

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

Meža un vides zinātņu fakultāte
Faculty of Forest and Environmental Sciences



Mg.sc.ing. Jānis IEJAVS



**PRIEDES (*Pinus sylvestris* L.) KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA
ĪPAŠĪBAS UN TO UZLABOŠANAS IESPĒJAS**

***PROPERTIES AND THE POSSIBILITIES FOR IMPROVEMENT OF PINE
(Pinus sylvestris L.) CELLULAR WOOD MATERIAL PERFORMANCE***

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

Zinātnes doktora grāda

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

SUMMARY

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

Jelgava
2025

INFORMĀCIJA/ SYNOPSIS

Promocijas darba zinātniskais vadītājs/ Academic supervisor:

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

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātes Kokapstrādes katedrā un SIA “Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūtā” (MeKA). Pētījumi veikti laika posmā no 2010. līdz 2022. gadam.

The research is carried out at the Latvia University of Agriculture, Forest Faculty, Department of Wood processing and “Forest and Wood Products Research and Development Institute” Ltd. (MeKA). Research was done in period from 2010 till 2022.

Pētījumi veikti sekojošu projektu ietvaros/ Research was carried out within the projects:

1. Inovatīvu pašnesošu paneļu un būvelementu izstrāde no šūnveida koksnes materiāla. Nr. 2010/0248/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/019. Eiropas Reģionālās attīstības fonds, 2010 - 2013.
2. Paaugstinātas ekoloģiskās vērtības koksnes materiālu izpēte. Nr. L-KC-11-0004. SIA „MNKC”, Latvijas Investīciju attīstības aģentūra, 2011-2015.
3. Vietējo resursu (zemes dziļu, meža, pārtikas un transporta) ilgtspējīga izmantošana - jauni produkti un tehnoloģijas (apakšprojekts Nr.3 - Jauni tehnoloģiski risinājumi inovatīvai augstākas pievienotās vērtības koksnes materiālu un produktu radīšanai). Nr. VP-24, LR IZM, 2010-2014.
4. Meža un zemes dziļu resursu izpēte, ilgtspējīga izmantošana - jauni produkti un tehnoloģijas (ResProd), projekts Nr. 2. Pētījumi koksnes apstrādes, meža produktu loģistikas un plānošanas jomā. Nr. VPP2014-2017, LR IZM, 2014-2017.
5. Inovācijas meža apsaimniekošanā un koksnes apstrādes pievienotās vērtības ķēdē Latvijas izaugsmei: jauni pakalpojumi, produkti, tehnoloģijas (Forest4LV), Nr. VPP-ZM-VRIILA-2024/2-0002”, LR LZP, 2024-2025.



Oficiālie recenzenti/ Official reviewers:

- *Dr.chem.* Bruno ANDERSONS, Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūts, Vadošais pētnieks / Leading Researcher, Latvian State Institute of Wood Chemistry
- *Dr.sc.ing.* Ramūnas TUPČIAUSKAS, Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūts, Vadošais pētnieks / Leading Researcher, Latvian State Institute of Wood Chemistry
- *Ph.D.* Tom SVILANS, Dānijas Karaliskā Akadēmija, Asociētais profesors / Assistant Professor, Royal Danish Academy

Promocijas darba aizstāvēšana paredzēta Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes (LBTU) Materiālzinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Būvniecības un kokapstrādes institūta Prof. (*Emeritus*), *Dr.habil.sc.ing.* Henn TUHERM auditorijā, 2025. gada 10. oktobrī plkst. 10:00.

The defense of the doctoral thesis is scheduled at the open session of the Materials Science doctoral council of the Latvia University of Life Sciences and Technologies, in the Institute of Civil Engineering and Woodworking, Prof. (Emeritus), Dr.habil.sc.ing. Henn TUHERM auditorium, 10th of October , 2025 at 10:00 a.m.

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

SATURS/ CONTENTS

SAĪSINĀJUMI/ ABBREVIATIONS	6
ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA/ APPROBATION OF SCIENTIFIC WORK	8
1. ZINĀTNISKĀ DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	11
2. PĒTĪJUMU METODIKA	15
2.1. KOKSNE ŠŪNVEIDA MATERIĀLA IZGATAVOŠANA	15
2.2. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAS METODES	17
2.3. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBU UZLABOŠANAS UN PANEĻU PROTOTIPU NOVĒRTĒŠANAS METODES	20
3. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBAS	23
3.1. MITRUMS	23
3.2. BLĪVUMS	23
3.3. RUKŠANA UN BRIEŠANA	25
3.4. ŪDENS TVAIKA CAURLAIDĪBA	26
3.5. SILTUMVADĪTSPĒJA	28
3.6. UGUNŠREAKCIJA	30
3.7. MEHĀNISKĀS ĪPAŠĪBAS	31
3.8. PARAUGU IZMĒRU IETEKME UZ MEHĀNISKAJĀM ĪPAŠĪBĀM	33
3.9. SKRŪVJU IZRAUŠANAS PRETESTĪBA	34
3.10. LĪMĒTĀ PLAKNES SAVIENOJUMA ROBEŽSTIPRĪBA BĪDĒ	36
3.11. SALĪMĒJAMĪBA AR CITIEM KOKSNES MATERIĀLIEM	36
3.12. ĪPAŠĪBU KOPSAVILKUMS	38
4. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA PANEĻU PROTOTIPU ĪPAŠĪBAS	42
4.1. SILTUMA CAURLAIDĪBA	42
4.2. SKAŅAS IZOLĒŠANA	44
4.3. UGUNŠREAKCIJA	45
4.4. MEHĀNISKĀS ĪPAŠĪBAS	47
4.5. SECINĀJUMI PAR PANEĻU PROTOTIPU ĪPAŠĪBĀM	50
SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS	52
PATEICĪBA	53
1. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE SCIENTIFIC WORK	54
2. RESEARCH METHODOLOGY	58
2.1. PRODUCTION OF CELLULAR WOOD MATERIAL	58
2.2. METHODOLOGY TO DETERMIN CELLULAR WOOD MATERIAL PROPERTIES	60
2.3. METHODOLOGY TO EVALUATE IMPROVED CELLULAR WOOD MATERIAL PANEL PROTOTYPE PROPERTIES	64
3. CELLULAR WOOD MATERIAL PROPERTIES	67
3.1. MOISTURE	67
3.2. DENSITY	67
3.3. SHRINKAGE AND SWELLING	69
3.4. WATER VAPOR PERMABILITY	70
3.5. THERMAL CONDUCTIVITY	72
3.6. REACTION TO FIRE	74
3.7. MECHANICAL PROPERTIES	75

3.8. <i>EFFECT OF SAMPLE SIZE ON MECHANICAL PROPERTIES</i>	78
3.9. <i>SCREW WITHDRAWAL RESISTANCE</i>	79
3.10. <i>SHEAR STRENGTH OF GLUED JOINTS</i>	80
3.11. <i>GLUABILITY WITH OTHER WOOD BASED-MATERIALS</i>	81
3.12. <i>SUMMARY OF CELLULAR WOOD MATERIAL PROPERTIES</i>	82
4. PROPERTIES OF IMPROVED PANEL PROTOTYPES	87
4.1. <i>THERMAL CONDUCTIVITY</i>	87
4.2. <i>SOUND INSULATION</i>	89
4.3. <i>REACTION TO FIRE</i>	90
4.4. <i>MECHANICAL PROPERTIES</i>	93
4.5. <i>PANEL PROTOTYPES – CONCLUSIONS</i>	96
CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	97
GRATITUDE	99

SAĪSINĀJUMI/ ABBREVIATIONS

Saīsinājumi/abbreviations

- p* – parauga platums / *width of specimen*, mm;
b – parauga biezums / *thickness of specimen*, mm;
 CLT – krustām līmēts konstrukciju kemulsi okmateriāls / *cross laminated timber*;
E – egle / *spruce (Picea abies L.)*;
E_c – elastības modulis spiedē / *compressive modulus of elasticity*, MPa;
E_{m,l} – lokālais elastības modulis četrpunktu liecē / *bending modulus of elasticity*, MPa;
 EPI – emulsipolimērizocianāta līme / *emulsion polymer isocyanate adhesives*;
E_t – elastības modulis stiepē / *tensile modulus of elasticity*, MPa;
F – spēks / *force*, N;
f_c – robežstiprība spiedē / *compressive strength*, MPa;
 FIGRA – ugunsgrēka attīstības ātruma indekss / *fire growth rate index*, W s⁻¹;
f_m – robežstiprība četrpunktu liecē / *four point bending strength*, MPa;
F_{sk} – skrūvju izraušanas pretestība / *screw withdrawal resistance*, N;
f_{sl} – līmētā savienojuma robežstiprība bīdē / *shear strength of glue joint*, MPa;
f_t – robežstiprība stiepē / *tensile strength*, MPa;
f_{t,apl} – robežstiprība stiepē perpendikulāri pret aplīmēta koksnes šūnveida materiāla plakni / *internal bond strength of covered cellular wood material*, MPa;
f_v – robežstiprība bīdē / *shear strength*, MPa;
G – elastības modulis bīdē / *shear modulus of elasticity*, MPa;
 HDF – augsta blīvuma kokšķiedru plātne / *high density fibreboard*;
k_b – briešanas koeficients / *swelling coefficient*, % %⁻¹;
 KŠM – koksnes šūnveida materiāls / *cellular wood material*;
 KŠM0 – koksnes šūnveida materiāls paralēlā virzienā / *cellular wood material in parallel direction*;
 KŠM90 – koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā / *cellular wood material in perpendicular direction*;
k_r – rukšanas koeficients / *shrinkage coefficient*, % %⁻¹;
k_v – tilpuma rukšanas koeficients / *volume shrinkage coefficient*, % %⁻¹;
 MDF – vidēja blīvuma kokšķiedru plātne / *medium-density fibreboard*;
 Os – osis / *ash (Fraxinus excelsior L.)*;
 OSB – orientēto kokskaidu plātne / *oriented strand board*;
 P – priele / *pine (Pinus sylvestris L.)*;
 PB – kokskaidu plātne / *particle board*;
 PUR – poliuretāna līme / *polyurethane adhesive*;
 PW – bērza saplāksnis / *birch plywood (Betula pendula Roth)*;
 PVA – polivinilacetāta līme / *polyvinyl acetate adhesive*;
r – korelācijas koeficients / *correlation coefficient*;
 RH – relatīvais gaisa mitrums / *relative humidity of air*;
R_w – normalizētais skaņas gaisā izolācijas indekss – lielums, kuru nosaka, izmantojot laboratoriskos mērījumus vai aprēķinus, tas neietver skaņas izplatību pa blakusceļiem / *weighted sound reduction index*, dB;
 SBI – vienotās dedzināšanas iekārta / *single burning item*;
S_d – ūdens tvaika pretestības difūzijai ekvivalents gaisa slāņa biezums / *water vapour diffusion equivalent air layer thickness*, m;

- SD – standartnovirze / *standard deviation*;
 SIP – konstruktīvi izolētais panelis / *structural insulated panel*;
 SMOGRA – dūmu palielināšanās ātrums / *smoke growth rate*, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$;
 THR_{600s} – kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā / *total heat release in 600 s*, MJ;
 TMMBa – termo–mehāniski modificēts baltalksnis / *thermo–mechanically modified grey alder (Alnus incana (L.) Moench)*;
 TSP_{600s} – kopējā dūmu izdalīšanās 600 s laikā / *total smoke production in 600 s*, m^2 ;
 U – siltuma caurlaidības koeficients / *thermal transmittance coefficient*, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$;
 VAR – variācijas koeficients / *coefficient of variation*, %;
 W – mitrums / *moisture content*, %;
 λ – siltumvadītspējas koeficients / *thermal conductivity coefficient*, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$;
 μ – ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients / *water vapour permeability index*;
 ρ – blīvums / *density*, kg m^{-3} ;
 0 – rādītājs noteikts KŠM paralēlā virzienā, masīvkoksnei šķiedru virzienā vai plātņu materiāliem plātnes garenvirzienā / *parameter determined in cellular wood material parallel direction, for solid timber in grain direction or for panel in longitudinal direction*;
 90 – rādītājs noteikts KŠM perpendikulārā virzienā, masīvkoksnei šķērsām šķiedrām vai plātņu materiālam plātnes šķērsvirzienā / *parameter determined in cellular wood material perpendicular direction or for solid timber in a cross direction of the grain or for panel in cross vice direction*.

Indeksi/ *subscripts*

- 0 – rādītājs noteikts KŠM paralēlā virzienā, masīvkoksnei šķiedru virzienā vai plātņu materiāliem plātnes garenvirzienā / *parameter determined in cellular wood material parallel direction, for solid timber in grain direction or for panel in longitudinal direction*;
 90 – rādītājs noteikts vai paraugs izgatavots KŠM perpendikulārā virzienā, masīvkoksnei šķērsām šķiedrām vai plātņu materiāliem šķērsvirzienā / *parameter determined in cellular wood material perpendicular direction or for solid timber in a cross direction of the grain or for panel in cross vice direction*;
 k – zemākā 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība / *lower 5% characteristic value*.

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA/ APPROBATION OF SCIENTIFIC WORK

Promocijas darbā iekļauti pieci pētījumi, kuru nozīmīgākie rezultāti publicēti 15 tematiski saistītās zinātniskās publikācijas. Vienpadsmit publikācijas publicētas starptautiskos recenzējamās rakstu krājumos un ir pieejamas datu bāzēs, savukārt pārējās četras publicētas dažādu valstu vietēja mēroga zinātniskajā periodikā.

The doctoral thesis includes five studies, the most significant results of which have been published in 15 thematically related scientific publications. Eleven publications have been published in international peer-reviewed collections and are available in databases, while the other four have been published in local scientific periodicals of different countries.

