

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Polimērmateriālu institūts

Vladimirs BIZIKS

Doktora studiju programmas „Ķīmijas tehnoloģija” doktorants

**LAPKOKU KOKSNES ĪPAŠĪBU UZLABOŠANA
AR TERMISKĀS APSTRĀDES PAŅĒMIENU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

Dr. chem.
B.ANDERSONS
Dr. sc. ing
M.DZENIS

Rīga 2011

UDK 674.031(043.2)
Bi 983 I

Biziks Vladimirs „Lapkoku koksnes īpašību uzlabošana ar termiskās apstrādes paņēmieni”. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2011.- 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar PMI katedras 2011.gada jūlija lēmumu, protokols Nr.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.



ISBN 978-9934-10-217-2

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTES ĶĪMIJAS
TEHNOLOĢIJAS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

Promocijas darbs doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011. gada 15. decembrī plkst. 15:00 Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Āzenes ielā 14/24, 272. auditorijā.

Ar promocijas darbu var iepazīties RTU zinātniskajā bibliotēkā, Ķīpsalas ielā 10, Rīga, LV-1659 un Valsts Nacionālajā bibliotēkā, Anglikāņu ielā 5, Rīga, LV-1050.

OFICIĀLIE OPONENTI

Profesors, Dr. sc. ing. Jurijs Ozoliņš
Rīgas Tehniskā Universitāte

Profesors, Dr. sc. ing Māris Daugavietis
Latvijas Valsts Mežzinātnes institūts „Silva”

Dr.sc. biol Michiel Jan Boonstra
Plato Wood International *Quality and Product Manager* (Nīderlande)

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Vladimirs Biziks

Datums: 14.11.2011.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, literatūras apskatu (10 nodaļas), eksperimentālo daļu (9 nodaļas), rezultātus un to izvērtējumu (12 nodaļas), secinājumus un izmantotās literatūras sarakstu. Saturs izklāstīts uz 148 lapaspusēm. Darbs satur 52 attēlus, 48 tabulas, 37 formulas, 9 pielikumus un izmantotās literatūras sarakstu, kas ietver 133 literatūras avotus.

PATEICĪBAS

Izsaku pateicību promocijas darba zinātniskajiem vadītājiem: Dr. chem., Bruno Andersonam un Dr. sc. ing., Mārcim Dzenim par aktuālo tēmu, darba vadīšanu un vērtīgiem padomiem, sapratni, atbalstu un uzticību darba izstrādes gaitā.

Liels paldies Latvijas Valsts Koksnes ķīmijas institūta Koksnes bionoārdīšanās un aizsardzības laboratorijas vadošai pētniecei Dr. chem., Ingeborgai Andersonei par palīdzību ar pieredzi un auglīgām zinātniskajām diskusijām darba izstrādes gaitā un eksperimentu un analīžu veikšanā.

Liels paldies Latvijas Valsts Koksnes ķīmijas institūta Koksnes bionoārdīšanās un aizsardzības laboratorijas pētniecei Dr. sc. ing., Ļubovai Beļkovai par iepazīstināšanu ar koksni mikro līmenī, tās morfoloģiskās struktūras elementu daudzveidību, kā arī palīdzību ar pieredzi un argumentētām zinātniskajām diskusijām darba izstrādes gaitā un eksperimentu un analīžu veikšanā.

Paldies Latvijas Valsts Koksnes ķīmijas institūta direktoram Aivaram Žūriņam par uzticēšanos un infrastruktūras nodrošināšanu, izstrādājot darbu Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūtā.

Paldies Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūta kolēģiem, kuri praktiski mani atbalstīja disertācijas izstrādāšanas laikā, veicot nepieciešamās analīzes un palīdzot izprast rezultātus. Liels paldies institūta kolēģiem: Errj Sansonetti, Jeļenai Čirkovai, Ņinai Kurnosovai, Ilzei Irbei, Elīnai Kapačai, Jurim Grīniņam, Dacei Cīrulei, Mārim Puķem, Baibai Spincei, Jānim Rižikovam, Anrijam Verovkinam, Vladimiram Jakušinam u.c. Liels paldies kolēģiem no Vācijas, Gētingenas universitātes un LLU Meža fakultātes par iespēju veikt nepieciešamos testus.

Vissirsnīgākais paldies manai ģimenei - maniem vecākiem un vecvecākiem, māšai, brālīm par izturību, sapratni, ticību un morālu atbalstu.

SATURS

PROBLĒMAS BŪTĪBA UN AKTUALITĀTE.....	6
PROMOCIJAS DARBA ĪSS SATURS	11
DARBA REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS.....	15
SECINĀJUMI	32
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	33

SAĪSINĀJUMI

CpB – cietība pēc Brinella
HTM – hidrotermiskā modifikācija
KUU – kapilārā ūdens uzsūcamība
LzMS – līdzsvara mitruma saturs
MPa – mega Paskāli
PUE – pretuzbriešanas efektivitāte
GRMS – gaisa relatīvais mitruma saturs
SEM – skenējošā elektronmikroskopija
TM – termiskā modifikācija
TMK – termiski modificēta koksne
TrI – triecienizturība
MOE_{dyn} – dinamiskais elastības modulis
RM – relatīvais mitrums

PROBLĒMAS BŪTĪBA UN AKTUALITĀTE

Pēdējos gados ekonomisku un ekoloģisku apsvērumu dēļ pieaug tendence plašāk izmantot vietējo koku sugu koksni. To nosaka vairāki faktori: samazinās kvalitatīvas skujkoku un tropu koksnes pieejamība, pieaug pieprasījums pēc atjaunojamiem, ekoloģiskiem materiāliem iekštelpās un āra vidē, no 2012.gada ES aizliegts ievest un izmantot nezināmas izcelsmes tropu koksni. Globālā aspektā vietējās lapkoku koksnes plašāka izmantošana saudzē tropu mežus, sekmē oglekļa sekvestrāciju, mazinot globālo sasilšanu.

Latvijā kopējā lapkoku koksnes krāja ir ~251 milj.m³, no tiem vairāk kā puse (56%) ir bērzs, 22% apse, 20% alksnis, 2% osis. Arī Latvijā pēdējos gados uzsākti pētījumi par mīkstās lapkoku koksnes izmantošanu augstākas pievienotās vērtības produkcijas ražošanai. Latvijas lapkoku koksnes praktisku izmantošanu celtniecībā un būvniecībā ierobežo zemā izturība pret bioloģisko noārdīšanos (zemākā - 5.izturības klase atbilstoši EN 350-2 klasifikācijai) [9]. Uzlabojot šīs koksnes ilgizturības īpašības, atsevišķās jomās ar to iespējams aizvietot tradicionāli lietoto skujkoku koksni, atstājot tās resursus jomām, kur tā ir neaizstājama, piemēram, nesošām konstrukcijām.

Termiskā modifikācija, salīdzinot ar ķīmisko modifikāciju vai aizsardzību ar biocīdiem, ir ekoloģisks paņēmiens koksnes fizikālo un bioizturības īpašību uzlabošanai bez videi un cilvēkiem bīstamiem savienojumiem. Apstrādē iegūst jaunu, kvalitatīvu, konkurētspējīgu būvmateriālu ar būtiski no izejmateriāla atšķirīgām īpašībām. Tā kā modificēta koksne nesatur kaitīgus savienojumus, to ir vienkārši izmantot dzīves cikla beigās. Literatūras dati par dzīves cikla novērtējumu liecina, ka modificēta koksne no ražošanas, izmantošanas un utilizācijas viedokļa potenciāli ir ļoti ekoloģisks materiāls. Termiski modificētu koksni var lietot interjerā (sausos, mitros apstākļos) un āra apstākļos (CEN/TS 15679 [3]). Termiski modificētas koksnes tirgus ik gadus paplašinās, līdzās ES aptverot Krieviju un Ziemeļameriku, Dienvidamerikas, Tuvo Austrumu un Āzijas valstis.

Sākotnēji lielākā vērtība Eiropā tika pievērsta skujkoku koksnes modifikācijai, un joprojām ir salīdzinoši maz informācijas par lapkoku modifikāšanu. Pasaulē mīksto lapkoku termiskā modifikācija ūdens tvaika vidē pie paaugstināta spiediena pētīta nedaudz. Ir ļoti maz datu par alkšņa hidrotermisko apstrādi, jo daudzviet šī suga nav rūpnieciski nozīmīga. Kā optimālie režīmi lapkoku (apses, bērza, oša) koksnes termomodifikācijai tiek rekomendētas temperatūras no 180 līdz 220°C. Šādos temperatūru intervālos krasi samazinās koksnes kā materiāla mehāniskās stiprības īpašības. Tāpēc, lai prognozētu modificēto materiālu īpašības un to stabilitāti ekspluatācijas apstākļos, svarīgi noskaidrot ne tikai iegūtā produkta īpašības, bet arī izprast termiskās iedarbības rezultātā koksnē notiekošos procesus, šim nolūkam veicot multidisciplinārus pētījumus par koksnes ķīmisko sastāvu, mikrostruktūras, fizikālo un mehānisko īpašību izmaiņām. Šāda pieeja tika realizēta, veicot šo promocijas darbu. Novērtējot modificētas koksnes ekspluatācijas īpašības atbilstoši CEN/TS 15679:2007, tiek izmantoti attiecīgi nemodificētas koksnes produktu

(zāģmateriālu, parketa, apšuvumu u.c.) testēšanas standarti, t.sk., novērtējot bioloģisko izturību, mehānisko stiprību, virsmas īpašības.

