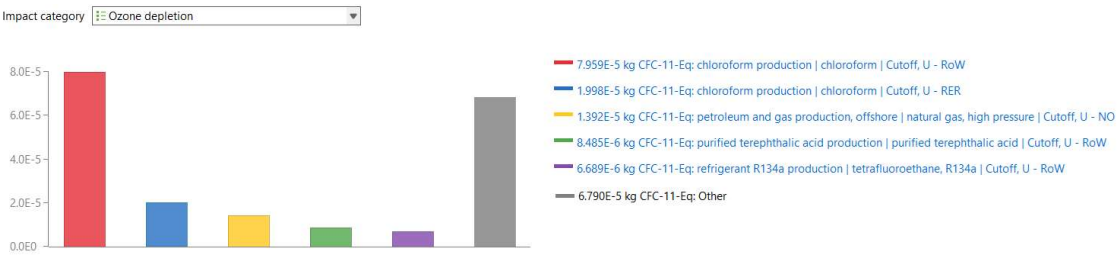


Fig 3.9. **Ozone depletion**

Pesticide production for potato production is the primary contributor to this category. Total impact 0.0001966 kg $CFC\text{-}11_{eq.}$

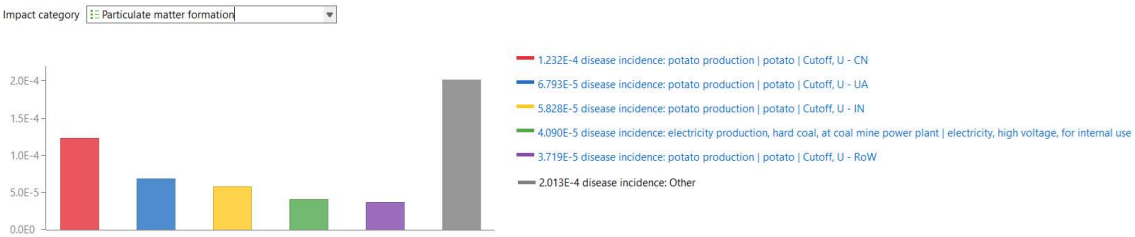


Fig. 3.10. **Particulate matter formation**

Ethanol production from potatoes upstream total 94.12% of the total impact. Total impact 0.0005288 disease incidence.

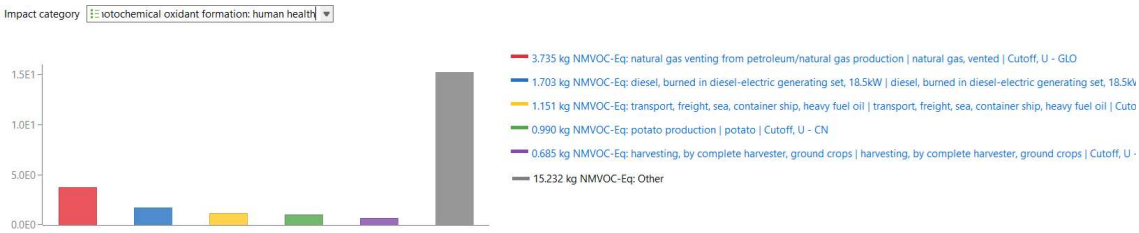


Fig. 3.11. **Photochemical oxidant formation: human health**

Total impact 23.50 kg $NMVOC_{eq.}$ Primary contributor – production of potatoes.