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

1. **Iejavs J., Spulle U., Jakovļevs V.** (2011) The comparison of properties of three-layer cellular material and wood-based panel properties. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 54, No. 185, p. 40–49. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF). <https://bibliotekanauki.pl/articles/52758>
2. **Iejavs J., Spulle U., Jakovļevs V.** (2011) Evaluation of bending properties of three layer cellular wood panels using six different structural models. In: *Proceedings of Annual 17th International Scientific Conference Research for rural development 2011*. Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 85–90. (CABI, AGRIS). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20123121926>
3. **Iejavs J., Jakovļevs V.** (2012) Gluability and bonding quality of cellular wood material. In: *Proceedings of the 8th meeting of Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)*. Kaunas: Kaunas University of Technology, p. 207–213. <https://wsenetwork.org/gluability-and-bonding-quality-of-cellular-wood-material/>
4. **Iejavs J., Spulle U.** (2013) Compression strength of three-layer cellular wood panels. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 56, No.189, p.101–113. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF). <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.032.07>
5. **Iejavs J., Spulle U.** (2013) Structural properties of cellular wood material. *International Journal in the Field of Wood Engeneering ProLigno*. Braşov: Editura Universităţii „Transilvania” din Braşov, Vol. 9, No. 4, Part 2, p. 491–497. (CABI, DOAJ, DRJI, EBSCO Publishing). https://www.proligno.ro/ro/articles/2013/4/Iejavs_final.pdf
6. **Iejavs J., Jakovļevs V., Tuherm H.** (2013) Koksnes šūnveida materiāla fizikālās un mehāniskās īpašības. No: *Valsts pētījumu programma, 2010–2013. Rakstu krājums, Vietējo resursu ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas*

(NatRes). Rīga: LVKŅI, 117.–121. lpp.
https://alephfiles.rtu.lv/TUA01/000045085_e.pdf

7. **Iejavs J.**, Ješauskis E. (2014) Ģeometrisko izmēru ietekme uz koksnes šūnveida materiāla mehāniskajām īpašībām. *Zinātne un prakse nozares attīstībai. LLU Meža fakultāte zinātniski praktiskās konferences tēzes*. Jelgava: LLU, 84.–87. lpp.
8. Rozins R., **Iejavs J.** (2014) Evaluation of thermal properties of wood based composite panel walls. No: *Proceedings of Annual 20th International Scientific Conference Research for rural development 2014*. Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 109–114. (CABI, AGRIS).
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20153103543>
9. Buksans E., **Iejavs J.**, Rudzitis E. (2015) Reaction to fire performance of cellular wood materials. In: *Proceedings of the 1st European Workshop Fire Safety of Green Buildings*. Berlin: Shaker Verlag, p. 13–16.
10. **Iejavs J.**, Spulle U. (2016) Cellular wood material properties – review. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 59, No. 198, p. 5–18. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF).
<https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.156.14>
11. **Iejavs J.**, Rozins R. (2016) Water vapour permeability properties of cellular wood material and condensation risk of composite panel walls. *International Journal in the Field of Wood Engeneering ProLigno*. Braşov: Editura Universităţii „Transilvania” din Braşov, Vol. 12, No. 3, p. 3–11. (CABI, DOAJ, DRJI, EBSCO Publishing).
<https://www.proligno.ro/en/articles/2016/3/iejavs.pdf>
12. Spulle U., Buksāns E., **Iejavs J.**, Roziņš R. (2016) Reaction of door constructions made of the cellular wood material to fire. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 59, No. 198, p. 171–179. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF).
<https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.159.03>
13. Spulle U., Buksans E., **Iejavs J.**, Rozins R. (2018) Swelling Pressure and Form Stability of Cellular Wood Material. *Agronomy Research* 16(1), p. 263–275. (SCOPUS, EBSCO, CABI). <https://doi.org/10.15159/AR.18.011>
14. **Iejavs J.**, Podnieks M., Uzuls A. (2021) Some physical and mechanical properties of wood of fast-growing tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and radiata pine (*Pinus radiata* D.Don). *Agronomy Research*, 19 (2), p 434–443. (SCOPUS, EBSCO, CABI). <https://doi.org/10.15159/ar.21.038>
15. **Iejavs J.**, Šķēle K., Grants E., Uzuls A. (2022) Bonding performance of wood of fast-growing tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) with polyvinyl acetate and emulsion polymer isocyanate adhesives. *Agronomy Research*, 20 (1), p 174–187. (SCOPUS, EBSCO, CABI).
<https://doi.org/10.15159/ar.22.002>

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

1. **Iejavs J.**, Spulle U. International Scientific Conference “Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE)”, Tallina, Igaunija, 2010. gada 21.–22. oktobris, stenda prezentācija: Dendrolight type panels produced from aspen wood.
2. **Iejavs J.**, Spulle U. International Scientific Conference “Research for Rural Development 2011”, LLU, Jelgava, 2011. gada 18.–20. maijs, referāts: Evaluation of the bending properties of three layer cellular wood panels using six different structural models.
3. **Iejavs J.**, Spulle U., Jakovļevs V. International Scientific Conference “Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE)”, Oslo, Norvēģija, 2011. gada 27.–28. oktobris, stenda prezentācija: Compression properties of three layer cellular wood panels.
4. **Iejavs J.**, Spulle U. 6th International Scientific Conference “Students on Their Way to Science”, LLU, TF, Jelgava, 2011. gada 27. maijs, referāts: Dendrolight type panels produced from aspen wood.
5. **Iejavs J.**, Spulle U. Zinātniski praktiskā konference “Zinātne un prakse nozares attīstībai 2012”, LLU, MF, Jelgava, 2012. gada 15. marts, referāts: Trīs kārtu šūnveida paneļu spiedes robežstiprības rādītāji.
6. **Iejavs J.**, Jakovļevs V. 8th International Scientific Conference “Northern European Network for Wood Science and Engineering”, Kauņa, Lietuva, 2012. gada 13.–14. septembrī, referāts: Gluability and bonding quality of cellular wood material.
7. **Iejavs J.**, Spulle U. 9th International Scientific Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millennium”, Brasova, Rumānija, 2013. gada 7.–9. novembris, referāts: Structural properties of cellular wood material.
8. Ješauskis E., **Iejavs J.** Zinātniski praktiskā konference “Zinātne un prakse nozares attīstībai 2014”, LLU, MF, Jelgava, 2014. gada 27. marts, referāts: Ģeometrisko izmēru ietekme uz koksnes šūnveida materiāla mehāniskajām īpašībām.
9. Roziņš R., **Iejavs J.** International Scientific Conference “Research for Rural Development 2014”, LLU, Jelgava, 2014. gada 13.–15. maijs, referāts: Evaluation of thermal properties of wood based composite panel walls.
10. Kūms J., **Iejavs J.**, Roziņš R. Zinātniski praktiskā konference “Zinātne un prakse nozares attīstībai 2015”, LLU, MF, Jelgava, 2015. gada 19. marts, referāts: Šūnveida materiāla ūdens tvaika caurlaidības pētījumi.

1. ZINĀTNISKĀ DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Promocijas darba tēmas izvēles pamatojums un aktualitāte

Dažādu konstrukciju ražošanas, transportēšanas un izmantošanas izmaksu samazināšana vienmēr ir bijis aktuāls jautājums, raugoties gan no ekoloģiskajiem, gan arī ekonomiskajiem aspektiem.

Viens no veidiem, kā to iespējams realizēt, ir samazināt vairākkārtu kompozītmateriāla masu, aizstājot kādu no materiāla kārtām ar citu koksnes vai nekoksnes materiālu, kura masa ir salīdzinoši zemāka. Tādējādi šis konstruktīvais risinājums kļūst vieglāks. Vairāki pētnieki ir meklējuši jaunus tehnoloģiskos risinājumus vieglo koksnes konstrukciju izgatavošanai (Skuratov, 2010; Voth, 2009), tajā skaitā arī vieglo plātņu materiālu izgatavošanas izmaksu samazināšanai (Pflug u.c., 2003). Pētījumos minētās tehnoloģijas plaši lietoto saliktu kompozītu izgatavošanai, visbiežāk iekšējo kārtu veidojot no materiāla ar zemāku blīvumu, bet ārējās kārtās izmantojot materiālu ar augstāku blīvumu, kas nodrošina kompozītam nepieciešamās mehāniskās īpašības.

Koksnes šūnveida materiāla (KŠM) un tā mēbeļu plātņu ar firmas zīmi *Dendrolight*[®] izgudrošanu 2005. gadā un patentēšanu 2009. gadā Austrijā^{1,2} var uzskatīt par pēdējās piecpacmitgades vienu no kokrūpniecības inovācijām. Materiālu radīja austriešu izgudrotājs Johans Bergers (Johann Berger), par pamatu ņemot slēpju izgatavošanā izmantoto tehnoloģiju.

Latvijā, Ventspilī 2010. gadā atklāja pasaulē pirmā un vienīgā KŠM un no tā izgatavoto mēbeļu plātņu rūpnieciskā ražotne. Materiālam prognozēja plašas izmantošanas iespējas ne tikai mēbeļu plātņu izgatavošanā, bet arī transporta rūpniecībā un būvniecībā.

Līdz tam publiski bija pieejama KŠM izgudrotāja Johana Bergera prezentācija un publikācija, kurā atspoguļotas nozīmīgākās KŠM mēbeļu plātņu īpašības. Jāuzsver, ka tā laika pētījumā KŠM konstruktīvais risinājums atšķīrās no promocijas darbā apskatītās KŠM ražošanas tehnoloģijas. Lameļu rievās sākotnēji iestrādāja tikai vienā lameles plaknē.

Uzsākot KŠM rūpniecisko ražošanu Latvijā, augstākas formas stabilitātes nodrošināšanai un līmētā savienojuma kontakta laukuma palielināšanai ieviesa abpusējā lameļu rievu iezāģēšanas tehnoloģiju (vienpusējās iezāģējumu tehnoloģijas vietā), pateicoties kurai prognozēja materiāla fizikālo un mehānisko īpašību uzlabošanās.

Pamatojoties uz iepriekš minētajiem faktiem, var apgalvot, ka līdz jaunās uzbūves KŠM pirmā pilotpētījuma veikšanai Latvijā 2009. gadā un ražošanas uzsākšanai 2010. gadā nebija pieejama nekāda informācija par šādas uzbūves materiāla īpašībām. KŠM izmantošana būvniecībā, durvju un būvelementu izgatavošanā izvirzīja kā uzņēmuma SIA “Dendrolight Latvija” nākotnes mērķi, uzsākot rūpnīcas otrās kārtas attīstību. KŠM īpašību izpēti un īpašību deklarēšana ļautu piedāvāt dažādu izstrādājumu ražotājiem jaunu materiālu, kas pie noteiktiem

stiprības parametriem ievērojami samazinātu izgatavojamā produkta masu un uzlabotu tā kvalitāti.

Līdz 2010. gadam nebija veikta KŠM īpašību salīdzināšana ar tipisku koksnes materiālu īpašībām lietošanai kā nenesošajās, tā nesošajās būvkonstrukcijās. Īpašību izpēte atspoguļotu konkrētā materiāla priekšrocības vai iespējamus trūkumus salīdzinājumā ar citiem, kokrūpniecībā plaši izmantotiem koksnes materiāliem. Šī iemesla dēļ ir veikti inovatīvā materiāla pētījumi, kuros atainotas konkrētā materiāla nozīmīgākās īpašības un to ietekmējošie faktori.

Uzsākot pētījumus veikts plašs informācijas avotu apskats un analīze. Galvenās tēmas, kas apskatītas situācijas analīzē un iekļautas promocijas darbā, ir:

- KŠM izgatavošanas tehnoloģija un potenciālās izmantošanas iespējas;
- koksnes materiālu un būvelementu īpašības, to ietekmējošie faktori;
- koksnes materiālu un būvelementu īpašību noteikšanas metodes;
- koksnes materiālu konstruktīvās uzlabošanas iespējas;
- līdz šim veiktie pētījumi par KŠM un tā izstrādājumu īpašībām.

Rezultātā var izdarīt sekojošus secinājumus:

1. koksne un no tās izgatavotie materiāli ir higroskopiski un anizotropiski – to īpašības un īpašību ietekmējošie faktori ir jāņem vērā pie jaunu koksnes produktu izstrādes un īpašību modelēšanas;
2. KŠM pēc savas uzbūves un izgatavošanas tehnoloģijas ir unikāls koksnes materiāls, kuram nav analoga visā pasaulē;
3. neviens no iepriekš veiktajiem pētījumiem neatklāj visaptverošu, konspektīvu informāciju par neaplīmēta KŠM īpašībām un tās ietekmējošiem faktoriem;
4. KŠM un tā izstrādājumu īpašību noteikšanai rekomendējams izmantot citu, pēc pielietojuma, līdzīgu materiālu standartizētās pārbaudes metodes;
5. materiālu konstruktīvās uzlabošanas efektivitāte ir pierādīta gan krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu (CLT), konstruktīvi izolēto paneļu (SIP) gan KŠM mēbeļu plātņu (Dendrolight®) gadījumā.

Pēdējā desmitgadē koksnes materiālu īpašību prognozēšana ir kļuvusi par efektīvu metodi jaunu produktu izstrādē. Veicot īpašību prognozēšanu, izmantojot datormodelēšanas iespējas, nākas saskarties ar koksnes un koksnes materiālu lielo fizikāli mehānisko un fizikāli ķīmisko rādītāju izkliedi, kuru būtiski palielina mainīgie vides parametri. Salīdzinot ar tādiem neorganiskajiem materiāliem kā betons, tērauds un polimērmateriāli, koksnes un koksnes materiālu fizikāli mehāniskās īpašības ir ar daudz lielāku rādītāju izkliedi, kas apgrūtina īpašību prognozēšanu. Lai efektīvi un precīzi spētu izmantot datormodelēšanas iespējas, ir nepieciešams noskaidrot modelējamā materiāla īpašību raksturvērtības.

Par nožēlu SIA „Dendrolight Latvija” ilgstošais apgrozāmo līdzekļu trūkums un neskaidrie patenta izmantošanas jautājumi bija iespējamie iemesli pasludinātajai uzņēmuma maksātnespējai 2014. gadā un uzņēmuma likvidēšanai 2016. gadā. Rezultātā pārtrauca KŠM rūpniecisko ražošanu un tirdzniecību⁵. Neskatoties uz to,

atsevišķas pētnieciskās iestādes, pētnieki (Münster University of Applied Science⁶; Berger G., et.al. 2016; Roziņš u.c., 2020) un ražošanas uzņēmumi (“Gisler Holzbau” GmbH⁷; SIA “ARB Pope”⁸) izstrādā un patentēt līdzīga tehnoloģiskā risinājuma materiālus jaunu produktu izveidei un esošo produktu ražošanas efektivitātes paaugstināšanai. Iegūtās praktiskās zināšanas par šī unikālā materiāla un tā paneļu īpašībām kļūs īpaši aktuālas, brīdī kad KŠM šādā vai citādā formā atgriezīsies ražošanā.