Tēmas aktualitāte

Pēdējo gadu laikā ievērojami pieaugusi interese par iespējām no vietējo lapkoku koksnes iegūt jaunus un augstākas pievienotās vērtības produktus. Pieaug saražotās kvalitatīvas koksnes daudzums gan no baltalkšņa, gan no apses koksnes, un vietējie kokapstrādes uzņēmumi (SIA „Ošukalns”, SIA „4Pluss”, SIA „Woodex”, SIA „LUK”) izrāda interesi par termiski modificētas koksnes iegūvi Latvijā, sekmējot vietējo, mazāk izmantoto koku sugu dziļāku apstrādi. Kā perspektīvu vērtējam vietējo lapkoku koksnes (alkšņa, apses un bērza) hidrotermisko modificēšanu ūdens tvaika vidē pie paaugstināta spiediena, kur iegūstam produktus izmantošanai mitrā interjerā un āra apstākļos. Kā jau minēts, literatūrā nav datu par baltalkšņa hidrotermisko modifikāciju un ir tikai dažas publikācijas, kurās aplūkoti apses un bērza koksnes apstrādes rezultāti, taču procesu darba cikla diagrammas un parametri tiek turēti noslēpumā kā „know-how”. Nākamais loģiskais solis pēc tehnoloģijas izvēles bija noskaidrot hidrotermiskās modifikācijas (HTM) procesa parametrus, lai no Latvijā augošu lapkoku koksnes iegūtu produktus ar vēlamām īpašībām.

Promocijas darba mērķis

Noskaidrot optimālos hidrotermiskās apstrādes procesa parametrus bērza, apses un baltalkšņa koksnes formas stabilitātes, higroskopisko un bioloģiskās izturības īpašību uzlabošanai, paplašinot to pielietojumu dažādos būvobjektos augsta mitruma un āra apstākļos.

Mērķa sasniegšanai darbā izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- pamatojoties uz literatūras datiem, izvēlēties lapkoku koksnes termiskās apstrādes tehnoloģiju tālākiem pētījumiem, ar mērķi iegūt lapkoku koksni ar uzlabotām ekspluatācijas īpašībām augsta mitruma un āra apstākļos;
- atbilstoša izmēra paraugu (dēļu) izgatavošana modificēšanas apstrādei, to sagatavošana modificēšanai, īpašību (izmēri, mitrums, blīvums) raksturošana;
- koksnes paraugu modificēšana laboratorijas multifunkcionālā eksperimentālā iekārtā, ārējās apsildes autoklāvā ūdens tvaika vidē pie **pieciem (trim + papildus diviem optimizētiem)** režīmiem. Modificēšanu veikt temperatūrās 140°C, 160°C, 170°C, 180°C, kā arī mainot izturēšanas laiku pie maksimālās apstrādes temperatūras 160°C;
- masas zudumu, izmēru un blīvuma izmaiņu noteikšana atkarībā no apstrādes režīma;
- koksnes komponentsastāva (celuloze, lignīns, ekstraktvielas un hemicelulozes) noteikšana un tā izmaiņas pēc termiskās apstrādes (ķīmiskā analīze);
- kondensāta ķīmiskā sastāva noteikšana pēc katra apstrādes režīma;
- modificēto bērza, apses un baltalkšņa koksnes paraugu lieces, elastības moduļa, cietības pēc Brinella un dinamiskās triecienizturības īpašību izmaiņu izpēte atkarībā no apstrādes režīma, salīdzinot ar neapstrādātu koksni;

- termiski apstrādātās koksnes noturības testēšana pret 3 trupes sēnēm (*Coniophora puteana*, *Poria placenta*, *Coriolus versicolor*) atbilstoši EN 113 [5.], kā arī pēc izskalošanas atbilstoši EN 84 [4]; salīdzinājums ar neapstrādātu koksni;
- bioizturības, mehāniskās stiprības (MoE) un virsmas kvalitātes izmaiņu novērtējums āra apstākļos eksponētiem baltalkšņa paraugiem (bloku tests) atkarībā no apstrādes. Virsmas izmaiņas pie optimizētiem HTM režīmiem iegūtai koksnei pēc ekspozīcijas ārā un paaugstinātas novecināšanas laboratorijas kamerā;
- hidrotermiski modificētas koksnes struktūras izmaiņu analīze, izmantojot ūdens tvaiku sorbcijas un skenējošās elektronmikroskopijas metodes;
- HTM koksnes higroskopisko īpašību noteikšana;
- HT apstrādes režīma optimālo parametru izvēle, balstoties uz koksnes bioloģisko noturību pret trupes sēnēm, hidrofilītāti un mehāniskajām īpašībām;
- izstrādātās HTM koksnes ražošanas tehnoloģijas realizācijas iespēju un produktu pielietošanas sfēru novērtējums Latvijā.

Darba zinātniskās novitātes:

Atrasti un piemēroti optimālie parametri hidrotermiskai modifikācijai ārējās apsildes autoklāvā, kas paplašina vietējo lapkoku koksnes (īpaši alkšņa un apses) pielietošanas iespējas interjerā ar paaugstinātu mitrumu un āra apstākļos. Pamatots, ka mīksto lapkoku koksnei optimāla ir apstrāde pie zemākām temperatūrām (160°C vai 170°C), kas ir pretrunā ar literatūrā minētajiem datiem.

Iegūti rezultāti par HTM lapkoku koksnes triecienizturības īpašību izmaiņām laikā, izmantojot dinamiskās triecienizturības iekārtu un iegūstot sagraušanas spēka-laika līknes, kas ne tikai labi parāda apstrādes intensitātes ietekmi uz materiālu, bet arī ļauj novērtēt, kā mainās materiāla pretestība slodzes laikā. Šāds pētījums un rezultātu apkopojums par HTM koksni līdz šim nav veikts.

Izstrādāta salīdzinoša skenējošās elektronmikroskopijas (SEM) metode termiski modificētas koksnes pētīšanai, kura dod iespēju iegūt precīzākus dažādu koksnes anatomisko elementu kvantitatīvos raksturlielumus. Pētījuma rezultāti par lapkoku libriformas, trauku, serdes staru šūnu šķērsgriezuma lineāro un laukuma izmēru izmaiņām pēc hidrotermiskās apstrādes ļauj ar lielāku pamatojumu izskaidrot modificētas koksnes īpašību, īpaši mehāniskās stiprības, izmaiņu cēloņus.

Darba praktiskā nozīme:

- 1) Darba rezultātus var izmantot Latvijai piemērotas, videi draudzīgas HTM lapkoku koksnes ražotnes izveidei, kas dos iespēju no atjaunojamiem resursiem iegūt produktus ar augstāku pievienoto vērtību.
- 2) Atrastie HT apstrādes procesa parametri būtiski uzlabo lapkoku koksnes produktu īpašības (formas stabilitāti, noturību pret trupes sēnēm, hidrofobitāti) pie salīdzinoši nelieliem mehāniskās stiprības zudumiem.
- 3) Izstrādāti divi optimālie hidrotermiskās modifikācijas režīmi, kas ļauj iegūt lapkoku koksni lietošanai ārā apstākļos, bez kontakta ar augsni (atbilstoši 3. lietošanas klasei pēc EN 335-1 [7]), ar 1. vai 2. izturības klasi pret trupes

sēnēm atbilstoši EN 350-1 [8], uzlabotu formas stabilitāti, zemāku koksnes līdzsvara mitrumu un samērīgām mehāniskajām īpašībām.

Darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie zinātniskie sasniegumi un rezultāti ir prezentēti 10 starptautiskās zinātniskās konferencēs. Par promocijas darba tematu ir publicēti 16 drukāti darbi, tai skaitā 12 raksti pilnos konferenču referējamos darbu kopsavilkumos (2., 4., 7.-16.), 3 raksti abstraktu kopsavilkumos (3., 5. un 6.), iesniegti 2 raksti starptautiski citējamās žurnālos: *Holzforschung* un *Wood Science and Technology*.

1. Biziks V., Andersons B., Belkova L. Changes in the morphological elements of birch wood during thermal treatment action. **2011** *Wood Science and Technology* – in print (identifikācijas numurs ID WST-11-0129).
2. Andersons B., Andersone I., Biziks V., Irbe I., Chirkova J., Sansonetti E., Grinins J., Militz H. Hydrothermal modification for upgrading the durability properties of soft deciduous wood. *The International Research Group on Wood Preservation*. Document No IRG/WP/40494. **2010**, May, France, Biarritz, 12 pp.
3. Чиркова Е., БЫЗИК В., Андерсоне И., Андерсонс Б., Курносова Н. Изменение гидрофильных свойств древесины берёзы при термообработке. 14. Всероссийский симпозиум. Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности, **2010**. Апрель 26-30. Россия, Москва, стр. 139.
4. Biziks V., Belkova L., Kapaca E., Andersons B. Effect of the hydrothermal modification on the anatomical structure of birch wood. COST Action FP0802 - Experimental and Computational Micro-Characterisation Techniques in Wood Mechanics. Workshop on "wood structure/function relationships", **2010**. October 5-8, Germany, Hamburg.
5. Grinins J., Biziks V., Andersons B., Andersone I., Dobele G. Investigation of the chemical composition of waste water after hydrothermal treatment of wood. Abstracts book with thesis of the 4th International Conference on Environmentally - Compatible Forest Products (Ecowood), September 8-10, **2010**, Porto, Portugal, p. 68.
6. Biziks V., Grinins J., Andersons B., Andersone I., Chirkova J., Irbe I., Sansonetti E. Research into the optimal treatment conditions for wood modification of birch, aspen and grey alder. Abstracts book with thesis of the 4th International Conference on Environmentally - Compatible Forest Products (Ecowood), September 8-10, **2010**, Porto, Portugal, p. 66.
7. Biziks V., Andersons B., Andersone I., Grinins J., Irbe I., Kurnosova N., Militz H. Hydrothermal modification of soft deciduous wood: bending strength properties. Proc. of the 5th European Conference on Wood Modification (ECWM5), September 20-21, **2010**, Riga, Latvia, pp. 99-106.
8. Sansonetti E., Andersons B., Biziks V., Grinins J., Chirkova J. Surface properties of the hydrothermally modified soft deciduous wood. Proc. of the 5th European