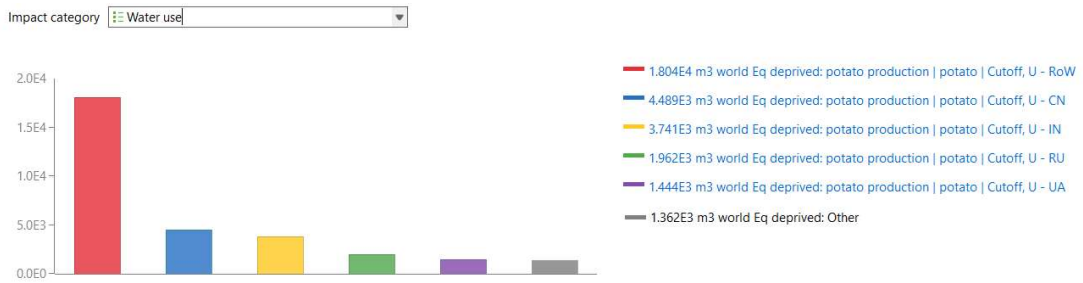


Fig 3.12. **Water use**

The most significant impact on the Water use category is also potato production. Total impact -31030 m^3 world eq deprived.

End-point impact on the environment categories, LCIA method ReCiPe 2016 v1.03, endpoint (H):

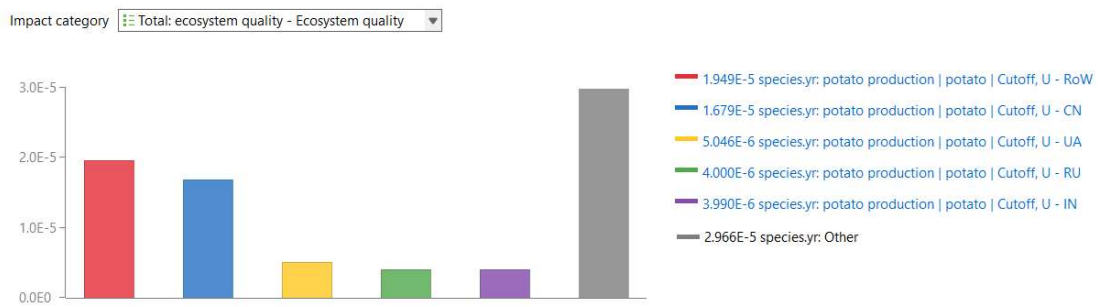


Fig. 3.13. **Ecosystem quality – total**

Total impact 0.000009442 species.yr. Primary contributor – agricultural processes – potato production.

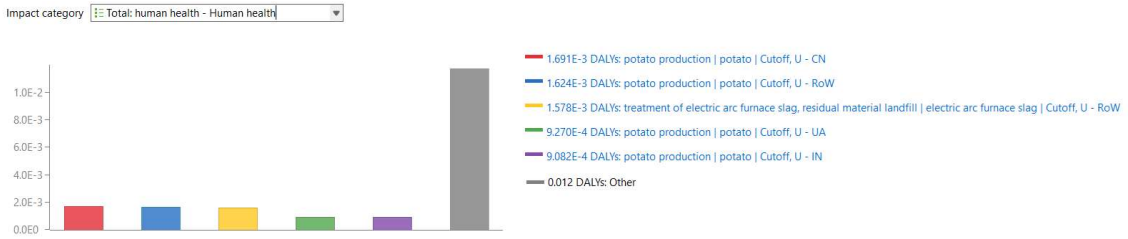


Fig. 3.14. **Human health – total**

Total impact – 0.018 DALYs. Primary contributor – agricultural processes – potato production.

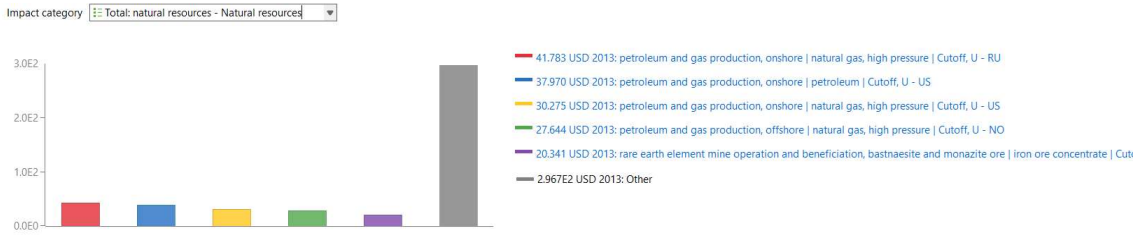


Fig. 3.15. **Natural resources – total**

Total impact 454.7 USD 2013. Primary contributor – agricultural processes – potato production.