Promocijas darba mērķis ir noskaidrot Latvijā ražota priedes koksnes šūnveida materiāla īpašības un izstrādāt konstruktīvi uzlabotu KŠM būvniecības paneļu prototipus un novērtēt to īpašības.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti sekojoši **uzdevumi**:

1. apkopot un analizēt informāciju par KŠM un citu koksnes materiālu izgatavošanas tehnoloģijām, īpašībām, to ietekmējošiem faktoriem;
2. izstrādāt metodiku un noskaidrot KŠM īpašības, tās salīdzinot ar masīvkoksnes un koksnes plātņu materiālu īpašībām;
3. izstrādāt pētījumu metodiku un novērtēt konstruktīvi uzlabotu KŠM būvniecības paneļu prototipu īpašības, tās salīdzināt ar plaši būvniecībā lietoto koksnes materiālu, pēc izmantošanas līdzīgu izstrādājumu īpašībām un būvnormatīvu prasībām.

Promocijas darba hipotēze ir aiztāvama ar sekojošām tēzēm:

1. koksnes šūnveida materiāla īpašības atšķiras no masīvkoksnes un koksnes bāzes plātņu materiālu īpašībām;
2. koksnes šūnveida materiāla konstruktīvā uzlabošana ar aplīmēšanas paņēmieni būtiski uzlabo materiāla fizikālās, fizikāli – ķīmiskās un mehāniskās īpašības.

Zinātniskā novitāte:

- noteiktas KŠM īpašības, analizēti to ietekmējošie faktori, kā arī iegūtas sakarības materiāla īpašību prognozēšanai;
- izstrādāti konstruktīvi risinājumi KŠM īpašību uzlabošanai ar aplīmēšanas paņēmieni, noteiktas un salīdzinātas to īpašības ar mēbeļu rūpniecībā un būvniecībā plaši izmantoto koksnes materiālu īpašību rādītājiem;
- izstrādāti KŠM būvniecības paneļu prototipi, noteiktas un salīdzinātas to īpašības ar līdzīgu izstrādājumu īpašībām un būvnormatīvos noteiktajām prasībām.

Darba praktiskā nozīmība

Promocijas darbā noteiktās un apkopotās KŠM īpašības un to sakarības sniedz iespēju veikt inženiertehniskos aprēķinus un īpašību prognozēšanu dažādiem izstrādājumiem un konstrukcijām, kuras projektētas no KŠM. Izstrādāti vairāki plātņu materiālu un būvniecības paneļu prototipi, kuros KŠM uzlabots ar

konstruktīvo jeb aplīmēšanas paņēmieni, izmantojot masīvkoksni, koksnes plātņu materiālus un siltumizolācijas materiālus. Prototipiem noteiktas indikatīvās fizikālās, mehāniskās un fizikāli-ķīmiskās īpašības durvju vērtnu, sienu un pārsegumu paneļu raksturošanai. Salīdzinātas KŠM un uzlaboto paneļu prototipu īpašības, novērtēta paneļu prototipu īpašību atbilstība būvnormatīvos noteiktajām prasībām.

Kopumā darbā iegūtie rezultāti sniedz praktisku perspektīvu inženiertehnisko aprēķinu un datorsimulāciju veikšanai dažādiem KŠM izstrādājumiem un konstrukcijām.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs sastāv no 5 nodaļām:

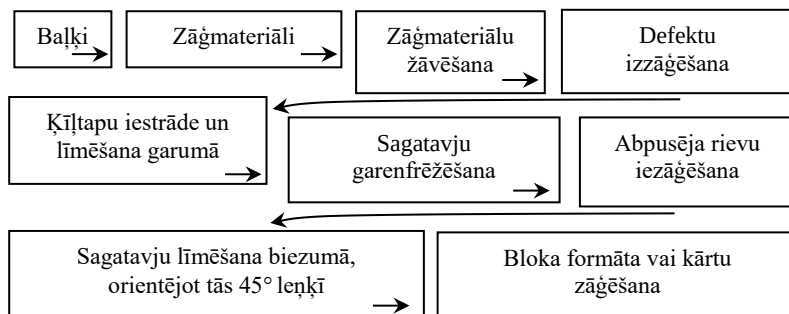
1. nodaļa. Situācijas analīze;
2. nodaļa. Pētījumu vispārējā metodika;
3. nodaļa. Pētījumi par KŠM īpašībām;
4. nodaļa. Pētījumi par konstruktīvi uzlabota KŠM paneļu prototipu īpašībām;
5. Secinājumi un rekomendācijas.

Darbs noformēts uz 152 lappusēm, ar 66 attēliem, 43 tabulām un 41 sakarību. Izmantoto informācijas avotu sarakstā ietilpst: 104 literatūras avoti, 49 standarti un normatīvi. Promocijas darba kopsavilkumā iekļautos literatūras avotus skatīt promocijas darbā.

2. PĒTĪJUMU METODIKA

2.1. Koksne šūnveida materiāla izgatavošana

Pētījumiem paredzēto KŠM izgatavošanai izmantoti priedes (*Pinus sylvestris* L.) zāģmateriāli. To nominālie izmēri: biezums 32 mm, platums 112 mm un garums 4200 mm. KŠM izgatavošana veikta rūpnieciski, automatizētā ražošanas līnijā, uzņēmumā SIA “Dendrolight Latvija”. KŠM izgatavošanas principiālā shēma parādīta 2.1. att.



2.1. att. KŠM izgatavošanas tehnoloģijas principiālā shēma.

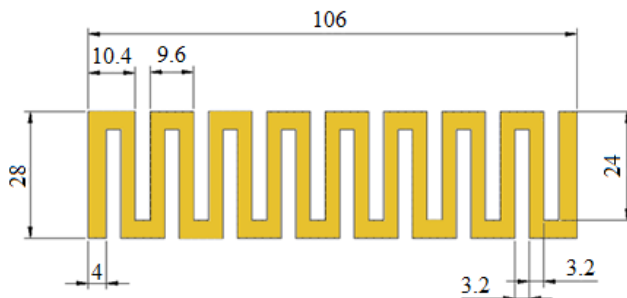
No zāģmateriāliem izzāģē trupējušos, daļēji saaugušos zarus, metāla ieslēgumus un plaisas. Pēc defektu izzāģēšanas veikta zāģmateriālu līmēšana garumā. Zāģmateriāli līmēti garumā, izmantojot ķīļtapu savienojumu, ko raksturo šādi parametri: ķīļtapas garums 11 mm, tapas solis 4 mm un pielaide tapu galos 1 mm. Pie ķīļtapu savienojuma līmēšanas piecas sekundes nodrošināts 12 MPa gala spiediens. Salīmējamo sagatavju vidējais mitrums ir 12%. Sagatavju līmēšanai garumā un KŠM bloku līmēšanas procesos izmantota vienkomponeņa D3 grupas ūdens bāzes polivinilacetāta (PVA) līme *Cascol 3353*.

Ķīļtapu savienojumi iestrādāti un redzami sagatavju platajā skaldnē. Pēc ķīļtapu savienojumu līmes sacietēšanas veikta garumā saaudzēto sagatavju garenfrēzēšana, izmantojot četrpusīgo garenfrēzmašīnu, iegūstot sagataves ar nominālajiem šķēsgriezuma izmēriem – biezumu 28 mm, platumu 106 mm un garumu 2010 mm.

Pēc sagatavju garenfrēzēšanas abpusēji pa sagatavju garumu iefrēzētas 8 rievas, skat. 2.2. att.. Iestrādāto rievu dziļums ir 24 mm, abpusējais rievu solis 6.4 mm, rievas platums 3.2 mm.

KŠM bloku līmēšana biezumā veikta, izmantojot nepārtrauktas darbības apsildāmo presi. KŠM saklāts četrās kārtās, katru nākamo kārtu orientējot attiecībā pret iepriekšējo 90° leņķī. PVA Līme *Casco 3353* saklātajām kārtām uzklāta caur dīzi ar oscilācijas paņēmienu, nodrošinot aptuveni 250 g m⁻² vidējo līmes patēriņu.

Presēšanas cikla ilgums pie 60 līdz 75 °C un 0.2 MPa spiediena nodrošināts 6 minūtes. Iegūtā KŠM bloku izmēri: biezums 112 mm, platums 1350 mm un garums 2500 mm.



2.2. att. Priedes dēļa šķēsgriezums ar iezāģētām rievām:
izmēri milimetros.

Pēc iekšējo kārtu sagatavju salīmēšanas kopā iegūst KŠM bloku ar paralēlo virzienu (attiecībā pret līmēšanas preses padeves virzienu), skat. 2.3. att. (1).



1



2

2.3. att. Atšķirīgie KŠM virzieni:

1 – paralēlais (KŠM₀); 2 – perpendikulārais (KŠM₉₀).

Turpmākajās apstrādes operācijās veic KŠM bloka sazāģēšanu nepieciešamā biezuma sagatavēs, kuras orientē 45° leņķī un kalibrē, iegūstot KŠM ar perpendikulāro virzienu, skat. 2.3. att. (2). KŠM ārējās kārtas aplīmējot ar dažādiem koksnes materiāliem vai papildinot ar siltumizolācijas materiāliem, pētījumu vajadzībām iegūti dažādi KŠM būvniecības paneļu prototipi ar uzlabotām īpašībām.

Par pamatu pētījumos izmantots KŠM, kas izgatavots no 28 mm bieziem priedes dēļiem, savukārt lai novērtētu izejmateriāla biezuma ietekmi uz atsevišķām KŠM fizikālajām, fizikāli ķīmiskajām un mehāniskajām īpašībām, papildus izgatavots KŠM no 18 vai 25 mm bieziem dēļiem. Gadījumā, ja pētījumā izmantotā KŠM dēļu biezums atšķiras no 28 mm, tas minēts attiecīgajā pētījuma nodaļā.

Saskaņā ar saistītajiem pētījumiem ātraudzīgo plantāciju koku sugu eikalipta (*Eucalyptus grandis* W. Hill) un radiata priedes (*Pinus radiata* D. Don) izmantošana

KŠM materiāla un tā paneļu ražošanai var tikt izskafīta kā alternatīva priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksnes izmantošanai gan balstoties uz šo izejmateriālu mehāniskajām īpašībām, gan salīmēšanas iespējām (Iejavs u.c., 2021; Iejavs u.c., 2022).

2.2. Koksnes šūnveida materiāla īpašību noteikšanas metodes

KŠM īpašību pētījumiem izmantots rūpnieciski, saskaņā ar 2.1. nodaļā aplūkoto tehnoloģiju izgatavots KŠM. To sazāģē vai salīmē pētījumiem nepieciešamajos izmēros. KŠM trīs kārtu plātņu paraugu un paneļu prototipu izgatavošanā izmantoti galvenokārt koksnes materiāli ar attiecīgajās darba nodaļās norādītajām tehnoloģijām.

Mitrums

Veikts pētījums ar mērķi novērtēt KŠM mitrumu (W) atkarībā no gaisa relatīvā mitruma RH (no 30 līdz 85%). Novērtēšana veikta pie konstantas gaisa temperatūras 20 °C. KŠM mitruma noteikšanai izmantota svēršanas – žāvēšanas metode saskaņā ar standarta LVS EN 13183–1 metodiku. Pētījumā izmantoti divu veidu paraugi ar nominālajiem izmēriem 112×112×112 mm un 56×56×300 mm. Kopā pētījumā pārbaudītas 4 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 120 gab.

Blīvums

Novērtēta KŠM blīvuma (ρ) atkarība no gaisa relatīvā mitruma RH (robežās no 30 līdz 85%) un KŠM mitruma W (robežās no 6 līdz 18%) pie konstantas gaisa temperatūras 20 °C. Blīvuma aprēķināšana veikta saskaņā ar standarta ISO 3131 7.1. punkta metodiku. Pētījumā izmantoti divu veidu paraugi ar nominālajiem izmēriem 112×112×112 mm un 56×56×300 mm. Pētījumam kopā izgatavotas un pārbaudītas 4 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 120 gab.

Rukšana un briešana

Novērtēti KŠM rukšanas un briešanas rādītāji atkarībā no gaisa relatīvā mitruma (robežās no 30 līdz 85%) pie konstantas gaisa temperatūras 20 °C. Rukšanas un briešanas rādītāji izmantojami dažādu KŠM konstrukciju sēžu un pielaižu aprēķināšanai, kā arī jaunu produktu izstrādē, materiālu savstarpējās savienošanas novērtēšanai. Rukšanas un briešanas rādītāju aprēķināšanai izstrādāta pārbaudes metodika, kura balstīta uz standarta LVS EN 318 pārbaudes un standarta DIN 52184 aprēķinu metodiku. Katram no 3 KŠM virzieniem (platumam, biezumam un garumam) izgatavoti 20 paraugi ar nominālajiem izmēriem 56×56×300 mm – izturēšanai pie 3 dažādiem gaisa relatīvā mitruma līmeņiem (30, 65 un 85%). Kopējais pārbaudīto paraugu skaits 60 gab.

Ūdens tvaika caurlaidība

Veiktas pārbaudes ar mērķi noteikt KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumus un novērtēt lameļu biezuma un salīmēto kārtu skaita ietekmi uz materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem. Ūdens tvaika pārvades raksturlielumi izmantojami būvkonstrukciju kondensācijas riska novērtēšanai. Rādītāji noteikti saskaņā ar

standarta LVS EN 12086 metodiku 6 paraugu grupām ar kopējo paraugu skaitu 18 gab.

Siltumvadītspēja

Lai novērtētu KŠM kā siltumizolācijas materiālu, būvkonstrukciju izgatavošanai un dažādu konstrukciju siltumpretestības aprēķināšanai noteikti materiāla siltumvadītspējas koeficienti λ saskaņā ar standarta LVS EN 12667 pārbaudes metodiku. Kopā pārbaudīti 4 paraugi abiem materiāla virzieniem. Paraugu nominālie izmēri abos gadījumos bija 112×600×600 mm.

Ugunsreakcija

KŠM klasificēšanai ugunsreakcijas klasē un ugunsreakcijas parametru novērtēšanai izgatavoti 6 lielizmēra paraugi – pa 3 paraugiem materiāla paralēlajam un perpendikulārajam virzienam. Pārbaude veikta vienotās dedzināšanas iekārtā saskaņā ar standarta LVS EN 13823 D ugunsreakcijas klasei atbilstošo pārbaudes metodiku. Katrai pārbaudei izgatavotas divas KŠM sagataves ar garumu 500 mm un 1000 mm, abos gadījumos paraugu platums ir 1500 mm. Papildus izgatavoti un pārbaudīti 9 paraugi ar liesmas iedarbībai pakļauto laukumu 90×250 mm – pārbaudei ar atsevišķa liesmas avota testu saskaņā ar standarta LVS EN ISO 11925–2 pārbaudes metodiku. Abās pārbaudēs izmantoti KŠM paraugi, kuru biezums ir 56 mm.