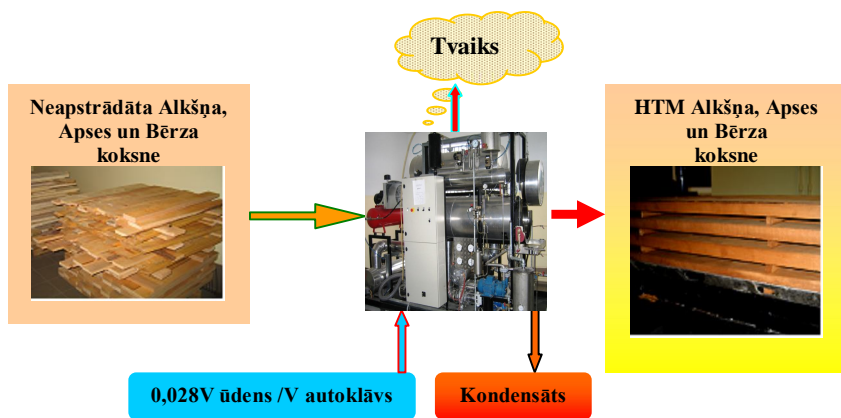
- Conference on Wood Modification (ECWM5), September 20-21, **2010**, Riga, Latvia, pp. 183–186.
9. Andersons B., Andersone I., Biziks V., Irbe I., Grininsh J. Peculiarities of the thermal modification of hardwood. Proc. of the 4th European Conference on Wood Modification, 27-29 April, **2009**, Stockholm, Sweden, pp. 141-145.
 10. Andersons B., Biziks V., Andersone I., Chirkova J., Grininsh J. Peculiarities of the thermal modification of soft deciduous wood. Proc. of the 15th International Symposium on Wood, Fiber and Pulping Chemistry, 15-18 June, **2009**, Oslo, Norway, 4 pp.
 11. Biziks V., Zudrags K., Andersone I., Andersons B., Grininsh J., Sansonetti E. Improvement of the properties of birch plywood by thermal modification. Proc. of International Panel Products Symposium, 16-18 September, **2009**, Nantes, France, pp. 99-109.
 12. Biziks V., Andersons B., Andersone I., Irbe I. Biological durability and mechanical properties of hydrothermally modified deciduous wood. The 5th Meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science&Engineering (WSE), **2009**. October, Denmark, Copenhagen, pp. 57-63.
 13. Grinins J., Biziks V., Andersons B., Andersone I. Changes in the chemical composition of soft deciduous wood after thermal treatment. Proc. of the 5th Meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science&Engineering (WSE), October 1-2, **2009**, Copenhagen, Denmark, pp. 41-47.
 14. Andersone I., Andersons B., Čirkova J., Biziks V., Irbe I., Kurnosova Ņ., Grīniņš J. Alkšņa koksnes ilgzturības uzlabošanas iespējas hidrotermiskās modifikācijas ceļā. Rakstu krājums VPP: Lapu koku audzēšanas un racionālas izmantošanas pamatojums, jauni produkti un tehnoloģija, Rīga, **2009**, SIA "Tipogrāfija "Pērse"", 105-108 lpp.
 15. Biziks V., Andersons B., Irbe I., Chirkova J., Grininsh J. Thermal modification of soft deciduous wood. Proc. of 4th Meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science&Engineering (WSE), November 13-14, **2008**, Riga, Latvia, pp. 63-68.
 16. Biziks V., Andersons B., Chircova J. Modified wood – novel material and an alternative for chemical protection. The 2nd Meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science&Engineering (WSE), **2006**. October, Sweden, Stockholm, 4 pp.

PROMOCIJAS DARBA ĪSS SATURS

Ievadā ir pamatota promocijas darba aktualitāte, formulēts mērķis un uzdevumi, kā arī izklāstītas promocijas darba pamatnostādnes.

Pirmā nodaļa ir veltīta literatūras apskatam, kurā ir izvērtēta koksnes termiskā modifikācija kā alternatīva biocīdiem koksnes bioizturības uzlabošanai. Veikts neliels koksnes termiskās apstrādes attīstības apskats. Aprakstīti un salīdzināti galvenie pasaulē izmantotie koksnes termiskās apstrādes paņēmieni un to tehnoloģiskie raksturojumi. Norādīti termiski modificētas koksnes ražošanas apjomi un tendences Eiropā un pasaulē, produktu klāsts un to standartizācijas un klasifikācijas pamatprincipi. Apskatītas koksnes fizikāli mehānisko, bioloģiskās izturības u.c. īpašību izmaiņas termiskās apstrādes rezultātā saistībā ar ķīmiskā sastāva izmaiņām. Prognozētas lapu koku koksnes ražošanas perspektīvas un ierobežojumi Latvijā.

Otrā nodaļa veltīta eksperimentālajai daļai, kurā pamatota koksnes paraugu izvēle un aprakstīta paraugu sagatavošana, kā arī atspoguļoti darbā izmantotie materiāli, metodes un iekārtas. Promocijas darbā jaunu tehnoloģisko režīmu izstrādāšanai izmantota shēma, kas parādīta 1. attēlā.



1.attēls. Termiski modificētas lapkoku koksnes iegūšana

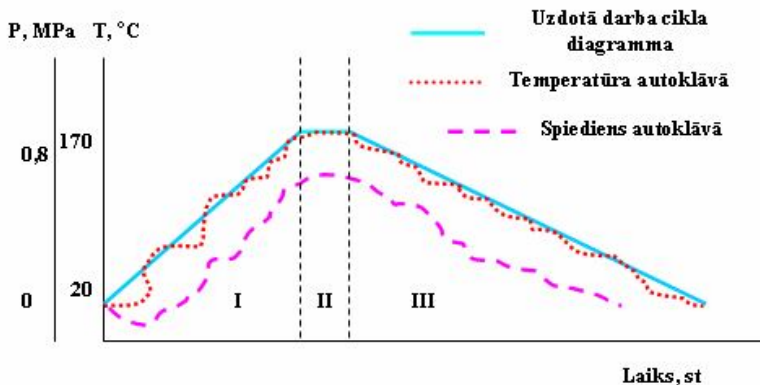
Dots HTM režīmu izstrādāšanai un optimizēšanai izmantotās daudzfunkcionālās koksnes modifikācijas iekārtas raksturojums. Izklāstīts, ka dažus parametrus (maksimālo modifikācijas temperatūru un izturēšanas laiku pie tās) mainījām apzināti, bet viens no būtiskiem parametriem, proti, spiediens, hidrotermiskās modifikācijas laikā mainījās patvaļīgi. Izvēlētie HTM režīmi un tiem atbilstošie parametri doti 1. tabulā.

Izvēlētie parametri hidrotermiskās modifikācijas procesa optimizēšanai

Apstrādes temperatūra; °C	Izturēšanas laiks pie maksimālās temperatūras, stundas	Temperatūras celšanas / dzesēšanas ātrums; grādi/min	Spiediens*; MPa
140	1	0,24 – 0,28 / 0,16 – 0,19	0,44-0,45
160	1	0,24 – 0,28 / 0,16 – 0,19	0,62-0,63
160	3	0,24 – 0,28 / 0,16 – 0,19	0,63-0,65
170	1	0,24 – 0,28 / 0,11 – 0,14	0,78-0,80
180	1	0,24 – 0,28 / 0,16 – 0,19	0,94-0,96

*- Maksimālais spiediens izstūrēšanas stadijā; šis parametrs mainījās patvaļīgi atkarībā no HTM režīma stadijas.

Kā redzams no 2. attēlā dotās darba cikla diagrammas, hidrotermiskās modifikācijas procesu var sadalīt trīs stadijās: I stadija – temperatūras celšana līdz maksimālai temperatūrai (sildīšana); II – izturēšana pie maksimālās temperatūras (izturēšana); III - temperatūras samazināšana (dzesēšana). HTM procesa optimizēšanai tika apzināti piemērotas temperatūras un izturēšanas laika vērtības, turpretim, spiediens autoklāvā mainījās patvaļīgi atkarībā no procesa stadijas. Sildīšanas laikā tas pieauga un sasniedza maksimālo vērtību, izturēšanas stadijā praktiski nemainījās, bet dzesēšanas stadijā, tas samazinājās līdz apkārtējās vides spiedienam. Kopējais modifikācijas laiks bija no 22 līdz 28 stundām.



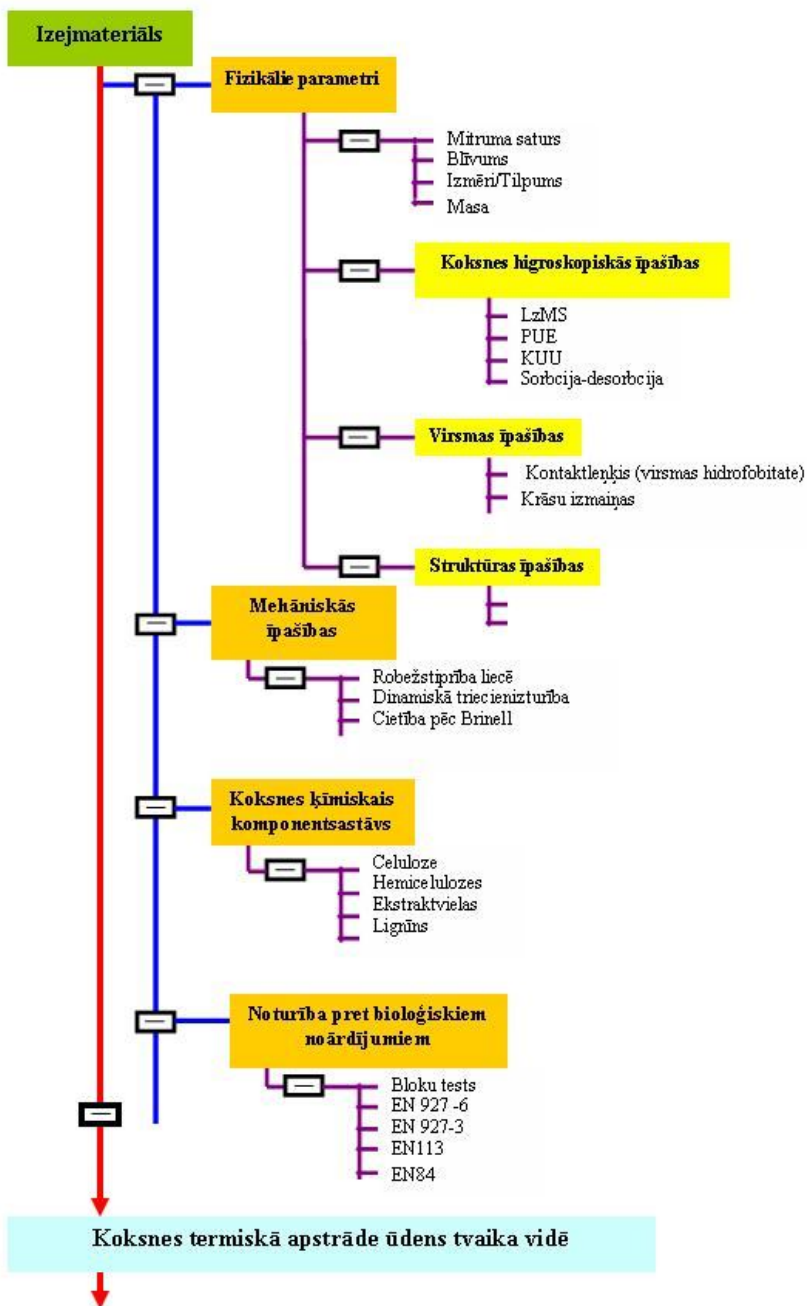
2. attēls. Termiskās modifikācijas darba cikla diagramma pie 170°C