3.3. Normalization

Normalisation was done using Impact Assessment Method EF v.3.1/Global Reference 2010. There is a normalisation table 3.1:

Table 3.1.

Name of the Midpoint level category	Normalized results
Acidification	1.257
Climate change	0.716
Ecotoxicity: freshwater	2.523
Energy resources: non-renewable	0.975
Eutrophication: freshwater	1.635
Eutrophication: marine	1.882
Eutrophication: terrestrial	1.595
Human toxicity: carcinogenic	0.126
Human toxicity: non-carcinogenic	1.642
Ionising radiation: human health	0.068
Land use	0.325
Material resources: metals/minerals	0.416
Ozone depletion	0.004
Particulate matter formation	0.888
Photochemical oxidant formation: human health	0.575
Water use	2.706

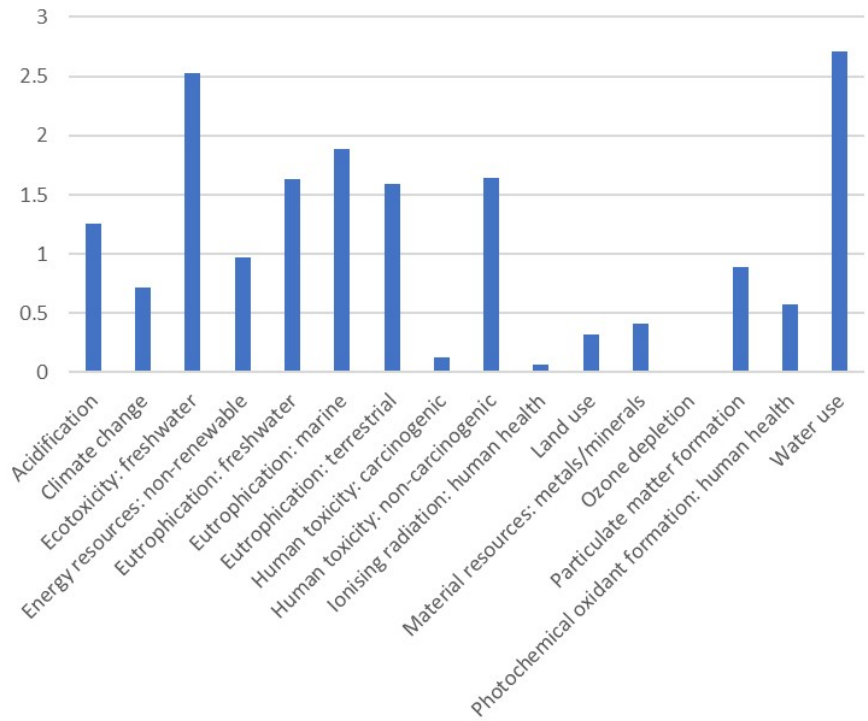


Fig. 3.16. **Normalized results**

The main impact categories are water use and ecotoxicity:freshwater.

3.4.Life Cycle Costing

Goal – purpose of the study to compare the new material (TMSA) with ordinary birch plywood glued with phenol-formaldehyde resin (LF). Intended audience- potential customers. Decision context- R&D. Functional unit - 1m^3 of plywood.
Scope – System boundaries – cradle to grave. Time horizon – 30 years. Maintenance – repainting needed every 4 years. Cost categories – direct material, labour, fixed costs, indirect costs, and administrative costs. Assumptions – discount rate 4%. Allocation rules – no allocation, only plywood production costs calculated. Data sources – existing manufacturing company in Riga (rent, utilities, ethanol); industry benchmarks for all other data.

Table 3.1.

Inventory of costs

Manufacturing costs	**1 799.05 €**
Direct material	641.96 €
Labour	1 004.20 €
Fixed costs	131.67 €
Indirect costs	21.22 €
Operational/administrative costs	179.90 €
Total costs	**1 978.95 €**
profit	**197.90 €**
price	**2 176.85 €**
Equipment costs	125 289.00 €

Table 3.2.