Mehāniskās īpašības

Veikti vairāki pētījumi, lai noteiktu KŠM nozīmīgākās mehāniskās īpašības un novērtētu to ietekmējošos faktorus. Izmantojot 16 paraugu grupas, kā arī standartu LVS EN 408+A1:2012 un ASTM C 273–00 pārbaucē metodes 132 paraugiem materiāla paralēlā un perpendikulārā virzienā, ir noteikti robežstiprības un elastības moduļu rādītāji statiskajā liecē, spiedē, stiepē un bīdē. Katram materiāla virzienam, lieces pārbaudēm izmantoti 8 lielizmēra KŠM paraugi ar biezumu 136 mm, platumu 280 mm un garumu 2500 mm. Lai noteiktu KŠM robežstiprību spiedē, izgatavoti 30 kubveida paraugi ar malas garumu 112 mm. Lai noteiktu KŠM robežstiprību stiepē, elastības moduli stiepē un elastības moduli spiedē, abiem paraugu veidiem un katrai īpašībai izgatavoti astoņi paraugi ar garumu un platumu 112 mm, kā arī augstumu 224 mm. Bīdes robežstiprība un bīdes elastības modulis noteikts, izmantojot 8 paraugus ar garumu 300 mm un šķēsgriezuma izmēriem 56 mm.

Projektēšanas vajadzībām un mehānisko rādītāju salīdzināšanai ar citu materiālu mehāniskajiem rādītājiem visiem rādītājiem aprēķināts 5% kvantilis saskaņā ar standartu LVS EN 14358.

Paraugu ģeometrisko izmēru ietekme uz KŠM mehāniskajām īpašībām

Saskaņā ar literatūru koksnes un koksnes materiālu paraugu ģeometrisko izmēru ietekme uz materiālu mehāniskajām īpašībām nav viennozīmīga, tādēļ, paplašinot iepriekš minētā pētījuma metodiku par materiāla mehāniskajām īpašībām, novērtēta KŠM paraugu šķēsgriezuma ģeometrisko izmēru un laukuma ietekme uz materiāla robežstiprību un elastības moduļiem liecē, stiepē, spiedē un bīdē. Šajā pētījumā materiāls pārbaudīts paralēlā virzienā – saskaņā ar standarta LVS EN 408+A1:2012 10., 16., 18. un 19. punkta prasībām.

Materiāla paralēlā virziena izmantošana trīskārtu būvniecības paneļu izgatavošanā ir uzskatāma par ekonomiski izdevīgāko risinājumu saistībā ar mazāku izgatavošanas operāciju skaitu, salīdzinot ar perpendikulāro materiāla virzienu. Nominālais KŠM vienas lameles biezums šajā pētījumā bija 28 mm. Pētījumā izmantotas 23 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 150 gab. Izmēru un laukuma ietekme apskatīta paraugiem, kuru izmēri ir robežās no $28 \times 56 \times 300$ mm līdz $112 \times 600 \times 2240$ mm. Lai novērtētu ģeometrisku izmēru un laukumu ietekmes atsevišķo un mijiedarbības būtiskumu uz materiāla mehāniskajām īpašībām, izmantotas vienu un divu faktoru regresijas analīzes metodes.

Mehānisko stiprinājumu – kokskrūvju noturība KŠM

Koksnes materiālu un izstrādājumu savstarpējai savienošanai visplašāk izmantojami ir divi paņēmieni – lietojot mehāniskos stiprinājumus jeb skrūves un fizikālo jeb salīmēšanas paņēmieni. Šī iemesla dēļ ir veikts pētījums ar mērķi novērtēt mehānisko stiprinājumu jeb skrūvju noturību KŠM. Līdztekus noteiktajiem rādītājiem ir analizēti skrūvju noturību ietekmējošie faktori. Eksperimentālā pētījuma metodika balstīta uz modificētu standarta LVS EN 320 pārbaudes metodiku. Pētījumā izmantotas trīs dažādu veidu skrūves, kuras plaši piedāvā Latvijas tirgū, gan slodzi nesošu, gan nenesošu konstrukciju izgatavošanai. Vērtēts skrūvju ieskrūvēšanas dziļums robežās no 14 līdz 70 mm.

Nenesošā pielietojuma skrūves SPEC17 izmantotas, lai novērtētu skrūvju izraušanas pretestību atkarībā no skrūvju ieskrūvēšanas virziena un dziļuma, savukārt lai noteiktu skrūvju diametra un skrūvju iestrādes veida ietekmi uz skrūvju izraušanas pretestību no KŠM, pētījumā izmantotas nesoša pielietojuma skrūves HBS6220 un HBS8280.

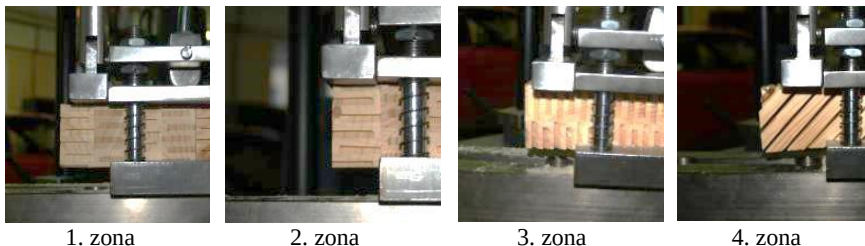
SPEC17 skrūvju gadījumā pārbaudei izgatavotas 12 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 120 gab. – katrā grupā pa 10 paraugiem.

HBS6220 un HBS8280 skrūvju gadījumā izmantotas 4 paraugu grupas, katrā grupā pa 15 paraugiem. Šīm grupām rādītāji ir noteikti, KŠM orientējot perpendikulārā virzienā pret skrūves garenasi un iestrādi veicot KŠM vietā ar mazāko koksnes daudzumu uz vītnes. Skrūves iestrādes dziļums visos četros gadījumos ir 70 mm.

Inženiertehnisko aprēķinu veikšanai atsevišķu paraugu grupu rādītājiem aprēķinātas skrūvju izraušanas pretestības raksturlielumu vērtības saskaņā ar standarta LVS EN 14358 metodiku.

Līmētā plaknes savienojuma robežstiprība bīdē

KŠM ir veidots, salīmējot kopā vairākas koksnes kārtas, tādēļ ir novērtēta līmētā savienojuma mehāniskā izturība. Pārbaude veikta, līmes šuvi slogojot bīdē pēc standartā LVS EN 392 noteiktā pārbaudes principa. Pārbaudēm pakļauti 30 līmētie plaknes savienojumi, kuru robežstiprības rādītāji bīdē salīdzināti ar KŠM90 konstruktīvajiem rādītājiem, kas noteikti, slogojot materiālu četrās dažādās zonās. KŠM bīdes pārbaudei pakļautās materiāla zonas parādītas 2.4. att.



1. zona 2. zona 3. zona 4. zona

2.4. att. **KŠM bīdes pārbaudei pakļautās četras materiāla zonas:**

1. zona – paralēli šūnveida materiāla kārtām, pa vidu starp divām līmes šuvēm; 2. zona – līmes šuve; 3. zona – perpendikulāri materiāla bloka plaknei; 4. zona – līmes šuvi orientējot 90° leņķī attiecībā pret bīdes plakni.

Visās pārbaudēs izmantoti paraugi ar bīdes laukumu 50×50 mm un garumu 112 mm.

Salīmējāmība ar citiem koksnes materiāliem

Jaunu koksnes kompozītmateriālu un izstrādājumu veidošanai veikts pētījums par līmēto savienojumu stiprību starp KŠM un citiem koksnes materiāliem. Pētījumā izmantota poliuretāna (PUR) līme *Kleiberit 501* un emulsipolimērizocianāta (EPI) līme *Kleiberit 304.4*, kā arī seši dažādi koksnes materiāli: osis (Os), priede (P), bērza saplāksnis (PW), termomehāniski modificēts baltalksnis (TMMBa), orientēto kokskaidu plātne (OSB) un augsta blīvuma kokšķiedru plātne (HDF). Saskaņā ar standarta LVS EN 319 metodiku pārbaudītas 12 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 158 gab. Paraugu nominālie izmēri ir 50×50 mm, savukārt biezums ir 50 vai 58 mm. Paraugiem noteikti un vērtēti divi rādītāji – robežstiprība stiepē perpendikulāri pret plātņu plakni un sagrāves veids.

2.3. Koksnes šūnveida materiāla īpašību uzlabošanas un paneļu prototipu novērtēšanas metodes

Pētījumos noskaidrots, ka lielākā daļa KŠM īpašību ir ar zemākiem rādītājiem nekā plātņu materiāliem, masīvkoksnei un būvniecības paneļiem, tādēļ KŠM izmantošanai būvniecībā ir pētītas materiāla konstruktīvās uzlabošanas iespējas.

Siltuma caurlaidība

Izstrādātas piecas dažādas KŠM sienu paneļu konstrukcijas, kurām veikti teorētiski aprēķini siltuma caurlaidības koeficientu novērtēšanai saskaņā ar standarta LVS EN ISO 6946 metodiku.

Par pamatu pētījumam izmantoti divi paneļi – Nr. 1 un Nr. 2. Paneļa Nr. 1 gadījumā izmantots divu kārtu KŠM, savukārt otrā prototipa gadījumā – 4 kārtu KŠM ar lameļu biezumu 28 mm. Visiem pieciem paneļu prototipiem aprēķini veikti

KŠM paralēlā virzienā, abpusēji nosedzot ar 18 mm biezu priedes masīvkoksnes kārtu.

Aprēķināts minimāli nepieciešamais KŠM biezums panelī, kas izpilda būvnormatīva prasības attiecībā uz siltumcaurlaidības koeficientu, kā rezultātā iegūts paneļa prototips Nr. 3 ar KŠM biezumu 280 mm, kas abpusēji nosepts ar 18 mm biežām priedes koksnes kārtām.

Turpmākajos aprēķinos iegūti optimāli risinājumi 1. un 2. paneļu prototipu siltināšanai attiecīgi ar 112 un 92 mm biezu minerālvati, iegūstot būvnormatīvam LBN 002–01 atbilstošas sienas konstrukcijas siltumcaurlaidības koeficientu vērtības. Iegūtie rādītāji salīdzināti ar CLT un SIP paneļu siltuma caurlaidības koeficientiem un būvnormatīva prasībām.

Skaņas izolēšana

Izstrādāti divi durvju vērtņu (1. un 2.) konstruktīvie risinājumi un trīs (3. līdz 5.) sienu paneļu konstruktīvie risinājumi, kuriem veikta lielizmēra paraugu izgatavošana un skaņas gaisā izolācijas indeksu novērtēšana saskaņā ar standartu LVS EN ISO 140–3, LVS EN ISO 140–1, LVS EN ISO 717–1 un LVS EN ISO 10140–(1–5) metodiku.

Durvju vērtnes paraugi izgatavoti no KŠM perpendikulārā virzienā, abpusēji aplīmējot ar 4 mm biezu augsta blīvuma kokšķiedru plātņi, iegūstot paraugus ar kopējo biezumu 25 un 60 mm. Abos gadījumos durvju vērtņu augstums ir 1972 mm un platums 825 mm.

Trīs sienu paneļu prototipi izgatavoti no KŠM paralēlā virzienā, izmantojot KŠM ar dažādu lamelņu skaitu un biezumu (3. prototips izgatavots no četrām lamelēm ar kopējo biezumu 112 mm, 4. prototips – no 2 lamelēm ar biezumu 56 mm, savukārt 5. prototips – no 4 lamelēm ar kopējo biezumu 72 mm). Visi sienas prototipi abpusēji aplīmēti ar 18 mm biežām priedes masīvkoksnes lamelēm. Sienu paneļu prototipu augstums ir 3000 mm, bet platums – 1150 mm. Katram prototipam izgatavots un pārbaudīts viens lielizmēra paraugs.

Pētījuma rezultātā novērtēta durvju paneļu biezuma un sienu paneļu konstruktīvā risinājuma ietekme uz skaņas gaisā izolācijas indeksu. Iegūtie rādītāji ir uzskatāmi par indikatīviem, tie salīdzināti ar CLT paneļu skaņas izolācijas indeksu vērtībām un būvnormatīva LBN 016–11 reglamentētajām durvju un sienu konstrukciju skaņas gaisā izolācijas indeksu robežvērtībām.

Ugunsreakcija

Ar mērķi noteikt KŠM ugunsreakcijas rādītāju uzlabošanas iespējas, īstenojot konstruktīvus paņēmienus, ir izgatavoti un pārbaudīti trīs KŠM lielizmēra prototipi. Divi prototipi veidoti, 17 un 52 mm biezu KŠM perpendikulārā virzienā aplīmējot ar termiski plānu (4 mm), augsta blīvuma kokšķiedru plātņi, attiecīgi apzīmējums 90H25 un 90H60. Tie paredzēti izmantošanai kā vieglas konstrukcijas norobežojošās starpsienas vai durvju vērtnes. Prototipu biezums ir attiecīgi 25 un 60 mm. Savukārt trešajam prototipam 56 mm biezs KŠM paralēlā virzienā ir aplīmēts ar 18 mm biezu priedes masīvkoksni (apzīmējums 0P92) izmantošanai nesošās sienu un pārsegumu paneļu konstrukcijās, iegūstot paneli ar kopējo biezumu 92 mm.

Visu trīs paneļu prototipu ugunsreakcijas pārbaudes veiktas, izmantojot D ugunsreakcijas klasei atbilstošo standarta LVS EN 13823 vienotās dedzināšanas iekārtas (SBI) pārbaudes metodi. Kopumā 3 prototipiem pārbaudīti 5 lielizmēra paraugi. Iegūtie rādītāji uzskatāmi par indikatīviem.

Pētījuma rezultātā novērtēta termiski plāna un termiski bieža paneļa ārējo kārtu materiāla ietekme uz potenciālu būvniecības paneļu ugunsreakcijas parametriem. Iegūtie rādītāji salīdzināti ar masīvkoksnes un koksnes plātņu materiālu ugunsreakcijas parametriem.

Mehāniskās īpašības

Lai noteiktu KŠM uzlabošanas iespējas ar konstruktīvajiem paņēmieniem, ir izstrādāti seši pārsegumu paneļu prototipi (apzīmējums pētījumā no A līdz F). Tāpat ir novērtēta ārējo kārtu materiāla, KŠM virziena un ielīmēto *ribu* ietekme uz 4 svarīgākajām materiāla mehāniskajām īpašībām – robežstiprību un elastības moduli četrpunktu statiskajā liecē, kā arī robežstiprību spiedē paralēli un perpendikulāri pret paneļu plakni. Pētījumā izmantotas standarta LVS EN 408+A1 pārbaudes metodes.