Izstrādājot jaunus produktus no koksnes, kurus paredzēts pielietot specifiskos apstākļos, sākotnēji ir jānosaka neapstrādātas koksnes īpašības. Promocijas darba eksperimentālā gaita un izmantotās analīzes metodes neapstrādātas lapkoku koksnes (alkšņa, apses, bērza) raksturošanai shematiski attēlotas 3. attēlā. Šīs pašas metodes izmantotas hidrotermiski modificētas lapkoku koksnes izpētei, analizējot apstrādes režīmu ietekmi uz īpašībām.

Trešajā nodaļā, pamatojoties uz 1. un 2. nodaļā apkopoto informāciju, analizēti eksperimentālā darba rezultāti un dots to izvērtējums.

Secinājumos ir formulēti sasniegtie darba rezultāti un definēti būtiskākie atzinumi.

Literatūras sarakstā ir uzskaitīti darbā izmantotie literatūras avoti, balstoties uz kuriem tika noteikti pētījuma virzieni un salīdzināti iegūtie rezultāti.



3. attēls. Eksperimentālā gaita un izmantotās analīzes metodes

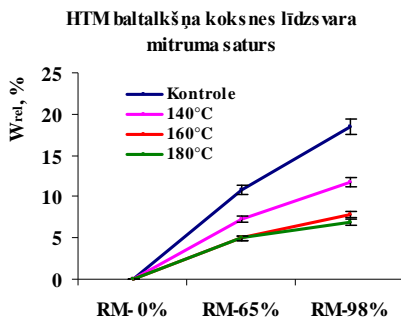
DARBA REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

Meklējumos lapkoku koksnes īpašību uzlabošanai izvēlējamies termiskās apstrādes paņēmieni, jo tā ir videi un cilvēkam draudzīga alternatīva metode koksnes bioloģiskās izturības uzlabošanai. Tā kā LV Koksnes ķīmijas institūtā ir pieejama multifunkcionāla koksnes modifikācijas iekārta, tad optimālos modifikācijas režīma parametrus pieskaņojām autoklāva tipa iekārtām. No literatūrā apkopotās informācijas secinājām, ka perspektīva ir koksnes termiskā modifikācija ūdens tvaiku vidē, tā dēvētā hidrotermiskā modifikācija (HTM), jo tā ir samērā vienkārša un efektīva. HTM procesā autoklāvā pie paaugstināta spiediena iegūtajai modificētajai koksnei lietošanai āra apstākļos izvirzījām prasības atbilstoši tehniskajai specifikācijai CEN/TS 15679 [3], kā arī papildus ieviesām nosacījumus mehāniskās stiprības un formas stabilitātes īpašībām.

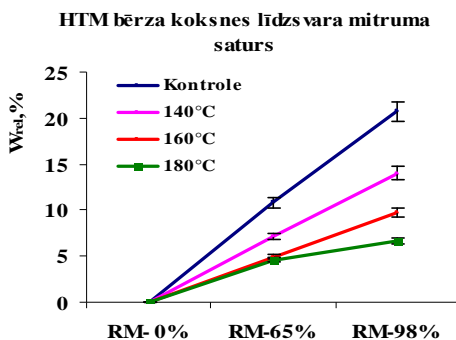
Uzsākot HTM procesa režīmu optimizāciju, sākotnēji izstrādājām un piemērojām trīs hidrotermiskās modifikācijas režīmus ar atšķirīgu maksimālo modifikācijas temperatūru. Kā zemāko temperatūru izvēlējamies 140°C, katra nākamā režīma temperatūru paaugstinājām par 20°C. Mūsu izvēlētajos apstrādes režīmos mainās ne tikai temperatūra, bet arī spiediens (0,42 MPa pie 140°C, 0,62 MPa pie 160°C un 0,95 MPa pie 180°C) un ūdens tvaika koncentrācija autoklāvā. Kā jau minēts, temperatūras celšanas stadijā spiediens pieaug, izturēšanas stadijā praktiski nemainās un dzesēšanas stadijā samazinās līdz atmosfēras spiedienam. Mainoties temperatūrai un spiedienam, izmainās koksnes autohidrolīzes ātrums, gaistošo mazmolekulāro produktu veidošanās apjomi un citi procesi. Līdz ar to, izstrādājot pirmos trīs režīmus, ņēmām vērā tikai divus mainīgos parametrus: termiskās apstrādes maksimālo temperatūru un spiedienu. Maksimālās temperatūras izturēšanas laiks bija vienāds - 1 stunda.

HTM lapkoku koksnes raksturošanai noteicām hidrofobitāti, pretuzbriešanas efektivitāti (raksturo formas stabilitāti), mehāniskās stiprības īpašības, noturību pret trupes sēnēm laboratorijas testos un āra apstākļos (ciešās krautnes, t.s. bloku tests 3. lietošanas klasē).

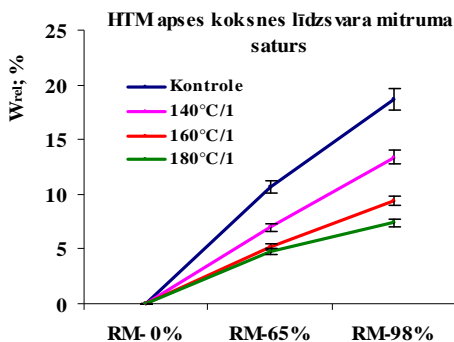
Augstākais līdzsvara mitruma saturs (LzMS) tika fiksēts neapstrādātai bērza koksnei (9,8 un 20,4% pie gaisa relatīvā mitruma satura (GRMS) attiecīgi 65% un 98%). LzMS pie šiem gaisa relatīvā mitruma saturiem pa sugām samazinājās sekojošā secībā: bērzs>apse>baltalksnis, kas skaidrojams ar bērza koksnes lielāku blīvumu un līdz ar to lielāku hidroksilgrupu daudzumu tilpuma vienībā. Būtisku ietekmi uz LzMS koksne atstāj arī ķīmiskā komponentsatāva atšķirības - jo lielāks holocelulozes (celuloze+hemicelulozes) saturs koksne, jo vairāk ūdens tā piesaista. Bērza un apses koksne ir augstāks holocelulozes saturs nekā alksnim. HTM pie 140°C samazina līdzsvara mitruma saturu visām trim lapkoku koksne, salīdzinot ar izejas koksni, par 30% un 35% attiecīgi pie GRMS 65% un 98%. Palielinot apstrādes temperatūru līdz 160°C, līdzsvara mitrums sasniedz samazinājumu par 50-55%. Nākamais modifikācijas režīms pie 180°C samazina līdzsvara mitrumu vēl par attiecīgi 4 un 10% (4.a, 4.b un 4.c attēli).



4.a attēls. HTM baltalkšņa koksnes līdzsvara mitruma saturs pie dažādiem gaisa relatīvā mitruma saturiem



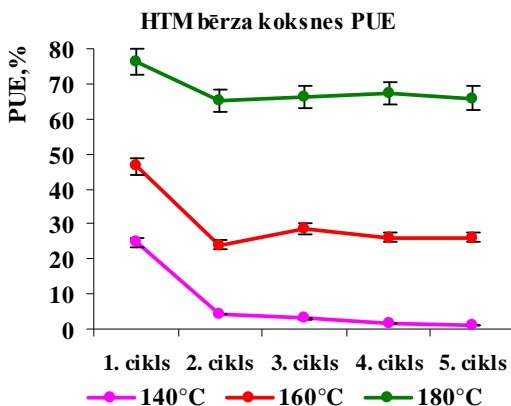
4.b attēls. HTM bērza koksnes līdzsvara mitruma saturs pie dažādiem gaisa relatīvā mitruma saturiem



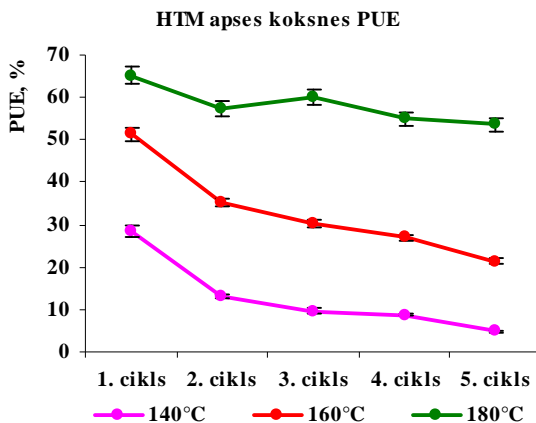
4.c attēls. HTM apses koksnes līdzsvara mitruma saturs pie dažādiem gaisa relatīvā mitruma saturiem

Visu pētīto HTM lapkoku koksnes formas stabilitāte pie dažādiem GRMS uzlabojās - par 35-40%, jau pie modifikācijas 140°C, maksimālo uzlabojumu par 46-53% un 60-70% attiecīgi pie GRMS 65 un 98% sasniedzot pie apstrādes 180°C. Šajā apstrādes režīmā augstāko formas stabilitāti ieguva bērza koksne, iespējams, augstāka blīvuma dēļ.