NPV calculation

Years	COST TMSA	COST LF	Discount factor	Current factor TMSA	LF
0	2176.85	1700	1	2176.85	1700
1			0.9615	0	0
2			0.9246	0	0
3		667	0.8890	0	592.96
4	667		0.8548	570.15	0
5			0.8219	0	0
6		667	0.7903	0	527.14
7			0.7599	0	0
8	667		0.7307	487.37	0
9		667	0.7026	0	468.63
10			0.6756	0	0
11			0.6496	0	0
12	667	667	0.6246	416.61	416.61
13			0.6006	0	0
14			0.5775	0	0
15		667	0.6419	0	428.12
16	667		0.5339	356.12	0
17			0.5134	0	0
18		667	0.4936	0	329.25
19			0.4746	0	0
20	667		0.4564	304.41	0
21		667	0.4388	0	292.70
22			0.4220	0	0
23			0.4057	0	0
24	667	30	0.3901	260.21	11.70
25		1700	0.3751	0	637.70
26			0.3607	0	0
27			0.3468	0	0
28	667	667	0.3335	222.43	222.43
29			0.3207	0	0
30	30	30	0.3083	9.25	9.25
				4803.40	**5636.49**

Table 3.3.

IRR calculation:

Year	Expenses	Income	Incremental cash flow	Cumulative cash flow
0	125 289.52 €	76 189.65 €	-49 099.87 €	
1	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-42 173.53 €
2	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-35 247.20 €

Table 3.3. end

Year	Expenses	Income	Incremental cash flow	Cumulative cash flow
0	125 289.52 €	76 189.65 €	-49 099.87 €	
1	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-42 173.53 €
2	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-35 247.20 €
3	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-28 320.87 €
4	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-21 394.54 €
5	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-14 468.21 €
6	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-7 541.87 €
7	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	-615.54 €
8	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	6 310.79 €
9	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	13 237.12 €
10	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	20 163.46 €
11	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	27 089.79 €
12	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	34 016.12 €
13	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	40 942.45 €
14	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	47 868.78 €
15	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	54 795.12 €
16	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	61 721.45 €
17	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	68 647.78 €
18	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	75 574.11 €
19	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	82 500.45 €
20	69263.32197	76 189.65 €	6 926.33 €	89 426.78 €
			IRR	12%

An 8-year payback time, with an IRR above a discount rate of about 4%.

EAC

Table 3.4.

Discount rate	CRF	NPV TMSA	NPV LF	EAC TMSA	EAC LF
4%	0.064	4803.40	5636.49	307.47	360.80

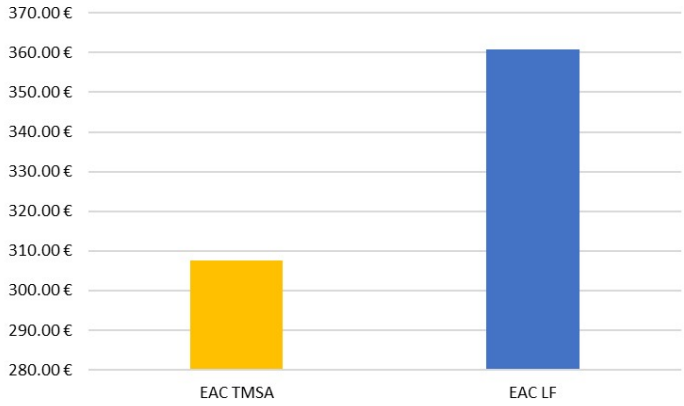


Fig. 3.17. **EAC comparison**

TMSA plywood appears more expensive initially, but due to its longer service life and the need for maintenance every 4 years, not every 3 years as with ordinary birch plywood, the EAC

is 53 EUR a year lower than standard birch plywood, and the NPV is lower; it also has a positive incremental IRR.

Table 3.5.