Paneļu pārsegumu prototipos A, B, E, F materiāls orientēts perpendikulārā virzienā, savukārt C un D – paralēlā virzienā. Paneļos A, C, E kā ārējo kārtu materiāls izmantots 12 mm biezs PW, paneļos B, D, F – 20 mm bieža priedes masīvkoksne. Papildus paneļos A un B ielīmētas priedes masīvkoksnes *ribas*. Analizētas 18 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 144 gab. Ar bērza saplāksni aplīmētu prototipu kopējais biezums ir 136 mm, savukārt priedes masīvkoksnes gadījumā tas veido 152 mm. Paraugu platums un garums lieces pārbaudes gadījumā ir attiecīgi 300 un 2500 mm. Spiedes pārbaudes gadījumā tas veido 300×300 mm.

Paneļu orientācija spiedes pārbaudes iekārtā parādīta 2.5. att.



1



2

2.5. att. **Paneļu orientācija spiedes pārbaudes iekārtā:**

1 – perpendikulāri pret paneļa plakni; 2 – paralēli pret paneļa plakni.

Iegūtie stiprības un elastības rādītāji salīdzināti ar līmēto konstrukciju kokmateriālu, CLT un zāģmateriālu stiprības klašu mehāniskajiem rādītājiem.

3. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBAS

3.1. Mitrums

Mitrums ir viens no nozīmīgākajiem koksnes un koksnes materiālu īpašību ietekmējošajiem parametriem. Ņemot vērā to, ka KŠM pēc masas sastāv aptuveni no 96% koksnes un 4% līmes, materiālam prognozēja tādu pašu līdzsvara mitrumu kā koksnei, no kuras KŠM izgatavo.

Pēc priedes KŠM kondicionēšanas standarta atmosfērā pie 20 ± 2 °C temperatūras un relatīvā gaisa mitruma $65 \pm 5\%$ iegūts 60 KŠM paraugu vidējais mitrums 12.5% (robežās no 11.9 līdz 13.6%). Priedes KŠM vidējais līdzsvara mitrums 12.5% pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā būtiski neatšķiras no standartā DIN 68100–07 norādītās priedes masīvkoksnes vidējā mitruma 12.0 % ($p > 0.05$).

Pēc kondicionēšanas pie relatīvā gaisa mitruma 35 vai 85% (pie gaisa temperatūras 20 °C) iegūtas KŠM vidējās mitruma vērtības 5.9 un 16.9%.

Starp KŠM mitrumu un gaisa relatīvo mitrumu pie gaisa temperatūras 20 ± 2 °C pastāv cieša ($r = 1.00$) pozitīva otrās pakāpes polinomiālā sakarība:

$$W = 0.00114RH^2 + 0.0838RH + 1.61, \quad (3.1.)$$

kur W – KŠM mitrums, %;
 RH – gaisa relatīvais mitrums, %.

Šī sakarībā ir izmantojama gaisa relatīvā mitruma robežās no 30 līdz 85%.

Pētījumā noskaidrots, ka KŠM mitrums pie trīs relatīvā mitruma līmeņiem būtiski neatšķiras no priedes masīvkoksnes mitruma, tādēļ koksnes līdzsvara mitruma diagramma ir izmantojama arī KŠM mitruma prognozēšanai atkarībā no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras.

3.2. Blīvums

Materiālu blīvumam tāpat kā mitrumam bieži ir tieša ietekme uz koksnes un koksnes materiālu fizikāli mehāniskajiem un fizikāli ķīmiskajiem rādītājiem, tādēļ veikta KŠM blīvuma rādītāju noteikšana. 60 kubveida KŠM paraugiem pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā noteikta vidējā blīvuma vērtība 308 kg m^{-3} (robežās no 277 līdz 332 kg m^{-3}).

Pēc kondicionēšanas pie relatīvā gaisa mitruma 35 vai 85% (pie gaisa temperatūras 20 °C) iegūtas KŠM vidējās blīvuma vērtības 293 un 321 kg m^{-3} .

Pētījuma rezultātā iegūta vidēji cieša ($r = 0.53$) pozitīva lineāra sakarība 3.2.

KŠM blīvuma aprēķināšanai atkarībā no KŠM mitruma:

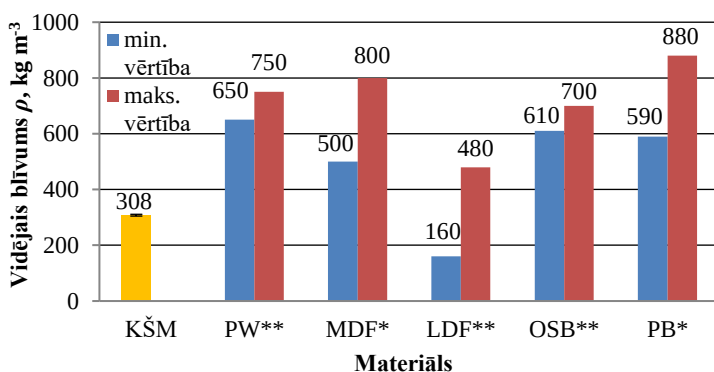
$$\rho = 2.55W + 277.9, \quad (3.2.)$$

kur ρ – KŠM blīvums, kg m^{-3} ;
 W – KŠM mitrums, %.

Norādītā sakarība ir izmantojama no 28 mm biezām lamelēm izgatavota KŠM blīvuma aprēķināšanai materiāla mitruma robežās no 6 līdz 17%.

Saskaņā ar standartu LVS EN 14358 ir aprēķināta blīvuma zemākā 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība ρ_k 285 kg m^{-3} . Papildus noskaidrots, ka KŠM lameļu biezuma palielināšana no 18 līdz 28 mm būtiski ($p < 0.05$) samazina materiāla blīvumu, jo lamelēs iestrādāto rievu tilpums attiecībā pret koksnes tilpumu pieaug.

KŠM vidējais blīvums 308 kg m^{-3} ir par 38% zemāks, salīdzinot ar literatūrā (Wagenführ, 1996) atspoguļoto priedes masīvkoksnes vidējo blīvuma vērtību 510 kg m^{-3} . Salīdzinot ar būvniecībā plaši izmantoto koksnes plātņu materiālu (PW, OSB, PB un vidēja MDF) blīvumu, KŠM blīvums ir par 35 līdz 65% zemāks, skat. 3.1. att.



3.1. att. KŠM un koksnes plātņu materiālu vidējo blīvuma rādītāju salīdzinājums:

saīsinājumu skaidrojumu skatīt 6. lpp (*Bowyer u.c., 2003; **Lūsiņa u.c., 2007).

Vienīgi zema blīvuma kokšķiedru plātņu blīvums var būt līdz pat 52% zemāks, salīdzinot ar KŠM blīvumu. KŠM blīvuma vērtības var izmantot KŠM un tā būvniecības paneļu masas aprēķināšanai.

3.3. Rukšana un briešana

Gaisa relatīvā mitruma izmaiņas robežās no 30 līdz 85% un ar tām saistītās koksnes mitruma izmaiņas robežās no 6 līdz 18% ietekmē šūnveida materiāla izmēru izmaiņas. Palielinoties vai samazinoties KŠM mitrumam, lineāri palielinās vai samazinās šūnveida materiāla izmēri. Piemēram, mitruma ietekmi uz KŠM biezuma izmaiņām var aprakstīt ar šādu ciešu ($r = 1.00$) pozitīvu sakarību:

$$b = 0.752W + 291, \quad (3.3.)$$

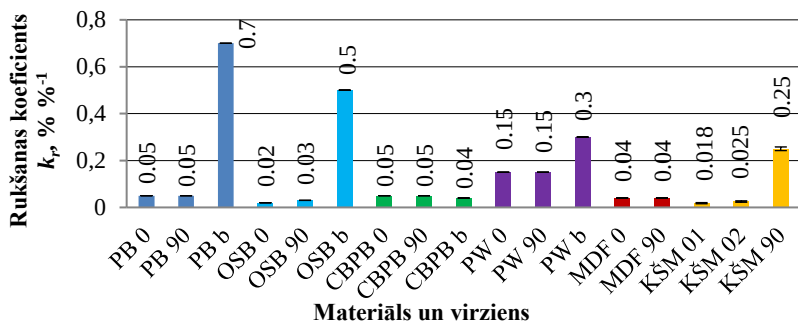
kur b – biezumu, mm;
 W – mitrums, %.

Sakarība izmantojama vienīgi paraugiem ar garumu 300 mm un šķērsriezuma izmēriem 50 mm.

Aprēķinātais vidējais šūnveida materiāla rukšanas koeficients pa materiāla biezumu ir $0.248 \% \%^{-1}$, savukārt briešanas koeficients ir $0.255 \% \%^{-1}$. Priedes KŠM biezumu izmaiņas var salīdzināt ar priedes masīvkoksnes radiālā un tangenciālā rukšanas koeficienta vidējo vērtību $0.22 \% \cdot \%^{-1}$ (Rijsdijk u.c., 1994). Nelielā koeficientu atšķirība skaidrojama ar lielāku tangenciālo dēļu klātbūtni pa šūnveida materiāla biezumu nekā radiālo.

KŠM izmēru izmaiņas materiāla platumā un garumā ir aptuveni desmit reizes mazākas, salīdzinot ar materiāla izmaiņām materiāla biezumā. Aprēķinātais šūnveida materiāla rukšanas koeficients materiāla garumā ir $0.0182 \% \cdot \%^{-1}$, savukārt briešanas – $0.0183 \% \cdot \%^{-1}$. Atbilstošie koeficienti materiāla platumā: rukšanas koeficients $0.0245 \% \cdot \%^{-1}$ un briešanas – $0.0246 \% \cdot \%^{-1}$. Praktiskiem aprēķiniem materiāla garumā un platumā rekomendējams lietot vidējo garuma un platuma rukšanas un briešanas koeficientu $0.021 \% \cdot \%^{-1}$.

KŠM rukšanas koeficientu salīdzinājums ar būvniecībā plaši izmantotajiem plātņu materiālu rukšanas koeficientiem parādīts 3.2. attēlā. Kā redzams attēlā, KŠM rukšanas koeficienti materiāla garumā $0.018 \% \cdot \%^{-1}$ un platumā $0.025 \% \cdot \%^{-1}$ ir zemāki, salīdzinot ar lielāko daļu plātņu materiālu rukšanas koeficientiem plātņu garenvirzienā un šķērsvirzienā. Līdzīgus rādītājus atspoguļo vienīgi cementa kokšķiedru plātnes. Salīdzinot iegūto KŠM rukšanas koeficientu materiāla biezumā $0.25 \% \cdot \%^{-1}$, tas ir zemāks nekā tādiem plātņu materiāliem kā saplāksnim, kokskaidu plātnēm un orientēto kokskaidu plātnēm biezumā. Aptuveni sešas reizes zemāks rukšanas koeficients ir norādīts cementa kokskaidu plātnēm, rūkot biezumā.



3.2. att. Koksnes šūnveida materiāla un plātņu materiālu rukšanas koeficientu salīdzinājums (LVS CEN/TS 12872:2007):

saīsinājumu skaidrojumu skatīt 6. lpp.

Noteiktais KŠM tilpuma rukšanas koeficients 0.275 % %⁻¹ ir par 36% mazāks nekā rukšanas koeficients 0.42 % %⁻¹ (Wagenführ, 1996) priedes masīvkoksnei.

3.4. Ūdens tvaika caurlaidība

KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi apkopoti 3.1. tabulā. Pārbaudei pakļauti sešu dažādu veidu (kārtu skaita – 2 vai 4, biezuma 18, 25 vai 28 mm un virziena saskaņā ar 3.1.tabulu) KŠM paraugi. Katram KŠM veidam ir pārbaudīti paraugi gan paralēlā, gan perpendikulārā virzienā.

3.1. tabula

KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumu vidējās vērtības

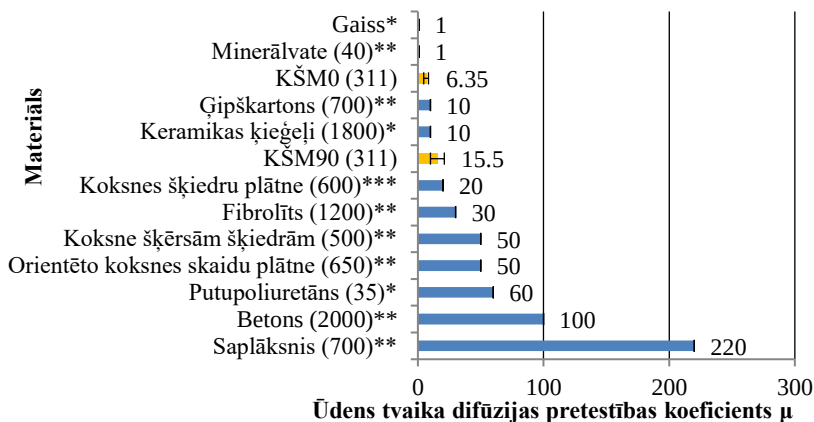
Paraugu veids	Paralēlā virzienā		Perpendikulārā virzienā	
	Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ	Ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalents gaisa slāņa biezums S_d , m	Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ	Ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalents gaisa slāņa biezums S_d , m
2–25	14.4 (SD 2.10)	0.697 (SD 0.102)	5.44 (SD 0.617)	0.280 (SD 0.033)
4–18	21.1 (SD 6.07)	1.53 (SD 0.441)	4.31 (SD 0.255)	0.311 (SD 0.019)
4–28	15.5 (SD 2.20)	1.71 (SD 0.240)	6.53 (SD 0.762)	0.734 (SD 0.084)

Kā redzams 3.1. tabulā, materiālu pārbaudot paralēlā virzienā, zemākā ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējā vērtība (μ) 14.4 iegūta, KŠM paraugus izgatavojot no divām 25 mm biežām lamelēm ar kopējo KŠM biezumu 50 mm. Augstākā μ vērtība 21.1 iegūta KŠM, kas izgatavots no četrām 18 mm biežām

lamelēm, kuras veido KŠM ar nominālo biezumu 72 mm. KŠM, kas veidots no četrām 28 mm biežām lamelēm ar kopējo nominālo materiāla biezumu 112 mm raksturo ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējā vērtība 15.5. Salīdzinot trīs paraugu veidu vidējo μ vērtību ticamības intervālus, varam pieņemt, ka iegūtie rādītāji visiem trīs paraugu veidiem būtiski neatšķiras un konstrukciju kritiskā virsmas mitruma un iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai var izmantot visu deviņu paraugu vidējo μ vērtību 17.0.