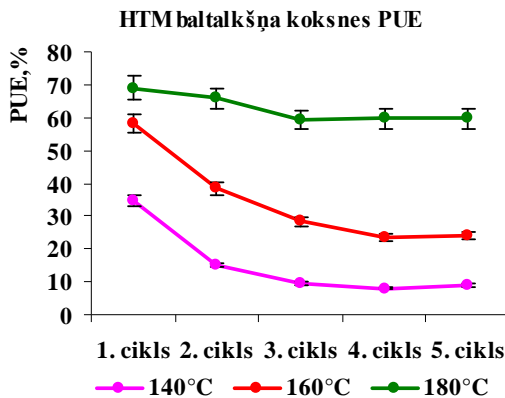
Lai varētu prognozēt HTM lapkoku koksnes pretuzbriešanas efektivitāti (PUE) jeb koksnes parauga tilpuma stabilitāti ilgtermiņā, veicām piecus samitrināšanas-izžāvēšanas ciklus, fiksējot paraugu izmērus un salīdzinot ar nemodificētu koksni. No 5.a, 5.b un 5.c attēliem labi redzams, ka pirmajā piesūcināšanas ciklā HTM koksne uzrāda līdzīgas formas stabilitātes vērtības, kādas mēs ieguvām, izturot koksni pie GRMS 98%. Taču ar katru nākamo ciklu formas stabilitāte pasliktinājās, īpaši strauji pie 140°C un 160°C modificētiem paraugiem. Tikai apstrādes režīms pie 180°C praktiski visām lapkoku koksnes nodrošināja salīdzinoši nemainīgu formas stabilitāti (samazinājums par 13-20%, salīdzinot savā starpā 1. un 5.cikla rezultātus).



5.a attēls. HTM bērza koksnes pretuzbriešanas efektivitāte



5.b attēls. HTM apses koksnē pretuzbriešanas efektivitāte

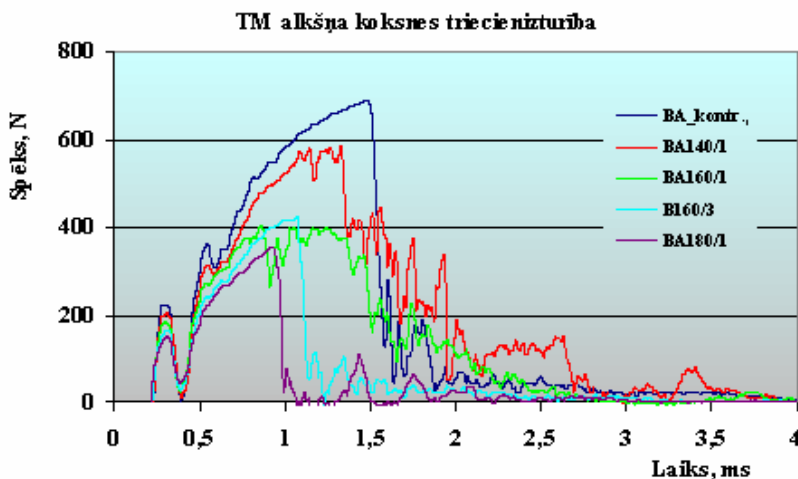


5.c attēls. HTM baltalkšņā koksnē pretuzbriešanas efektivitāte

Pirmie iegūtie rezultāti par HTM režīmu ietekmi uz lapkoku koksnē higroskopiskajām īpašībām parāda, ka maksimālos higroskopisko īpašību uzlabojumus sasniedzam pie modifikācijas temperatūrām 160°C un 180°C, bet formas stabilitāti cikliska paaugstināta mitruma iedarbībā garantē apstrādes režīmi ar modifikācijas temperatūru virs 160 °C. To varam skaidrot ar to, ka hidrotermiskās apstrādes rezultātā izmainās koksnē ķīmiskais komponentu sastāvs un samazinās hidroksilgrupu saturs. Relatīvais lignīna saturs koksnē ir pieaudzis, notikušas polikondensācijas reakcijas, lignīnam veidojot jaunus saites, kas samazina ūdens uzsūkšanu, līdz ar to, līdzsvara mitrumu un uzlabo koksnē tilpuma nemainīgumu. Nav izslēgts, ka koksnē šūnu sienās esošās komponentes ir izveidojušas blīvāku sakārtojumu, kas neļauj ūdenim uzbriedināt koksnē.

No literatūras ir zināms, ka, paaugstinot termiskās modifikācijas temperatūru, krasi samazinās koksnes mehāniskā stiprība, tāpēc bija svarīgi zināt, cik lielā mērā mūsu izveidotie modifikācijas režīmi ietekmēs lapkoku koksnes mehāniskās īpašības. Izstrādājot optimālo/-os termiskās modifikācijas režīmu/-us, koksnes robežstiprība liecē tika izvēlēta kā viens no būtiskākajiem kritērijiem. Izvirzījām prasību, ka HTM koksnes robežstiprības liecē samazinājums nedrīkst būt lielāks par 30%, salīdzinot ar izejas koksnī. Pieaugot apstrādes temperatūrai, lieces stiprība mainās, pie tam ir atšķirības starp koku sugām. Lieces stiprība bērzam pie apstrādes 140°C un 160°C pieaug attiecīgi par 33 un 9%, apsei pie 140°C - par 21%. Baltalksnim lieces stiprība nemodificētai un pie 140°C hidrotermiski modificētai koksnī maz atšķiras. Pieaugot modifikācijas intensitātei (temperatūrai un spiedienam), lieces stiprība samazinājās, pie HTM temperatūras 180°C apsei un bērzam pat par vairāk kā 50%, bet alksnim par 36%, salīdzinot ar izejas koksnī.

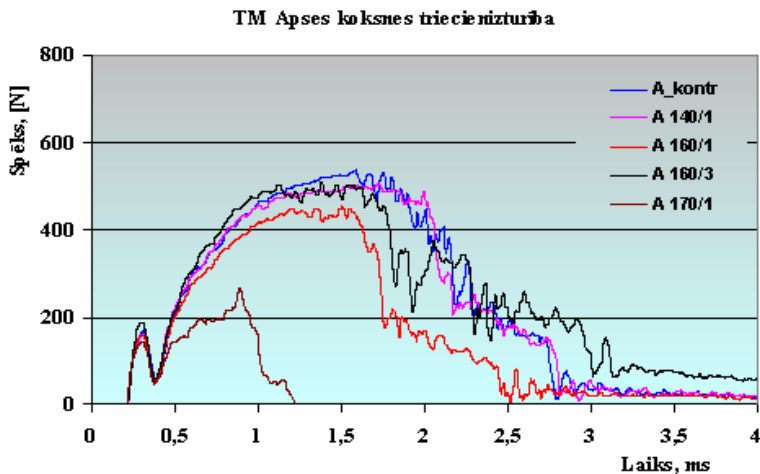
Viens no rādītājiem koksnes stiprības raksturošanai pret strauju spēka iedarbību ir triecienizturība. Tās izpēte bija veikta dinamiskā režīmā, iegūstot 6.a un 6.b attēlos redzamās sagraušanas spēka-laika līknes. Tās ļoti labi parāda katras lapkoku koksnes sagraušanas raksturu un HTM režīma ietekmi uz triecienizturību. Neapstrādātu un HTM baltalkšņa un bērza paraugu sagraušanas spēka-laika līkņu raksturs ir līdzīgs (skat. 6.a att.), kas parāda, ka koksnē noteikta spēka ietekmē salūzt momentāni. Pieaugot modifikācijas temperatūrai līdz 180°C, baltalkšņa un bērza koksnes salūšanas raksturs nemainījās, vienīgi paraugu salaušanai nepieciešamais darbs samazinājās par 61%.



6.a attēls. HTM baltalkšņa koksnes triecienizturības sagraušanas spēka-laika līknes

Apses koksnes spēka-laika līkne ir zemāka, taču darbs, kas vajadzīgs parauga salaušanai, ir lielāks. No 6.b attēla redzam, ka apse sagraust pakāpeniski. Pie

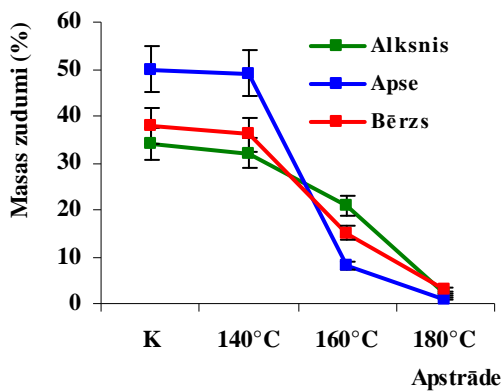
modifikācijas režīmiem 140°C un 160°C triecienizturība samazinājās pakāpeniski attiecīgi par 20 un 31%. Būtisks samazinājums, sasniedzot 72% zudumus, salīdzinot ar izejas koksni, bija pie 180°C modificētai apsei. Šiem paraugiem neizdevās uzņemt spēka-laika līknes, jo triecienizturība samazinājās dramatiski. Rezultāti parāda, ka HTM rezultātā lapkoku koksne ir kļuvusi trauslāka.



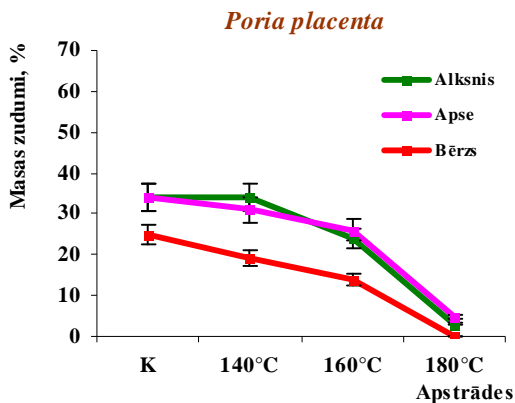
6.b attēls. HTM apses koksnes triecienizturības sagraušanas spēka-laika līknes

Apkopojot HTM lapkoku koksnes higroskopisko un mehānisko īpašību izmaiņas atkarībā no modifikācijas režīma redzam, ka hidrotermiskā apstrāde uzlabo higroskopiskās, bet būtiski pasliktina mehāniskās īpašības, jo īpaši modificējot virs 160°C. Tā kā modificēto koksni paredzēts lietot āra un paaugstināta mitruma apstākļos (3.lietošanas klase), tad ne mazāk svarīga ir tās bioloģiskā izturība pret trapes sēnēm.