Eco-costs

Impact category	**Reference unit**	**Result**	**Central price/unit** (De Vries et al., 2024)	**Total**
Acidification: terrestrial	kg SO2-Eq	44.5053	5.28	234.99 €
Climate change	kg CO2-Eq	5593.7564	0.13	727.19 €
Ecotoxicity: freshwater	kg 1,4-DCB-Eq	376.0588	0.0209	7.86 €
Ecotoxicity: marine	kg 1,4-DCB-Eq	345.9049	0.0032	1.11 €
Ecotoxicity: terrestrial	kg 1,4-DCB-Eq	26003.2604	0.00064	16.64 €
Energy resources: non-renewable, fossil	kg oil-Eq	1363.9648	0.028	38.19 €
Eutrophication: freshwater	kg P-Eq	2.6281	3.74	9.83 €
Eutrophication: marine	kg N-Eq	8.8747	14.25	126.46 €
Human toxicity: carcinogenic	kg 1,4-DCB-Eq	852.7881	3.99	3 402.62 €
Human toxicity: non-carcinogenic	kg 1,4-DCB-Eq	11216.5371	0.071	796.37 €
Ionising radiation	kBq Co-60-Eq	250.2812	0.0042	1.05 €
Land use	m2*a crop-Eq	4434.8122	0.099	439.05 €
Material resources: metals/minerals	kg Cu-Eq	125.1412	0.014	1.75 €
Ozone depletion	kg CFC-11-Eq	0.0255	29.1	0.74 €
Particulate matter formation	kg PM2.5-Eq	9.8902	84.7	837.70 €
Photochemical oxidant formation: human health	kg NOx-Eq	17.7076	1.86	32.94 €
Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems	kg NOx-Eq	18.3119	0.416	7.62 €
Water use	m_3	722.5434	0.407	294.08 €
			TOTAL	**6 976.19 €**

Eco-costs for TMSA plywood are **6 976.19 €.** TMSA plywood can serve as a niche construction product.

4. RESULTS INTERPRETATION

4.1.Sensitivity assessment

Scenario 1 - the LCA results were calculated without end of life scenario, where half of the used plywood goes to landfill (scenario sensitivity). The obtained results (relative results), compared to the original calculation (base scenario), are shown in Figure 4.1.

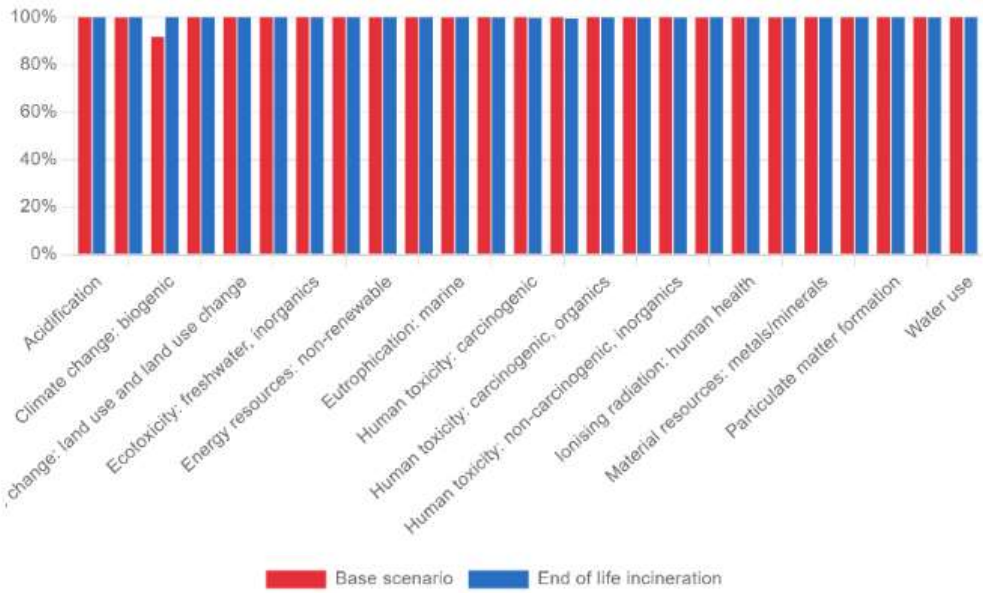


Fig. 4.1. **Scenario without ethanol recovery**

Only one category—climate change: biogenic (Figure 4.2.)—showed higher environmental impacts than TMSA plywood produced with half of the used plywood going to landfill.