KŠM konstruktīvajam risinājumam (ar vai bez gaisa spraugas iedarbei pakļautajās ārējās vai iekšējās materiāla virsmās) ir nozīmīga ietekme uz ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem. Četru kārtu KŠM kārtu biezumam robežās no 18 līdz 28 mm nekonstatēja būtisku ietekmi uz difūzijas pretestības koeficienta vidējo vērtību. Salīdzinot ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalentā gaisa slāņa biezumu S_d divu kārtu KŠM (biezums 50 mm) ar četru kārtu KŠM (biezums 112 mm), S_d vērtība pieaug 2.5 reizes – no 0.697 līdz 1.71 m. Būtisko atšķirību var pamatot ar vidējās S_d vērtības ticamības intervālu nepārklāšanos.

Kā redzams 4.1. tabulā, materiālu pārbaudot perpendikulārā virzienā, zemākā ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējā vērtība μ 4.31 ir iegūta KŠM paraugiem ar biezumu 72 mm, kuru izgatavošanā izmantotas 18 mm biezas lameles. Augstākā vidējā μ vērtība 6.53 ir iegūta KŠM ar faktisko biezumu 112 mm, kas izgatavots no četrām 28 mm biežām lamelēm. Visu trīs paraugu veidu vidējo μ un S_d vērtību ticamības intervāli pārklājas, tādējādi var pieņemt, ka iegūtie rādītāji visiem trīs paraugu veidiem būtiski neatšķiras un konstrukciju kritiskā virsmas mitruma un iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai var izmantot visu deviņu paraugu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējo vērtību 5.42, savukārt materiāla raksturošanai var izmantot vidējo ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalentā gaisa slāņa biezumu 0.448 m. KŠM, kas izgatavots no 28 mm biežām lamelēm, ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu salīdzinājums ar būvniecībā plaši izmantotu materiālu μ vērtībām parādīts 3.3. att. Kā redzams šajā attēlā, KŠM ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vērtība ir 2.4 reizes zemāka materiāla perpendikulārā virzienā nekā paralēlā virzienā. Neskatoties uz caurejošajiem gaisa kanāliem KŠM perpendikulārā virzienā, materiālam ir būtiski augstāki ūdens tvaika pārvades raksturlielumi nekā nekustīgam gaisa slānim. Attiecīgi literatūrā norādītā nekustīga gaisa slāņa μ vērtība ir 1 – tāpat kā minerālvatei. KŠM paralēlā virziena μ vērtība 15.5 ir par 23% zemāka nekā MDF μ vērtība 20. Salīdzinot ar masīvkoksnes ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vērtību šķērsām šķiedrām, KŠM paralēlā virziena μ vērtība ir 3.2 reizes zemāka, bet perpendikulārā virziena vērtība attiecīgi 7.7 reizes zemāka. Fibrolītam, orientēto kokskaidu plātnēm, putupoliuretānam un saplāksnim μ vērtība ir no 1.9 līdz 14.2 reizēm augstāka nekā KŠM paralēlā virzienā, kā arī no 4.6 līdz 33.7 reizēm augstāka nekā KŠM perpendikulārā virzienā.



3.3. att. KŠM un citu būvniecības materiālu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu salīdzinājums:

iekavās norādīts materiāla blīvums kg m⁻³. (Borodiņecs un Krēšlīšs, 2007*; LVS EN ISO 10456**; LVS EN 13986***).

Iegūtie KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi ir izmantojami no KŠM izgatavotu konstrukciju iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai. Rādītāji ļauj siltumtehnikai pareizi veidot materiālu izvietojumu konstrukcijās, materiālus ar mazāku ūdens tvaika caurlaidību novietojot konstrukcijas siltajā pusē, savukārt ar lielāku ūdens tvaika caurlaidību – konstrukcijas aukstajā pusē.

3.5. Siltumvadītspēja

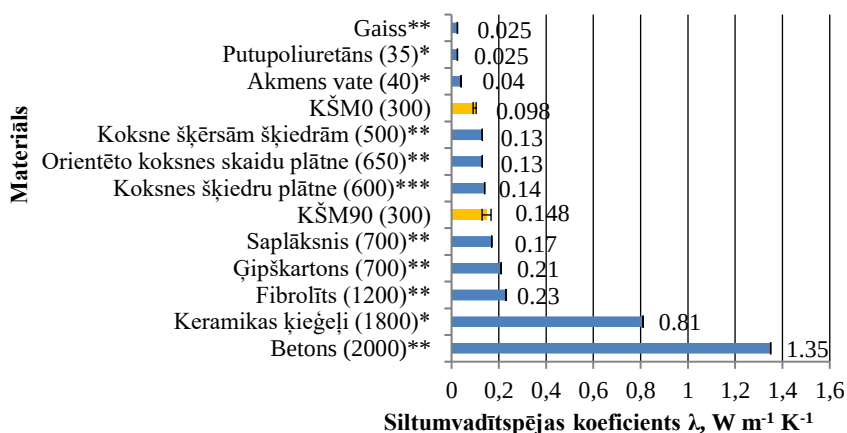
KŠM paralēlā virzienā raksturo siltumvadītspējas koeficients λ 0.0977 W m⁻¹ K⁻¹ (SD 7.07·10⁻⁴; VAR 0.729), savukārt materiāla perpendikulārā virzienā 0.148 W m⁻¹ K⁻¹ (SD 21.2·10⁻⁴; VAR 1.43). KŠM siltumvadītspējas koeficients paralēlā virzienā ir par 34% zemāks nekā KŠM perpendikulārā virzienā. Tas izskaidrojams ar augstāku koksnes siltumvadītspēju šķiedru virzienā nekā šķērsām šķiedrām. Vērtējot KŠM termiskās īpašības, var apgalvot, ka KŠM paralēlā virzienā no siltumtehnikā viedokļa ir efektīvāks būvkonstrukciju izgatavošanai, salīdzinot ar materiālu perpendikulārā virzienā.

KŠM siltumvadītspējas koeficients paralēlā virzienā ir par 25% zemāks nekā masīvai priedes koksnei šķērsām šķiedrām, savukārt perpendikulārā virzienā par 14% augstāks nekā priedes masīvkoksnei šķērsām šķiedrām 0.13 W m⁻¹ K⁻¹ (LVS EN ISO 10456).

KŠM siltumvadītspēja paralēlā virzienā ir zemāka nekā lielākajai daļai būvniecībā izmantotajiem koksnes plātņu materiāliem, kuru blīvums pārsniedz

500 kg m⁻³. Perpendikulārā virzienā siltumvadītspēja ir salīdzināma ar masīvkoksnes siltumvadītspēju šķērsām šķiedrām, orientēto kokskaudu plātņu un kokšķiedru plātņu siltumvadītspējas koeficientiem, skat. 3.4. att.

KŠM virziens būtiski ietekmē λ . Tas izskaidrojams ar ievērojami augstāku koksnes siltumvadītspēju šķiedru virzienā nekā šķērsām šķiedrām. Piemēram, egles koksnei šķērsām šķiedrām raksturīgs λ 0.11 W m⁻¹ K⁻¹, bet šķiedru virzienā tas ir uz pusi lielāks – attiecīgi 0.22 W m⁻¹ K⁻¹ (Niemz, 1993). KŠM paralēlā virzienā nodrošina 1.3 līdz 2.3 reizes zemāku λ nekā būvniecībā plaši izmantotajiem plātņu materiāliem un koksnei šķērsām šķiedrām, savukārt iegūtais rādītājs ir 2.5 līdz 4 reizes augstāks, salīdzinot ar akmens vates un putupoliuretāna λ . KŠM perpendikulārā virzienā noteiktais siltumvadītspējas koeficients ir salīdzināms ar kokšķiedru plātņu un saplākšņu λ , tajā pašā laikā tas ir par 13% augstāks nekā masīvkoksnes un kokšķiedru plātnes λ . Salīdzinot ar akmens vates un putupoliuretāna λ , KŠM rādītājs ir 3.8 līdz 6 reizes augstāks.



3.4. att. **KŠM un citu būvniecības materiālu siltumvadītspējas koeficientu salīdzinājums:**

iekavās norādīts materiāla blīvums kg m⁻³ (Borodīņecs un Krēsliņš, 2007*; LVS EN ISO 10456**, LVS EN 13986***).

Pamatojoties uz iegūtajiem siltumvadītspējas rādītājiem, iespējams secināt, ka KŠM paralēlā virzienā var tikt klasificēts kā siltumizolācijas materiāls ar augstu siltumvadītspējas koeficientu, jo tā λ 0.0975 W m⁻¹ K⁻¹ < 0.1 W m⁻¹ K⁻¹. KŠM perpendikulārā virzienā par 48% pārsniedz λ robežvērtību 0.1 W m⁻¹ K⁻¹, kā rezultātā tas nav klasificējams kā siltumizolācijas materiāls saskaņā ar standartu DIN 4108–2. Iegūtās λ vērtības ir izmantojamas dažādu KŠM konstrukciju siltumtehnikajos aprēķinos.

3.6. Ugunsreakcija

Vienotās dedzināšanas iekārtā (SBI) pārbaudīti četri lielizmēra KŠM paraugi – trīs materiāla paralēlajā virzienā un viens (parauga degšanas jauda pārsniedz iekārtā pieļaujamo) paraugs materiāla perpendikulārajā virzienā.

KŠM perpendikulārā virziena parauga pārbaude SBI iekārtā pārtraukta 381 s pēc testa sākuma, paraugam sasniedzot SBI iekārtā maksimāli atļauto degšanas jaudu 350 kW. Pārbaudes laikā iegūtais ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA) ir 1426 W s^{-1} , savukārt kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā ($\text{THR}_{600\text{s}}$) 108 MJ. Iegūtā vērtība par 90% pārsniedz D ugunsreakcijas klases FIGRA 750 W s^{-1} . Iegūtā FIGRA vērtība, KŠM pārbaudot perpendikulārā virzienā, neļauj to klasificēt D ugunsreakcijas klasē. Materiāla klasifikācija D ugunsreakcijas klasē paredz to papildus pārbaudīt ar atsevišķa liesmas avota pārbaudes metodi. Arī šīs pārbaudes rezultātā konstatēts, ka perpendikulārā virziena KŠM paraugi neiztur D ugunsreakcijas klases materiāliem izvirzītās prasības. Materiālam prognozē E ugunsreakcijas klasi.

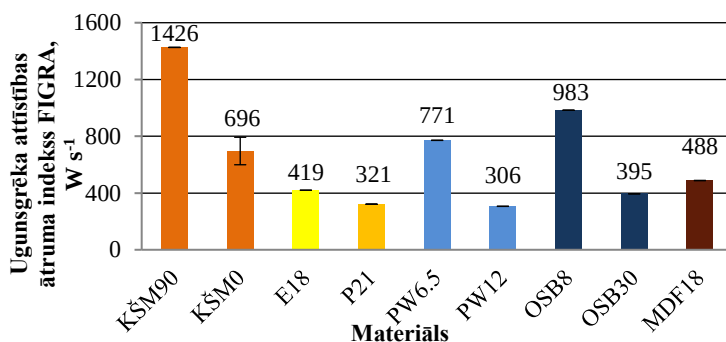
KŠM pārbaudes rezultātā SBI iekārtā, materiālu pārbaudot paralēlā virzienā, ir iegūti šādi rezultāti: FIGRA vidējā vērtība 696 W s^{-1} ($SD 39.0$; $VAR 6\%$) un $\text{THR}_{600\text{s}}$ 58 MJ ($SD 7.81$; $VAR 13\%$). FIGRA vidējā vērtība ir par 7% zemāka par D ugunsreakcijas klasei pieļaujamo robežvērtību 750 W s^{-1} . KŠM paralēlā virziena FIGRA vērtība par 117% pārsniedz literatūrā minēto priedes koksnes FIGRA 321 W s^{-1} (Mayes and Oksanen, 2003). Neskatoties uz to, ka uguns iedarbībai pakļautais laukums KŠM ir lielāks nekā masīvkoksnes gadījumā, SBI iekārtā noteiktās FIGRA vidējās vērtības un atsevišķa liesmas avota pārbaudes rezultātiem ļauj materiālu klasificēt D ugunsreakcijas klasē.

Materiāla perpendikulārā virzienā ir konstatēta par 105% augstāka degšanas jauda nekā paralēlā virzienā. Tas ir saistīts ne tikai ar lielāku uguns iedarbībai pakļauto materiāla laukumu, materiāla perpendikulārajam virzienam, bet arī ar papildu skābekļa pieplūdi pa materiāla kanāliem no parauga aizmugurējās daļas.

KŠM abu virzienu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu salīdzinājums ar literatūrā norādītajiem masīvkoksnes un plātņu materiālu rādītājiem atspoguļots 3.5. attēlā. KŠM virzienam un plātņu materiāla biezumam ir nozīmīga ietekme uz ugunsreakcijas parametriem. Materiāla biezumam samazinoties, ugunsreakcijas parametri vienam un tam pašam materiālam palielinās. KŠM perpendikulārajā virzienā noteiktā FIGRA vērtība 1426 W s^{-1} ir par 45 līdz 366% augstāka nekā priedes, egles koksnei un plaši būvniecībā izmantotajiem plātņu materiāliem. Tas izskaidrojams ar konstruktīvi veidotiem kanāliem materiāla biezumā, kuri palielina degšanas laukumu un skābekļa piegādi degšanas zonā.

Paralēlā virzienā noteiktais KŠM ugunsgrēka attīstības ātruma indekss 696 W s^{-1} ir 43 līdz 127% augstāks par termiski biezu koksnes materiālu (biezums > 10 mm) FIGRA vērtību. Savukārt tas ir par 10 līdz 29% zemāks, salīdzinot ar termiski plānu

bērza saplāksni un orientēto kokskaidu plātni. To var izskaidrot ar materiāla degšanas līdzību (caurdegšanu) termiski plāniem materiāliem un KŠM.



3.5. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa FIGRA salīdzinājums KŠM, masīvkoksnei un plātņu materiāliem:

saīsinājumu skaidrojumu skatīt 6. lpp. Skaitlis aiz saīsinājuma – plātņu materiāla biezums, mm.