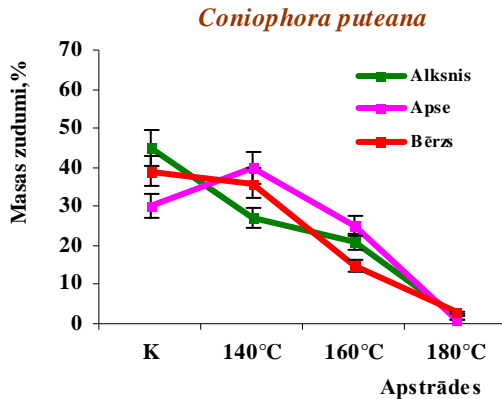
Modifikācija pie 140°C neuzlabo modificētas mīkstās lapkoku koksnes izturību pret testa sēnēm. Pēc baltās (*Coriolus versicolor*) (skatīt 7.a attēlu) un brūno (*Coniophora puteana*, *Poria placenta*) (skatīt 7.b un 7.c attēlus) trapes sēņu iedarbības masas zudumi ir līdzīgi un pat lielāki nekā kontroles koksnei.



7.a attēls. HTM lapkoku koksnis bioloģiskā izturība pret baltās trupes sēni *Coriolus versicolor* (EN 113)



7.b attēls. HTM lapkoku koksnis bioloģiskā izturība pret brūnās trupes sēni *Poria placenta* (EN 113)

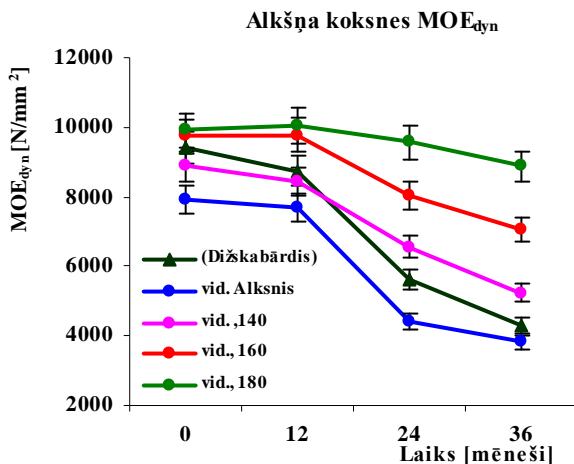


7.c attēls. HTM lapkoku koksnes bioloģiskā izturība pret brūnās trupes sēni *Coniophora puteana* (EN 113)

Apstrādes temperatūra 160°C uzlabo izturību pret brūnās trupes sēni *C.puteana* (masas zudumu samazinājums par 30-40%) un nedaudz arī pret baltās trupes sēni *C.versicolor* (masas zudumu samazinājums par 6-15%). Aizsardzību pret trupes sēnēm var uzlabot, koksni hidrotermiski modificējot virs 140°C. Lapkoku koksni ar 1. vai 2. izturības klasi var iegūt HTM režīmos, kur temperatūra ir augstāka par 160°C.

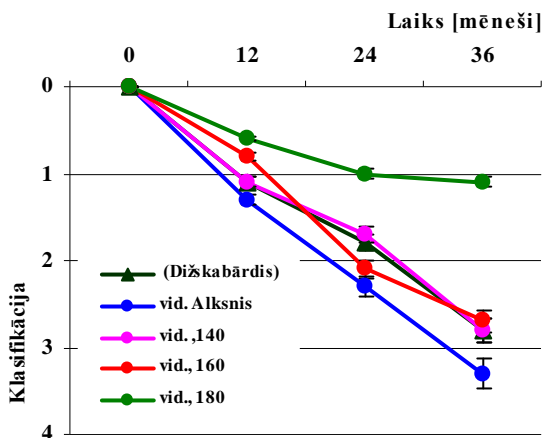
Nosakot koksnes bioloģisko izturību pret trupes sēnēm laboratorijā, mākslīgi tiek radīti ideāli apstākļi sēņu augšanai. Lai apzinātos HTM režīmu ietekmi uz lapkoku koksnes bioloģisko izturību ilgtermiņā, HTM alkšņa koksnes paraugi tika eksponēti 3 gadus āra apstākļos (izturības testēšana 3. lietojuma klasei, bloku tests). Pētījuma laikā izmantojām divas paraugu nesagraujošās metodes. Bioloģisko izturību noteicām, atbilstoši standartam EN 252 [6] pēc baļļu sistēmas novērtējot parauga vizuālās izmaiņas un virsmas mīkstumumu ar t.sk. „pick-up” metodi. Mehāniskās stiprības noteikšanai izmantojām Grindo Sonic iekārtu, ar kuru, fiksējot ultraskaņas izplatības ātrumu paraugā, noteicām dinamisko elastības moduli (MOE_{dyn}). Pēc pirmā gada MOE_{dyn} vērtība nedaudz samazinājās dižskabārža (starpliku funkcija kaudzēs), neapstrādāta baltalkšņa un pie 140°C modificēta baltalkšņa paraugiem, attiecīgi par 7, 3 un 5%. Turpretī pie 160°C un 180°C modificētiem baltalkšņa paraugiem MOE_{dyn} vērtības praktiski nebija mainījušās (skatīt 8.attēlu). MOE_{dyn} vērtības samazināšanās pēc 2. gada eksponēšanas āra apstākļos tika fiksēta visiem paraugiem. Visstraujāk MOE_{dyn} vērtības bija samazinājušās dižskabārža, neapstrādāta baltalkšņa un pie 140°C modificēta alkšņa koksnei (samazinājums pret izejas vērtībām bija attiecīgi par 40, 44 un 26%). Pēc trim gadiem neapstrādātas baltalkšņa koksnes vidējā MOE_{dyn} vērtība bija samazinājusies par 52%, turpretī pie 180°C modificēta - tikai par 10%, kas labi parāda apstrādes efektivitāti. Modifikācija

pie 140°C un 160°C negarantē baltalkšņa koksnes izturību 3.lietojuma klasei, jo triju gadu laikā paraugu MOE_{dyn} vērtības bija samazinājušās attiecīgi par 40% un 27%.



8. attēls. HTM baltalkšņa koksnes dinamiskā elastības moduļa samazināšanās 3 gadu laikā

Triju gadu laikā visu apstrādāto un neapstrādāto dižskabārža un baltalkšņa koksnes paraugu, izņemot pie 180°C termomodificētu, vizuālais un virsmas stāvoklis no gada uz gadu pasliktinājās (skat. 9. attēlu).



9. attēls. HTM baltalkšņa koksnes virsmas pasliktināšanās pēc „pick-up” testa klasifikācijas

Pēc pirmā gada paraugu virsmas bija daļēji pārklātas ar koksni krāsojošām sēnēm, bet nākamajos divos gados uz koksnes tika atrasti arī trupes sēņu augļķermeņi, kas liecina par inficēšanos ar dažādām koksnes sēnēm. Arī šī testa rezultāti liecina, ka apstrāde pie 180°C baltalkšņa koksnei nodrošina 3.lietošanas klasi, bet pārējie režīmi ir maz efektīgi. Krasā MOE_{dyn} vērtību samazināšanās ir skaidrojama ar trupes sēņu invāziju koksnē, ko apliecina no bloku testa noņemto sēņu paraugu mikroskopijas pētījumi. Koksnē tika atrasti baltās trupes bazīdijsēnes - kortīcijas *Stereum hirsutum* augļķermeņi un zilējums *Aureobasidium pullulans*.

Apkopojot un izanalizējot rezultātus par pirmajos trīs režīmos (140°C, 160°C, 180°C) iegūtās HTM lapkoku koksnes īpašībām, secinājām, ka

hidrotermiskā modifikācija pie augstākas apstrādes temperatūras uzlabo lapkoku koksnes higroskopiskās īpašības un bioloģisko izturību. HTM režīms 140°C/1 st. neuzlabo pētītās koksnes bioloģiskās izturības īpašības, savukārt režīms 180°C/1 st. Līdzās īpašību uzlabojumam būtiski pasliktina mehāniskās stiprības īpašības. HTM režīms 160°C/1 st. ir viduspunkts starp uzlabotām, bet nepietiekamām bioloģiskās izturības un higroskopiskām īpašībām un samērojamu mehānisko stiprību.

Tāpēc **papildus tika izstrādāti divi modifikācijas režīmi: 3 stundu apstrāde pie 160°C un 1 stundu apstrāde pie 170°C.** Pie optimizētajiem režīmiem iegūto HTM koksni pakļāvām identiskām pārbaudēm. Apkopojot un izanalizējot visos eksperimentu režīmos iegūtās HTM lapkoku koksnes īpašības, izveidojām 2.tabulu, no kuras varam secināt, ka:

- ✓ Modifikācijas režīms 160°C/3 stundas izvirzītās prasības izpilda daļēji, proti, daļēji uzlabo lapkoku koksnes bioloģisko izturību pret trupes sēnēm un daļēji nodrošina formas stabilitāti, bet ir būtiski samazināta triecienizturība. Bez tam, katras koka sugas koksne jāvērtē atsevišķi. Apstrāde 160/3 nodrošina lapkoku koksnei izvirzītās prasības lieces stiprībai un līdzsvara mitruma samazinājumam.
- ✓ Modifikācija režīms 170°C/1 stunda praktiski izpilda visas HTM lapkoku koksnei izvirzītās kvalitātes prasības, izņemot attiecībā uz triecienizturību. Apstrāde nodrošina vēlamo koksnes hidrofobitāti, formas stabilitāti ilgtermiņā, ievērojami uzlabo noturību pret trupes sēnēm, t.sk. pēc izskalošanas - tiek iegūta 1. vai 2.izturības klasei atbilstoša koksne.