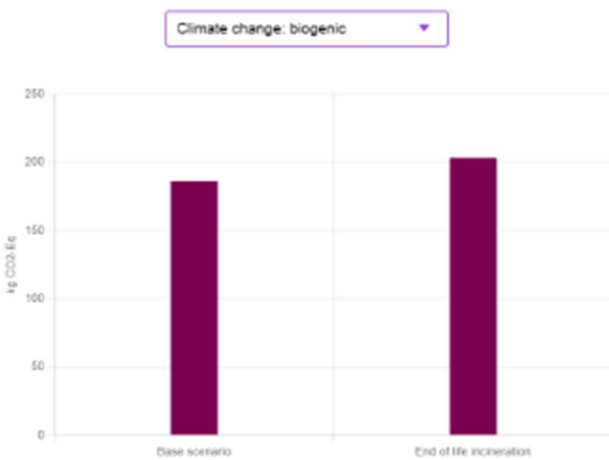


Fig. 4.2. **Scenario comparison, climate change: biogenic category**

Scenario 2- shorter distances from the chemical manufacturer, if both raw materials could be manufactured in Latvia. (parameter sensitivity). KOH distance reduced from 1010 km to 300 km; HNO_3 from 1712 km to 300 km. Results are shown in Table 4.1. below.

Table 4.1.

Alternative scenarios

Impact categories	Unit	Base scenario	Shorter distances for KOH and HNO_3
Acidification	mol H+-Eq	69.86757	69.82929
Climate change	kg CO_2-Eq	5405.43867	5392.95896
Climate change: biogenic	kg CO_2-Eq	186.34909	186.34682

Table 4.2. end

Impact categories	Unit	Base scenario	Shorter distances for KOH and HNO_3
Climate change: fossil	kg CO_2-Eq	5178.26043	5165.78688
Climate change: land use and land use change	kg CO_2-Eq	40.82915	40.82527
Ecotoxicity: freshwater	CTUe	1.43E+05	1.43E+05
Ecotoxicity: freshwater, inorganics	CTUe	4.18E+04	4.18E+04
Ecotoxicity: freshwater, organics	CTUe	1.01E+05	1.01E+05
Energy resources: non-renewable	MJ, net calorific value	6.34E+04	6.32E+04
Eutrophication: freshwater	kg P-Eq	2.62786	2.62702
Eutrophication: marine	kg N-Eq	36.78713	36.77432
Eutrophication: terrestrial	mol N-Eq	282.00033	281.86086
Human toxicity: carcinogenic	CTUh	2.17E-06	2.17E-06
Human toxicity: carcinogenic, inorganics	CTUh	1.33E-06	1.33E-06
Human toxicity: carcinogenic, organics	CTUh	8.45E-07	8.43E-07
Human toxicity: non-carcinogenic	CTUh	0.00021	0.00021
Human toxicity: non-carcinogenic, inorganics	CTUh	0.0002	0.0002
Human toxicity: non-carcinogenic, organics	CTUh	1.36E-05	1.36E-05
Ionising radiation: human health	kBq U235-Eq	287.63847	287.38342
Land use	dimensionless	2.66E+05	2.66E+05
Material resources: metals/minerals	kg Sb-Eq	0.02648	0.02644
Ozone depletion	kg CFC-11-Eq	0.0002	0.0002
Particulate matter formation	disease incidence	0.00053	0.00053
Photochemical oxidant formation: human health	kg NMVOC-Eq	23.49562	23.43729
Water use	m^3 world Eq deprived	3.10E+04	3.10E+04

As previous LCA results of TMSA plywood indicated, transportation is not the primary contributor to the overall environmental impact. Therefore, when the distances between the KOH and HNO_3 manufacturers and the TMSA plywood producer are shorter, the impacts across all categories are slightly reduced.