Nemot vērā lielo atšķirību starp KŠM un termiski biezu materiālu ugunsreakcijas parametriem, būvniecības vajadzībām rekomendējama materiāla ugunsreakcijas īpašību uzlabošana ar konstruktīvajiem paņēmieniem.

3.7. Mehāniskās īpašības

KŠM mehānisko īpašību vidējās vērtības ar to 5% kvantiļa raksturlielumu vērtībām apkopotas 3.6. un 3.7. attēlā.

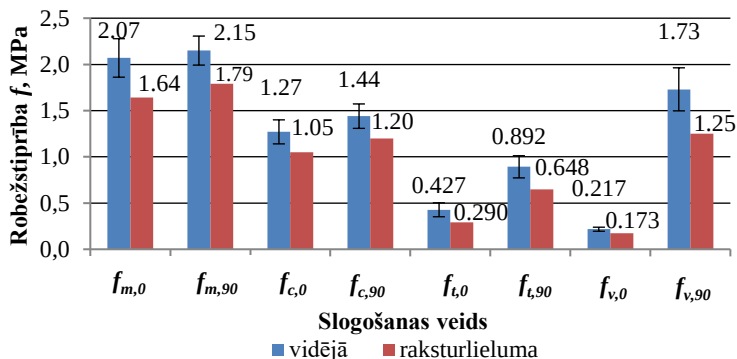
KŠM mehāniskās īpašības ir atkarīgas no materiāla virziena. Perpendikulārā virzienā materiāls uzrāda augstākus stiprības rādītājus, bet zemākus elastības moduļu rādītājus, salīdzinot ar materiāla paralēlo virzienu.

Analizējot KŠM stiprības rādītājus, varam redzēt, ka tie ir robežās no 0.217 MPa (robežstiprība bīdē paralēlā virzienā) līdz 2.15 MPa (robežstiprība liecē perpendikulārā virzienā), skat. 3.6. att.

KŠM abu virzienu robežstiprība liecē būtiski neatšķiras ($p > 0.05$) un ir robežās no 2.07 līdz 2.15 MPa. Inženiertehniskajiem aprēķiniem var izmantot zemāko 5% kvantiļa raksturlieluma vērtību 1.64 MPa. KŠM paralēlā virzienā uzrādījis būtiski zemākus ($p < 0.05$) vidējos robežstiprības rādītājus spiedē, stiepē un bīdē, salīdzinot ar materiāla perpendikulāro virzienu.

Vidējā robežstiprība spiedē 1.44 MPa un stiepē 0.892 MPa materiāla perpendikulārajā virzienā ir būtiski ($p < 0.05$) augstāka nekā attiecīgie rādītāji 1.27 un 0.427 MPa materiāla paralēlajā virzienā. Abu materiāla virzienu robežstiprības

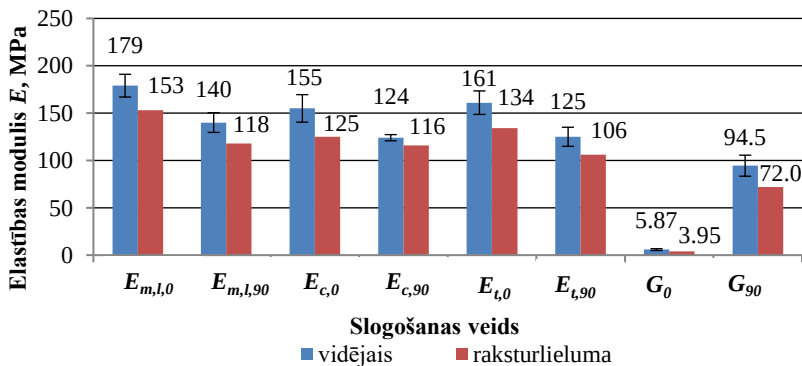
rādītāji stiepē ir būtiski ($p < 0.05$) zemāki nekā rādītāji spiedē. KŠM paralēlā virziena robežstiprība bīdē 0.217 MPa un elastības modulis bīdē 5.87 MPa ir zemākie KŠM mehāniskie rādītāji. Perpendikulārā virzienā robežstiprība un elastības modulis bīdē ir 8 līdz 16 reizes augstāks, attiecīgi 1.73 un 94.5 MPa.



3.6. att. KŠM robežstiprības vidējie rādītāji un raksturlieluma vērtības: saīsinājumu skaidrojumu skatīt 6. lpp.

Robežstiprības raksturlielumu rādītāju vērtības (spiedē, stiepē un bīdē) projektēšanas vajadzībām jāizvēlas katram KŠM virzienam un materiāla slogošanas veidam atsevišķi.

Analizējot KŠM elastības rādītājus, varam secināt, ka tie ir robežās no 5.87 MPa (bīdes elastības modulis paralēlā virzienā) līdz 179 MPa (lokālais elastības modulis liecē, materiālu slogojot paralēlā virzienā), skat. 3.7. att.



3.7. att. KŠM elastības moduļu vidējie rādītāji un raksturlielumu vērtības: saīsinājumu skaidrojumu skatīt 6. lpp.

Materiāla vidējais elastības modulis liecē, pārbaudot paralēlā virzienā, ir 179 MPa, bet perpendikulārā virzienā tas ir zemāks – 140 MPa. Attiecīgās raksturlielumu vērtības ir 153 un 118 MPa.

Elastības moduļi stiepē 161 MPa un spiedē 155 MPa ir augstāki nekā materiāla paralēlajā virzienā, attiecīgi 125 un 124 MPa. Elastības moduļa rādītāji spiedē un stiepē būtiski neatšķiras, apskatot abus KŠM virzienus atsevišķi.

Sloojot KŠM paralēlā virzienā liecē, spiedē un stiepē, novērotas būtiski augstākas elastības moduļu vērtības, savukārt, pārbaudot materiālu bīdē, būtiski augstāks elastības modulis ir materiāla perpendikulārā virzienā ($p < 0.05$). KŠM izstrādājumu projektēšanas vajadzībām katram KŠM virzienam un elastības īpašībai jāizvēlas 3.7. att. attēlā norādītā raksturlieluma vērtība.

Pētījumā iegūtie vidējie KŠM lieces, stiepes un spiedes elastības moduļi ir 2 līdz 3 reizes zemāki, salīdzinot ar stiprības klases C24 zāgmateriālu (LVS EN 338) vidējām elastības moduļu vērtībām materiāla perpendikulārā virzienā pret šķiedrām (370 MPa). Iegūtie KŠM vidējie bīdes elastības moduļu rādītāji ir 7 līdz pat 118 reizes zemāki, salīdzinot ar C24 stiprības klases zāgmateriālu vidējo elastības moduli bīdē šķiedru virzienā (690 MPa). KŠM un skujkoku zāgmateriālu mehānisko īpašību salīdzinājums atspoguļots 3.12. apakšnodaļas 3.2. tabulā.

3.8. Paraugu izmēru ietekme uz mehāniskajām īpašībām

Lai novērtētu KŠM paraugu ģeometrisko izmēru un šķērsgriezuma laukuma ietekmi uz materiāla mehāniskajām īpašībām, veikts plašs pētījums, pārbaudot materiālu paralēlā virzienā. Pētījums apliecina, ka materiāla ģeometriskajiem izmēriem un KŠM šķērsgriezuma laukumam atsevišķos gadījumos ir liela ietekme uz KŠM robežstiprības un elastības rādītājiem. Pētījumā iegūtās KŠM robežstiprības liecē $f_{m,0}$ vidējās vērtības ir robežās no 0.53 līdz 2.29 MPa, kas vidēji ir par 20 līdz 50 reizēm zemākas nekā priedes masīvkoksnei.

Paraugu platuma un biezuma mijiedarbības ietekmi uz KŠM robežstiprību liecē $f_{m,0}$ var aprakstīt ar lineāri ciešu ($r = 0.93$) pozitīvu sakarību:

$$f_{m,0} = 0.055 + 0.003p + 0.006b, \quad (3.4.)$$

kur p – parauga platums, mm;

b – parauga biezums, mm.

Savukārt lokālā elastības moduļa liecē $E_{m,1,0}$ vidējās vērtības ir robežās no 33.3 līdz 156 MPa, kas ir aptuveni 100 reizes zemākas, salīdzinot ar priedes masīvkoksni.

Lieces paraugu biezuma un platuma mijiedarbības ietekme uz KŠM elastības moduli liecē var aprakstīt ar lineāri ciešu ($r = 0.88$) pozitīvu sakarību:

$$E_{m,l,0} = -20.5 + 0.151p + 0.856b, \quad (3.5.)$$

kur b – parauga biezums, mm;
 p – parauga platums, mm.

Noskaidrots, ka, KŠM šķērsgriezuma laukumam palielinoties, būtiski pieaug materiāla robežstiprības rādītāji liecē.

Analoģiski ir iegūti rādītāji un sakarības, kas veidojas starp KŠM ģeometriskajiem izmēriem, šķērsgriezuma laukumu, robežstiprības, elastības rādītājiem spiedē un bīdē. Noteiktās KŠM robežstiprības spiedē $f_{c,0}$ vidējās vērtības, slogojot materiālu paralēlā virzienā, ir robežās no 1.11 līdz 1.69 MPa, savukārt elastības moduļa spiedē vidējās vērtības ir robežās no 155 līdz 222 MPa.

Eksperimentālā ceļā iegūtās KŠM paraugu robežstiprības bīdē $f_{v,0}$ vidējās vērtības ir robežās no 0.19 līdz 0.22 MPa, savukārt bīdes elastības moduļa G_0 vidējās vērtības ir robežās no 5.64 līdz 10.4 MPa. Analoģiski iepriekš apskatītajai metodikai analizēta paraugu ģeometrisko izmēru un šķērsgriezuma laukuma ietekme uz KŠM robežstiprības un elastības rādītājiem bīdē.

Kopumā pētījumā ir iegūtas 27 sakarības dažādu KŠM mehānisko īpašību prognozēšanai atkarībā no paraugu ģeometriskajiem izmēriem un šķērsgriezuma laukuma.

3.9. Skrūvju izraušanas pretestība

Skrūvju izraušanas pretestībai (F_{sk}) ieskrūvēšanas dziļuma robežās no 14 līdz 70 mm ir tendence pieaugt, gan KŠM orientējot paralēli, gan perpendikulāri pret skrūvju garenasi. Lielāks pieaugums vērojams skrūvēm, kuras iestrādātas, materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi.

Skrūvju SPEC17 ieskrūvēšanas dziļumam palielinoties no 14 līdz 70 mm, $F_{sk,90}$ pieaug būtiski ($p < 0.05$). Starp skrūvju ieskrūvēšanas dziļumu un skrūvju izraušanas pretestību, materiālu orientējot perpendikulārā virzienā, pastāv cieša ($r = 0.81$) pozitīvi lineāra sakarība:

$$F_{sk,90} = 34.3d_z + 559, \quad (3.6.)$$

kur $F_{sk,90}$ – skrūvju SPEC17 izraušanas pretestība no KŠM perpendikulārajā virzienā, N;
 d_z – skrūves SPEC17 ieskrūvēšanas dziļums, mm.

Palielinot skrūves ieskrūvēšanas dziļumu par 56 mm (no 14 līdz 70 mm), iespējams panākt aptuveni 3 reizes augstāku skrūvju izraušanas pretestību, šūnveida materiālu orientējot perpendikulāri. Pārreķinot skrūves izraušanas pretestību uz

1 mm, iegūts, ka, palielinoties skrūves ieskrūvēšanas dziļumam par 1 mm, $F_{sk,90}$ palielinās vidēji par 34 N.

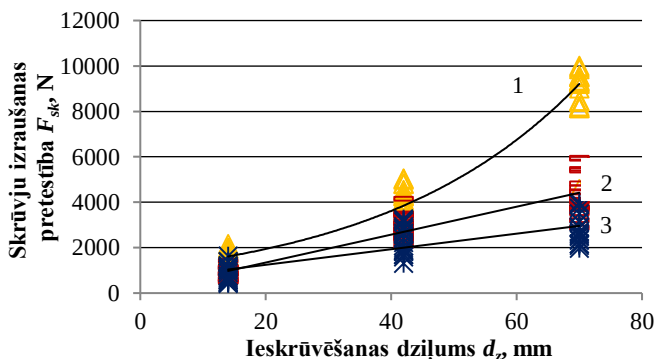
Arī KŠM paralēlā virzienā, ieskrūvēšanas dziļumam robežās no 14 līdz 70 mm ir būtiska ($p < 0.05$) ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību.

Starp skrūvju ieskrūvēšanas dziļumu un skrūvju izraušanas pretestību pastāv cieša ($r = 0.92$) lineāra sakarība:

$$F_{sk,0} = 61.5d_z + 115.6, \quad (3.7.)$$

kur $F_{sk,0}$ – skrūvju SPEC17 izraušanas pretestība no KŠM paralēlajā virzienā, N;
 d_z – skrūves SPEC17 ieskrūvēšanas dziļums, mm.

Palielinot skrūves ieskrūvēšanas dziļumu par 56 mm (no 14 līdz 70 mm), iespējams panākt aptuveni 5 reizes augstāku skrūvju izraušanas pretestību, orientējot KŠM paralēli pret skrūves garenasi. Ir aprēķināts, ka šajā gadījumā, skrūves ieskrūvēšanas dziļumam palielinoties par 1 mm, $F_{sk,0}$ paaugstinās vidēji par 61 N. Izmantojot skrūves SPEC17, pētījumam papildus izgatavoti un pārbaudīti arī priedes masīvkoksnes paraugi, nosakot skrūvju izraušanas pretestību šķērsām koksnes šķiedru virzienam. F_{sk} rādītāju salīdzinājums no KŠM un priedes masīvkoksnes parādīts 3.8. attēlā.



3.8. att. Skrūvju izraušanas pretestības rādītāju salīdzinājums no KŠM un priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām:

1 – no priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām; 2 – no KŠM0; 3 – no KŠM90.

Palielinoties skrūves ieskrūvēšanas dziļumam priedes masīvkoksnē, F_{sk} būtiski pieaug ($p < 0.05$). Pētījumā iegūta arī cieša ($r = 0.97$) pozitīva eksponenciāla sakarība $F_{sk,P,90}$ prognozēšanai no priedes masīvkoksnes atkarībā no skrūvju ieskrūvēšanas dziļuma.

Visu trīs ieskrūvēšanas dziļumu gadījumos F_{sk} rādītāji no priedes masīvkoksnes ir no 1.5 līdz 3.2 reizēm augstāki nekā F_{sk} rādītāji no KŠM. Atšķirība visos apskatītajos gadījumos ir vērtējama kā būtiska ($p < 0.05$).