Salīdzinot savā starpā šos optimizētos modifikācijas režīmus 160°C/3 st. un 170°C/ 1 st., no HTM lapkoku koksnes ražošanas pašizmaksas viedokļa, režīms 170°C/1 patērē par 11% mazāk elektroenerģijas (skat. 3.tabulu) un par 3,5% samazina HTM koksnes 1m³ ražošanas pašizmaksu (skat. 4.tabulu).

Lapkoku koksnes īpašības atkarībā no HTM režīma maksimālās temperatūras

Koka suga	T, °C	LzMS samazinājums, %		PUE, uzlabojums, % 5. cikls	CEN/TS 15083-1 izturības klase	Mehānisko īpašību izmaiņas, % (-) samazinās (+) palielinās		
		GRMS=65	GRMS=98			Liece	TrI	CpB
Baltalksnis	K	0	0	0	5.	0	0	0
	140	33	36	9	5. – 4.	-3	-19	-18
	160	54	58	24	4. – 3.	-33	-47	-27
	160/3	51	57	37	2. – 1.	-21	-64	-38
	170	55	61	49	1.	-24	-60	-37
	180	54	63	60	1.	-36	-61	-47
Apse	K	0	0	0	5.	0	0	0
	140	34	28	5	5. – 4.	+21	-24	-17
	160	51	50	21	4. – 3.	-14	-31	-25
	160/3	53	54	36	3. – 2.	-24	-43	-37
	170	57	58	43	2. – 1.	-23	-60	-36
	180	55	60	54	1.	-53	-72	-46
Bērzs	K	0	0	0	5.	0	0	0
	140	34	32	1	5.	+33	-5	-20
	160	54	58	26	4. – 2.	+9	-19	-28
	160/3	58	61	55	3. – 2.	-27	-41	-38
	170	59	65	57	2. – 1.	-41	-38	-38
	180	57	68	66	1.	-51	-61	-60
Kvalitātes prasības TMK pēc CEN/TS 15679		≥ 50	≥ 45	≥ 35	≤ 2.	≤ 30	≤ 40	≤ 35

3. tabula

0,0525 m³ HTM lapkoku koksnes ražošanas pašizmaksa atkarībā no apstrādes

Koka suga, sortiments	Apstrāde	Izej- materiāla cena, Ls	Elektroenerģijas patēriņš, kWh	Elektroenerģijas izmaksas, Ls	Izmaksas ūdenim, Ls	Darba spēks, Ls	Amortizācija Ls	Kopā, Ls
Bērzs, I. kvalitātes žāvēti, ēvelēti dēļi	140	9,45	21	2,25	0,02	0,50	0,40	12,62
	160		30	3,22				13,59
	160/3		37	3,97				14,34
	170		33	3,54				13,91
	180		40	4,29				14,66
Baltalksnis I. kvalitātes žāvēti, ēvelēti dēļi	140	8,4	21	2,25	0,02	0,50	0,40	11,57
	160		30	3,22				12,54
	160/3		37	3,97				13,29
	170		33	3,54				12,86
	180		40	4,29				13,61
Apse, I.kvalitātes žāvēti, ēvelēti dēļi	140	7,88	21	2,25	0,02	0,50	0,40	11,05
	160		30	3,22				12,02
	160/3		37	3,97				12,77
	170		33	3,54				12,34
	180		40	4,29				13,09

4.tabula

1m³ HTM lapkoku koksnes ražošanas pašizmaksa, Ls

Apstrāde	Bērzs	Baltalksnis	Apse
Neapstrādāta	200	180	170
140	240	220	210
160	258	238	229
160/3	273	253	243
170	264	245	235
180	279	259	249

Mūsu autoklāvā, lietojot dēļus ar uzdotajiem izmēriem (25 mm bieži, 100 mm plati, 1000 mm gari) vienas apstrādes laikā tiek apstrādāti 2 m². Veicot pārrēķinus, ieguvām HTM lapkoku koksnes 1m² ražošanas pašizmaksu atkarībā no izvēlētas lapkoku sugas un HTM režīma (skatīt 5. tabulu).

5. tabula

1m² HTM lapkoku koksnes ražošanas pašizmaksa, Ls

Apstrāde	Bērzs	Baltalksnis	Apse	Iespējamā tirgus cena, Ls		
				B*	BA*	A*
140	6,31	5,79	5,51	-	-	-
160	6,80	6,27	6,01	-	-	-
160/3	7,17	6,65	6,39	19,7	18,3	17,6
170	6,96	6,43	6,17	19,1	17,7	17,0
180	7,33	6,81	6,55	-	-	-

* B - bērzs, A - apse, BA – baltalksnis

Parasti reālā tirdzniecības cena ir 2,5 – 3 reizes augstāka par ražošanas pašizmaksas cenu. Dotajā brīdī Latvijā ir pieejama termiski modificēta bērza, oša un egles koksne, kas iegūta pēc ThermoWood procesa. Piedāvātās produkcijas 1m² tirdzniecības cena ir: ThermoWood Bērzs-190°C - **22,44 Ls**; ThermoWood Egle-215°C - **14,78 Ls**; ThermoWood Osis-215°C - **32,0 Ls** [11]. Salīdzinot pēc mūsu režīmiem (160°C/3 st. un 170°C/1 st.) iegūtās lapkoku koksnes 1m² iespējamo tirgus cenu redzam, ka varam būt konkurētspējīgi ar cenu (skatīt 5. tabulu).

Bērza koksnes morfoloģiskās struktūras izmaiņas hidrotermiskās modifikācijas procesā

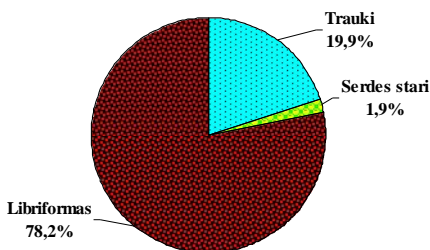
Koksnes morfoloģiskās struktūras izmaiņas norāda, ka plaši pieņemtais viedoklis par ķīmisko komponentu destrukciju nav vienīgais arguments, kas ietekmē koksnes īpašību izmaiņas termiskās modifikācijas procesā.[1].

Koksnei ir raksturīga ķīmiskā sastāva nevienādība (celuloze, hemicelulozes, lignīns, ekstraktvielas) un nevienmērīgs šo pamatkomponentu sadalījums koksnes šūnu sienīnās. Bez tam koksnes mikrostruktūra atšķiras ar šķiedru elementu daudzveidību. Līdz ar to hidrotermiskās modifikācijas laikā koksnē vienlaicīgi notiek gan ķīmiskās reakcijas, gan ķīmisko komponentu attiecību, gan struktūras izmaiņas.

Lapkoku koksnei morfoloģiskā struktūra ir daudz sarežģītāka nekā skujkoku koksnei. Lapkoki galvenokārt sastāv no libriformas šķiedrām (36-70%), traukiem (20-25%) un serdes stariem (6-20%) [2].

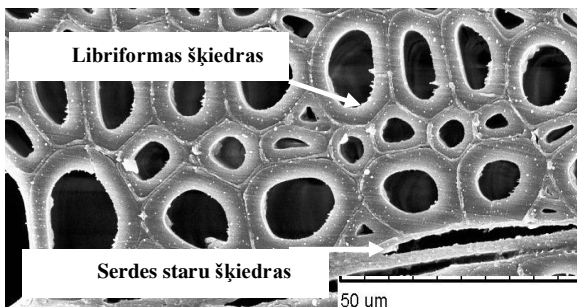
Lai iegūtu padziļinātu izpratni par lapkoku koksnes struktūras uzvedību HT iedarbības rezultātā, tika izvirzīts uzdevums noskaidrot bērza koksnes morfoloģisko elementu izmaiņas atkarībā no apstrādes parametriem.

Katram koksnes morfoloģiskajam elementam ir noteikta bioloģiskā funkcija. Atkarībā no tā, šo elementu izmēri, daudzumi un formas atšķiras. Analizējot koksnes mikroattēlus, mēs izrēķinājām, ka mūsu izejas bērza koksnes šķērsriezuma laukuma lielāko daļu (78,2%) veido libriformu šķiedras, vienu piekto daļu (19,9%) aizņem trauki un nelielu daļu - serdes stari (1,9 %) (10.attēls). Libriformu šķiedras vidējais laukums ir apmēram 30 reizes mazāks par vidēja trauka laukumu, attiecīgi $166 \mu\text{m}^2$ un $5000 \mu\text{m}^2$. Tajā pat laikā libriformu šķiedru skaits koksnē ir aptuveni 1000 – 1100 reizu lielāks nekā trauku.



10. attēls. Morfoloģisko elementu laukuma daudzums bērza koksnē

Mehānisko funkciju bērzu koksnē izpilda kompakti izvietotas, izteikti vertikāli iztieptas šauras libriformu šķiedras ar salīdzinoši biežām sienīnām (2-5 μm) (skat. 11. attēlu), kuras, kā iepriekš atzīmējām, veido galveno koksnes masu.



11. attēls. Libriformu šķiedras un serdes stari pirms termiskās apstrādes

6. tabulā atspoguļotie kvantitatīvo mērījumu rezultāti labi parāda hidrotermiskās modifikācijas ietekmi uz bērza koksnes libriformas šķiedru šķērsriezuma izmēru maiņu.

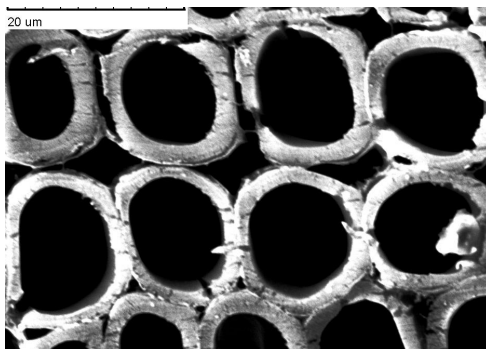
Apstrāde pie 140°C būtiski neizmaina libriformas šķiedras šķērsriezuma izmērus. Taču, paaugstinot modifikācijas temperatūru ik pa 20°C, katrā nākamajā apstrādē šķiedras šķērsriezuma izmēri (resp., šķiedras kopējais laukums, sieniņas laukums, sieniņas biezums u.c.) būtiski samazinās. To kopējais laukums samazinās pakāpeniski no 1% (140°C) līdz 20,7% (180°C), kas ir saistīts ar šķiedras sieniņā veidojošo termiski nestabilo komponentu – hemiceluložu un ekstraktvielu - termisko destrukciju, saistītā ūdens iztvaikošanu un citiem vienlaicīgiem procesiem. Koksnes vielas termiskā destrukcija un destrukcijas produktu difūzija notiek pa visu sieniņas caurmēru. Šķiedras izmēru un masas samazināšanās būs atkarīga no galveno komponentu attiecības un to sadalījuma sieniņā. Tā kā hemicelulozes, kā zināms, ir visnestabilākās koksni veidojošās komponentes, tad to lielāks daudzums koksnē radīs lielākas šķiedru izmēru izmaiņas termiskās apstrādes laikā.