4.2.Social Life Cycle

1. **Goal:** Social Life Cycle Assessment of plywood production using thermally modified birch veneers bonded with suberinic acid adhesive
   Purpose – to be able to make an SLCA – sustainable life cycle assessment
   Intended audience – customers
   Decision context – to be able to make informed decisions
   Scope – life cycle of TMSA plywood cradle to grave

2. **Select relevant stakeholders and subcategories** (Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organisations 2020 - Life Cycle Initiative, 2020)

Workers:
1.Freedom of association and collective bargaining - trade unions in Latvia
2. Child labour - prohibited in Latvia
3. Fair salary - substantial in factories
4. Working hours – defined by the Labour law in Latvia
5. Forced labour – especially when using foreign labour
6. Equal opportunities/discrimination – gender balance ok in Latvia
7. Health and safety – important in the construction product manufacturing
8. Social benefits / social security – significant in Europe and Latvia
9. Employment relationship - not very relevant
10. Sexual harassment – not very relevant
11. Smallholders, including farmers -not very relevant

Local community:
1. Access to material resources – deforestation is a hot issue in society in Latvia
2. Access to immaterial resources – not affected by the plywood manufacturing company
3. Delocalization and migration – migration from the countryside to Riga because of work, causing traffic jams and increasing loneliness
4. Cultural heritage – not affected by the plywood manufacturing company
5. Safe and healthy living conditions – HNO_3 use in the process
6. Respect of indigenous rights – not applicable to plywood manufacturing company
7. Community engagement – every new factory has some dissatisfaction from the local community
8. Local employment – unemployment rate in Riga is the lowest in the entire country, causing migration to Riga
9. Secure living conditions – not affected by plywood manufacturing

Value chain actors:
1. Fair competition – not applicable
2. Promoting social responsibility – not applicable
3. Supplier relationships – not applicable
4. Respect of intellectual property rights – important as the suberinic acids adhesive is patented
5. Wealth distribution – not applicable

Consumer:
1. Health and Safety – important as the product is formaldehyde-free
2. Feedback Mechanism – not applicable
3. Consumer Privacy – not applicable
4. Transparency – not relevant

5. End-of-life responsibility – important as material can be recycled and used instead of raw material in particle boards

Society:
1. Public commitments to sustainability issues - relevant
2. Contribution to economic development – relevant, new factory, new workplaces
3. Prevention and mitigation of armed conflicts – not influenced by the plywood factory
4. Technology development – a new technological process for implementing the used plywood in particleboard manufacturing
5. Corruption – not relevant
6. Ethical treatment of animals – not relevant
7. Poverty alleviation – potential exportable product

Children:
1. Education provided in the local community – not applicable
2. Health issues for children as consumers – formaldehyde emissions from ordinary plywood, decreased indoor air quality
3. Children's concerns regarding marketing practices – not applicable

3. Data Collection Questionnaire

Workers
Freedom of Association and Collective Bargaining
Are employees free to join trade unions or workers' organizations?
Answer: _____
Does the company engage in collective bargaining with worker representatives?
Answer: _____
Are there any restrictions imposed by management or government regulations?
Answer: _____
Fair Salary
What is the lowest monthly wage paid in the factory?
Answer: _____
How does it compare to the national minimum and living wage levels?
Answer: _____
Are wage adjustments regularly reviewed?
Answer: _____
Working Hours
What is the standard weekly working time (hours/week)?
Answer: _____
Are overtime hours recorded and compensated?
Answer: _____
Are rest days and holidays guaranteed?
Answer: _____
Forced Labour
Are employment contracts available and comprehensible to workers?
Answer: _____
Do contracts specify wages, working hours, holidays, and termination terms?
Answer: _____
Are any worker documents (e.g., passports) retained by the company?
Answer: _____
Are foreign workers employed voluntarily and treated equally?
Answer: _____
Health and Safety

How many work-related injuries or fatalities occurred during the past year?
Answer: _____
Are regular safety trainings conducted?
Answer: _____
Are safety protocols and equipment provided for each job type?
Answer: _____
Social Benefits / Social Security
What social benefits are provided (e.g., health insurance, pensions, education, childcare, accommodation)?
Answer: _____
What percentage of employees have access to these benefits?
Answer: _____
Local Community
Access to Material Resources
Does the company source wood from certified sustainably managed forests (FSC, PEFC)?
Answer: _____
Is there an environmental management system in place?
Answer: _____
Delocalization and Migration
How many employees commute or relocate due to factory location?
Answer: _____
Has the company noticed social effects such as traffic congestion or reduced local engagement?
Answer: _____
Safe and Healthy Living Conditions
What measures are taken to minimize the use of hazardous substances?
Answer: _____
Are emissions and waste monitored and reported publicly?
Answer: _____
Community Engagement
How often does the company organize meetings with the local community?
Answer: _____
What are the main community concerns or feedback?
Answer: _____

What steps have been taken to address them?
Answer: _____
Local Employment
What percentage of the workforce is hired from the local area?
Answer: _____
Does the company support local training or education initiatives?
Answer: _____
Value Chain Actors
Respect for Intellectual Property Rights
Does the company use patented technologies (e.g., suberinic acid adhesive)?
Answer: _____
Are there policies in place to respect and protect intellectual property?
Answer: _____
Consumers
Health and Safety
How many consumer complaints were received in the past year?
Answer: _____

How many product defects were detected per batch?
Answer: _____
Are emissions (e.g., formaldehyde) tested and within safe limits?
Answer: _____
Health Issues for Children
Does the company promote awareness about reduced formaldehyde emissions and indoor air quality?
Answer: _____
Are products marketed as safe for children's environments?
Answer: _____
End-of-Life Responsibility
Does the company provide information on recycling or reuse options?
Answer: _____
What systems are in place for take-back or end-of-life management?
Answer: _____
Society
Public Commitment to Sustainability
Does the company publish sustainability goals or reports?
Answer: _____
Are there formal commitments to environmental or social standards?
Answer: _____
Contribution to Economic Development
How many new jobs were created?
Answer: _____
What are the average hourly earnings by gender, age, and disability?
Answer: _____
Are there initiatives to promote gender equality?
Answer: _____
Technology Development
Does the company engage in partnerships for R&D (e.g., recycling used plywood into particleboard)?
Answer: _____
What percentage of turnover is invested in innovation?
Answer: _____
Poverty Alleviation
Are there emergency or disaster management plans in place?
Answer: _____
Does the company support local suppliers or small enterprises?
Answer: _____
Are there initiatives to promote exports or international cooperation?
Answer: _____

4. **Scoring process:** 3 points – business as usual
1 point – improvements needed
5 points – best practice

The questions marked with the lowest scores have the most significant leverage.

5. **Potential social hot-spots.** The primary potential social hotspot may be associated with the factory's location in Riga, which, despite having the lowest unemployment rate, experiences poor air quality due to heavy traffic congestion. A possible solution would be to establish the factory in another location; however, it would be essential to recalculate the

baseline LCA to ensure that the environmental impacts across all categories do not increase significantly due to longer transportation distances.

CONCLUSIONS AND RECOMENDATIONS

1. LCA of TMSA plywood shows that the product is not cancerogenic and the total environmental burden is not high.

2. Based on LCA data, the agricultural process and potato production have the most influence on the environmental impact categories. It is probably worth calculating a scenario in which ethanol is obtained from fossil resources to compare.

3. Variations in transport distances for KOH and HNO_3 supply slightly influence the results—hence, the shortest possible routes should be selected.

4. The use phase could offer advantages over conventional birch plywood; however, additional experimental data are required for accurate LCA modelling. Nonetheless, modelling within the Life Cycle Costing framework has shown promising results.

5. It is worth reconsidering the location of building the plywood factory in Riga due to social aspects.