Pieaugot modifikācijas temperatūrai, bērza koksne kļūst mazāk blīva. Pie 180°C autohidrolīzes procesa intensitāte palielinās un destrukcijas produkti izdalās tvaiku veidā.

Bērza koksnes libriformas šķiedru vidējie šķērsriezuma izmēri un to izmaiņas

Elementa veids	Libriformas šķiedras				
Mērījuma veids	Kopējais laukums, μm^2	Sieniņas laukums, μm^2	Sieniņas lineārais izmērs, μm	Dobuma laukums, μm^2	Dobuma lineārais izmērs, μm
Sākuma izmēri	166±63	103±38	2,58±0,55	62±28	8,65±2,28
Temperatūra, °C	Izmaiņas, %				
140	-1,0	-5,2	-6,7	2,4	0,1
160	-10,5	-23,4	-21,8	14,0	6,1
180	-20,7	-37,3	-32,0	4,8	1,4

Hidrotermiskās modifikācijas laikā ūdens tvaika vidē šķiedras sieniņa atrodas uzbriedušā stāvoklī. Vienlaicīgi ar sieniņas laukuma samazināšanos pie 180°C, libriformas šķiedras dobuma šķērsriezuma forma mainās no daudzstūrainas uz ieapaļu. Libroforma šķiedras sieniņas laukums samazinās par 37,3 % un sieniņas biezums – par 32,0 %, tās sāk daļēji atdalīties viena no otras (12.attēls). Libriformu šķiedras veido galveno koksnes masu, tādēļ to laukumu, lineāro izmēru un sakārtojuma blīvuma samazināšanās būtiski ietekmē koksnes mehāniskās un higroskopiskās īpašības.



12. attēls. Libriforma šķiedras pēc 180°C apstrādes

Dažās vietās viduslamella ir atrāvusies no libriformas šķiedras sieniņas, taču nav izzudusi. Ir zināms, ka viduslamella koksnē sastāv galvenokārt no lignīna (70-90%), kas ir termiski visstabilākā koksnes komponente.

Pēc mūsu domām, sieniņas laukums visprecīzāk no visiem mērījuma veidiem atspoguļo šķiedras izmaiņas, tas nozīmīgi korelē ar sieniņas biežumu.

Trauku šķērsriezuma laukuma izmēru mērījumi liecina, ka tie ir hidrotermiskās modifikācijas rezultātā vismazāk izmainītie bērza koksnes morfoloģiskie elementi. Šīs nelielās trauka laukuma izmaiņas var izskaidrot ar to, ka trauku sieniņas ir divas reizes plānākas (1µm) par libriformas šķiedras sieniņām. Iespējams, trauka sieniņa, salīdzinot ar libriformas sieniņu, sastāv no termiski stabilāka lignīna. Ir zināms, ka trauki satur pamatā stabilākās gvajacila struktūras, bet libriformas šķiedras un serdes stari – siringila struktūras [10]. Mēs konstatējam, ka, pieaugot modifikācijas temperatūrai, trauku dobuma garuma samazinājums radiālā virzienā ir lielāks kā tangenciālajā, 2,9% un 2,3% pret attiecīgi 0,5% un 0,7%.

Eksperimentā mēs novērojam serdes staru izmaiņas tikai koksnes šķērsgriezumā. Pieaugot hidrotermiskās modifikācijas temperatūrai, serdes staru sieniņas samazinās un sāk sarauties. Palielinot temperatūru līdz 180°C, pieaug arī spiediena un temperatūras ietekme uz serdes staru šķiedrām, un tā ir graužoša. Dobumi deformējas un veido pilnīgi vai daļēji atvērtas garas un platas plaisas. Plaisas platums pie 180°C vidēji palielinās par 250%.

Mūsu pētījuma rezultāti liecina, ka hidrotermiskās modifikācijas temperatūra 180°C ir pārāk augsta bērza koksnei, jo būtiski izmainās koksnē esošo morfoloģisko elementu (libriformas un serdes staru) izmēri un to savstarpējais sakārtotības blīvums, atsevišķos rajonos libriforma šķiedras attālinās vienai no otras, starp šķiedrām veidojoties tukšumiem un plaisām. Mēs uzskatām, ka šāds bojāts morfoloģisko elementu izkārtojums koksnē ir viens no būtiskākajiem mehānisko īpašību samazināšanās iemesliem HTM lapkoku koksnei.

SECINĀJUMI

1. Paaugstinot HTM temperatūru un laiku, uzlabojas lapkoku koksnes higroskopiskās īpašības un bioloģiskā izturība. HTM režīms 140°C/1 st. neuzlabo lapkoku koksnes bioloģiskās izturības īpašības, savukārt režīms 180°C/1 st. uzlabo lapkoku koksnes higroskopiskās un bioloģiskās izturības īpašības, bet būtiski pasliktina mehāniskās stiprības īpašības. HTM režīms 160°C/1 st. ir vidus punkts starp uzlabotām, bet nepietiekamām bioloģiskās izturības un higroskopiskām īpašībām un apmierinošām lapkoku koksnes mehāniskām īpašībām.
2. **Ir izstrādāti divi optimālie hidrotermiskās modifikācijas režīmi – 160/3 st. un 170/1 st.,** kuros iegūta lapkoku koksne izmantošanai 3. lietošanas klasē (āra vidē), ar 2.izturības klasi pret trupes sēnēm, par 50-65% labāku formas stabilitāti, koksnes līdzsvara mitrumu 5-7%, pieļaujamiem stiprības zudumiem - ne lielākiem par 30% liecei, 40% triecienizturībai un 40% cietībai pēc Brinella.
3. HTM režīms 170/1 st. patērē par 11% mazāk elektroenerģijas nekā režīms 160/3 st., kas samazina HTM lapkoku koksnes 1m³ ražošanas pašizmaksu.
4. HTM alkšņa koksnes 1m² pašizmaksa ir par 7% un 32% lētāka nekā attiecīgi apses un bērza koksnei.
5. Tika konstatēta koksnes morfoloģisko elementu izmēru samazināšanās (laukums, garums), kas krasi atšķirās atkarībā no termiskās apstrādes režīma un no morfoloģiskā elementa veida.
6. Visu morfoloģisko elementu (libriformas, trauki, serdes stari, gadskārtas) neliela izmēru maiņa bija konstatēta pēc apstrādes 140 °C. Strauja izmēru maiņa ir konstatēta pēc apstrādes 160 °C, bet vislielākās izmaiņas konstatētas pēc apstrādes pie 180 °C.
7. Libriforma šķiedras veido galveno koksnes daļu un vislielākā mērā ietekmē kopējās koksnes struktūras izmaiņas pēc apstrādes. Pēc apstrādes pie 180°C libriformas šķiedras šķērsgriezuma laukums vidēji bija samazinājies par 21%, šķiedras sienīgas laukums par 38% un sienīgas biezums par 32%.
8. Pēc termiskās apstrādes pie 180°C morfoloģisko elementu blīvais sakārtojums bērza koksnē zaudē sakārtojuma kompaktnumu. Starp šķiedrām veidojas tukšumi un plaisas, kas ir viens no iemesliem koksnes mehāniskās stiprības īpašību samazinājumam.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Awoyemi L., Jones I. P. *Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (Thuja plicata) wood during heat treatment* // Wood Science Technology – 2011. – Vol. 45, N 2, pp. 261-267.
2. Boonstra M.J., Rijdsdijk J.F., Sander C., Kegel E., Tjeerdsma B.F., Militz H., Van Acker J., Stevens M. *Physical aspects of heat-treated wood. Part 2. Hardwoods.* // Maderas. Ciencia y tecnología. – 2006. – Nr.8 – pp. 209-217.
3. LVS CEN/TS 15679:2008. Termiski modificēta koksne. Definīcijas un raksturlielumi.
4. LVS EN 84:2000. Koksnes konservanti - Apstrādātās koksnes paštrinātā novecināšana pirms bioloģiskās testēšanas – Ekstrahēšana.
5. LVS EN 113:2000. Koksnes konservanti – Testa metode iedarbīguma noteikšanai pret koksni iznīcinošām sēnītēm Basidiomycetes – Toksiskuma noteikšana.
6. LVS EN 252:2003. Lauka testa metode koksnes konservanta relatīvās efektivitātes noteikšanai saskarē ar zemi.
7. LVS EN 335-1:2006. Koksnes un tās izstrādājumu ilgizturība. Lietojumklašu definēšana. 1.daļa: Vispārīgās definīcijas.
8. LVS EN 350-1:2000. Koka un koksnes izstrādājumu izturība - Masīvās koksnes dabīgā izturība - 1.daļa: Koksnes dabīgās izturības testēšanas un klasifikācijas norādījumi.
9. LVS EN 350-2:2000. Koka un koksnes izstrādājumu izturība - Masīvās koksnes dabīgā izturība - 2.daļa: Norādījumi par atsevišķu Eiropā izplatītu koku sugu dabīgo noturību un impregnēšanas iespējām.
10. Gromov V. S., Evdokimov A. M., Abramovich Ch. L., Hrols Y. S. *Исследование распределения лигнина в древесине и топохимии ее делигнификации методом УФ-микроспектрофотометрии I. Распределение лигнина в клеточных стенках трахеальных элементов берёзовой древесины* // Химия древесины. – 1977. – №6 – 73-79 с..
11. <http://termokoksne.lv/en/index/index/griidas-deelji-10104>.