Papildus apskatīta arī tādu parametru kā skrūves diametra un aizurbšanas paņemiena izmantošana skrūvju iestrādē, kā arī veikta skrūvju izraušanas pretestības raksturlielumu aprēķināšana.

Tādiem tehnoloģiskajiem parametriem kā skrūvju ieskrūvēšanas dziļums, ieskrūvēšanas virziens un ieskrūvēšanas vieta KŠM ir nozīmīga ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību no KŠM. Skrūvju diametra palielināšana un aizurbšanas paņemiena izmantošana skrūvju iestrādē būtiski paaugstina skrūvju izraušanas pretestības rādītājus no KŠM.

3.10. Līmētā plaknes savienojuma robežstiprība bīdē

KŠM līmētais plaknes savienojums (2. zona) nodrošina būtiski augstākus ($p < 0.05$) robežstiprības rādītājus bīdē (f_v) 0.649 MPa (SD 0.145; VAR 22%), salīdzinot ar KŠM konstruktīvo robežstiprību bīdē 0.382 MPa (SD 0.084; VAR 22%), kas noteikta paralēli KŠM kārtām, pa vidu starp divām līmes šuvēm (1. zona).

Gadījumos, kad f_v noteikta perpendikulāri šūnveida materiāla bloka plaknei (3. zona) un f_v noteikta, šūnveida materiāla līmes šuvi, orientējot 90° leņķī attiecībā pret bīdes plakni (4. zona), iegūtie vidējie f_v rādītāji ir būtiski augstāki ($p < 0.05$), attiecīgi 0.906 MPa (SD 0.123; VAR 14%) un 0.715 MPa (SD 0.118; VAR 17%), salīdzinot ar līmes šuves f_v rādītājiem bīdē.

Veiktās KŠM līmes šuves pārbaudes liecina, ka KŠM līmējuma mehāniskā izturība ir augstāka par KŠM konstruktīvo izturību atsevišķos tā virzienos un zonās. Tādējādi iespējams secināt, ka līmes šuves mehāniskā izturība ir pietiekama KŠM paneļu izgatavošanai. KŠM vidējie f_v rādītāji visos tā virzienos ir 4 līdz 10 reizes zemāki, salīdzinot ar līmēto konstrukciju kokmateriālu minimāli pieļaujamo plaknes savienojumu f_v 4 MPa – saskaņā ar standartu LVS EN 14080.

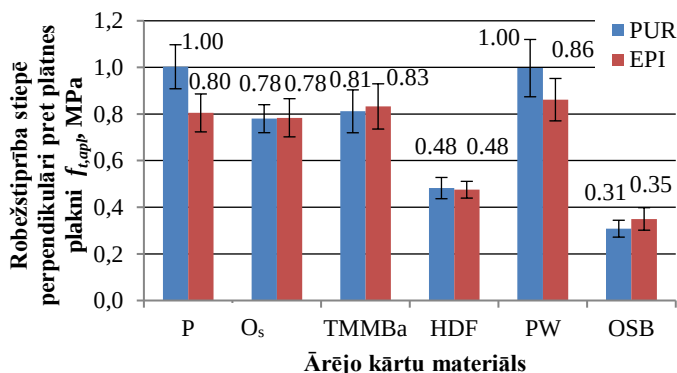
3.11. Salīmējamība ar citiem koksnes materiāliem

Pētījuma rezultātā 12 grupās ir pārbaudīti 158 trīs slāņu materiāla paraugi ar 11 līdz 15 paraugiem vienā grupā.

Stiepes robežstiprības perpendikulāri pret trīs slāņu plātņu materiālu plakni $f_{t,apl}$ vidējie rādītāji un vidējo rādītāju 95% ticamības intervāls paraugiem, līmētiem ar PUR un EPI līmi, atspoguļoti 3.9. attēlā.

Augstākos robežstiprības stiepē rādītājus, izmantojot PUR līmi Kleiberit 501, nodrošina šūnveida materiāls, kas aplīmēts ar priedes masīvkoksnes slāni vai bērza saplāksni. Vidējais robežstiprības stiepē rādītājs ir 1.0 MPa, un tas abām materiālu

grupām būtiski neatšķiras ($p > 0.05$). Aplīmējot šūnveida materiālu ar priedes (P) vai oša (Os) koksni un to sagraujot, sagrāve galvenokārt notiek pa līmes šuvi. Tas norāda uz to, ka pētījumā izmantotā līmēšanas tehnoloģija ar vidējiem līmes ražotāja rekomendētajiem līmēšanas tehnoloģiskajiem parametriem nav vērtējama kā optimāla šūnveida materiāla aplīmēšanai ar P un Os koksni. Poliuretāna līme Kleiberit 501, kuras līmēšanas tehnoloģiskie parametri ir šādi: līmes uzklājums 150 g m^{-2} , presēšanas spiediens 0.2 MPa , izturēšanas laiks zem spiediena 60 min. , ir piemērota šūnveida materiāla aplīmēšanai ar TMMBa, HDF, PW un OSB.



3.9. att. KŠM trīs kārtu plātņu materiālu vidējie robežstiprības rādītāji stiepē perpendikulāri pret plātņu plakni:

saīsinājumu skaidrojumu skatīt 6. lpp.

Augstākais trīs slāņu materiāla stiepes robežstiprības rādītājs perpendikulāri pret plātnes plakni ir paraugiem, līmētiem ar EPI līmi (0.86 MPa), tas ir iegūts, aplīmējot KŠM₉₀ ar PW. Tai pašā laikā šis iegūtais vidējais robežstiprības stiepē rādītājs būtiski neatšķiras no šūnveida materiāla, kas aplīmēts ar P, Os un TMMBa. Analizējot minēto trīs slāņu materiālu sagrāves veidu, varam secināt, ka, aplīmējot šūnveida materiālu ar P koksni, pētījumā izmantotos līmēšanas tehnoloģiskos parametrus ir iespējams uzlabot, jo sagrāve visbiežāk konstatēta pa līmes šuvi. Līmes uzklājums 170 g m^{-2} , spiediens 0.2 MPa un izturēšanas laiks zem spiediena 60 min. ir piemēroti KŠM aplīmēšanai ar Os masīvkoksni, TMMBa, HDF, PW un OSB.

EPI līmes izmantošanu visu trīs slāņu materiālu sagrāvei, izņemot ar priedes masīvkoksni aplīmēto, raksturo materiāla sagrāve pa KŠM (Os, PW) vai pa ārējo kārtu materiālu (TMMBa, HDF, OSB).

Neaplīmētā KŠM robežstiprība stiepē materiāla perpendikulārā virzienā ir 0.89 MPa , kas būtiski neatšķiras no iegūtajiem aplīmēto materiālu robežstiprības stiepē vidējo vērtību paraugiem, kuru sagrāve notikusi galvenokārt pa KŠM ($p > 0.05$).

Ņemot vērā KŠM paralēlā virziena robežstiprības rādītāju stiepē 0.43 MPa, var apgalvot, ka atkarībā no aplīmēšanai izmantotā materiāla robežstiprības savienojuma robežstiprība stiepē būs mazāka vai vienāda ar 0.43 MPa.

3.12. Īpašību kopsavilkums

Lai vieglāk orientēties vairākos pētījumos iegūtajos KŠM īpašību rādītājos, tie apkopoti 3.2. tabulā. Ņemot vērā to, ka visi pētījumi galvenokārt balstīti uz KŠM, kura izgatavošanā izmantotas 28 mm biezas priedes koksnes lameles, tieši šāda materiāla īpašības apkopotas un salīdzinātas ar priedes koksnes vai skujkoku masīvkoksnes rādītājiem.

3.2. tabula

KŠM īpašību salīdzinājums ar priedes koksnes rādītājiem

Nr.	Rādītājs	Mēr- vienība	Koksnes šūnveida materiāls		Priedes masīvkoksne	
			0	90	0	90
1	2	3	4	5	6	7
Fizikālās īpašības						
1	mitrums W	%	12.3		12.0 ¹⁾	
2	blīvums ρ	kg m ⁻³	308		500 ¹⁾	
3	rukšanas koeficients k_r	% % ⁻¹	0.248	0.021	0.010 ²⁾	0.220 ²⁾
4	brīšanas koeficients k_b	% % ⁻¹	0.255	0.022	—	—
5	Tilpuma rukšanas koeficients k_v	% % ⁻¹	0.27		0.42 ²⁾	
6	ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ	—	15.5	6.5	—	50.0 ³⁾
7	ūdens tvaika pretestības difūzijai ekvivalentā gaisa slāņa biezums S_d	m	1.71	0.73	—	4.48 ³⁾
8	siltumvadītspējas koeficients λ	W m ⁻¹ K ⁻¹	0.097	0.148	0.300 ⁵⁾	0.130 ³⁾
Fizikāli ķīmiskās īpašības un ugunsreakcijas klase						
9	ugunsgrēka attīstības ātruma indekss FIGRA	W s ⁻¹	696	1426	321 ⁴⁾	—
10	kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR _{600s}	MJ	58	108	23 ⁴⁾	—
11	ugunsreakcijas klase	—	D-s1, d0	E	D-s2, d0 ⁷⁾	—

3.2. tabulas nobeigums

1	2	3	4	5	6	7
Mehānisko īpašību vidējie rādītāji un to 5% kvantiļa raksturlieluma vērtības						
12	robežstiprība liecē f_m	MPa	2.07	2.15	39.90 ⁸⁾	—
13	robežstiprības liecē 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{m,k}$	MPa	1.64	1.79	24.00 ⁶⁾	—
14	robežstiprība spiedē f_c	MPa	1.27	1.44	42.10 ¹⁰⁾	—
15	robežstiprības spiedē 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{c,k}$	MPa	1.05	1.20	21.00 ⁶⁾	2.50 ⁶⁾
16	robežstiprība stiepē f_t	MPa	0.427	0.892	16.000 ¹¹⁾	—
17	robežstiprības stiepē 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{t,k}$	MPa	0.290	0.648	14.000 ⁶⁾	0.400 ⁶⁾
18	robežstiprība bīdē f_v	MPa	0.22	1.73	5.81 ⁹⁾	—
19	robežstiprības bīdē 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{v,k}$	MPa	0.17	1.25	4.00 ⁶⁾	—
20	lokālais elastības modulis liecē $E_{m,l}$	MPa	179	140	12500 ⁸⁾	370 ⁶⁾
21	lokālā elastības moduļa liecē 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība $E_{m,l,k}$	MPa	153	118	7400 ⁶⁾	—
22	elastības modulis spiedē E_c	MPa	155	124	11800 ⁸⁾	—
23	elastības moduļa spiedē 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība $E_{c,k}$	MPa	125	116	7400 ⁶⁾	—
24	elastības modulis stiepē E_t	MPa	161	125	11600 ⁸⁾	—
25	elastības moduļa stiepē 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība $E_{t,k}$	MPa	134	106	7400 ⁶⁾	—
26	elastības modulis bīdē G	MPa	6	95	690 ⁶⁾	—
27	elastības moduļa bīdē G_k	MPa	4	72	—	—
28	līmētā savienojuma robežstiprība bīdē f_{sl}	MPa	0.649	—	4.000 ⁷⁾	—
29	skrūvju SPEC 17 izraušanas pretestība ieskrūvējot 70 mm dziļumā F_s	N	4311	2811	—	9044
30	aplīmēta koksnes šūnveida materiāla robežstiprība stiepē perpendikulāri pret plātnes plakni $f_{t,apl}$	MPa	<0.427	0.311–1.000	—	—

¹DIN 68100; ²Wagenführ, 1996; ³LVS EN ISO 10456; ⁴Bukšāns, 2010; ⁵Niemz, 1993; ⁶LVS EN 338 C24 stiprības klases zāgmateriāliem; ⁷LVS EN 14080; ⁸Bacher un Krzosek, 2013; ⁹Ермолаева и.с., 1977; ¹⁰Малыгина и Хавратова, 1980.

Nodaļas secinājumi

1. KŠM mitrums ir tieši atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma. Priedes KŠM mitrums pie vienādiem mikroklimata parametriem atbilst priedes masīvkoksnes līdzsvara mitrumam, tādēļ koksnes līdzsvara mitruma diagramma ir izmantojama arī KŠM mitruma prognozēšanai atkarībā no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras.
2. KŠM blīvums ir atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma un ar to saistīto materiāla mitrumu. Noteiktais priedes KŠM vidējais blīvums ir 308 kg m^{-3} , tas ir par 38% zemāks nekā literatūrā norādītais priedes masīvkoksnes blīvums. Atšķirība starp KŠM blīvumu un koksnes plātņu materiālu blīvumu ir vēl lielāka.
3. Mitruma izmaiņas būtiski ietekmē KŠM ģeometriskos izmērus un tilpumu. KŠM paralēlā virzienā raksturo rukšanas koeficients $0.248 \% \%^{-1}$, tas ir salīdzināms ar priedes koksnes radiālā un tangenciālā virziena rukšanas koeficienta vidējo vērtību $0.22 \% \%^{-1}$. Materiāla perpendikulārā virzienā rukšanas koeficients ir $0.0214 \% \%^{-1}$, tas ir 6 līdz 8 reizes mazāks nekā priedes koksnei tangenciālā virzienā. Tilpuma izmaiņas raksturo tilpuma rukšanas koeficients $0.275 \% \%^{-1}$. Tās ir 1.6 reizes jeb par 36% mazākas nekā priedes koksnei. Rukšanas koeficienti visos trīs materiāla virzienos ir ievērojami zemāki, salīdzinot ar lielāko daļu koksnes plātņu materiālu rukšanas koeficientiem.
4. KŠM virzienam ir nozīmīga ietekme uz ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem. Netraucētā gaisa plūsma cauri KŠM perpendikulārā virzienā nodrošina zemu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu 6.53, savukārt noslēgtā uzbūve materiāla paralēlā virzienā nodrošina 2.4 reizes augstāku ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu 15.5. Noteiktā KŠM ūdens tvaika difūzijas pretestība ir zemāka, salīdzinot ar būvniecībā plaši izmantoto koksnes plātņu materiālu un masīvkoksnes ūdens tvaika difūzijas pretestības rādītājiem.
5. KŠM paralēlā virzienā raksturo siltumvadītspējas koeficients $0.0977 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, savukārt materiāla perpendikulārā virzienā tas ir augstāks $0.148 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. KŠM siltumvadītspējas koeficients paralēlā virzienā ir par 25% zemāks nekā koksnei šķērsām šķiedrām, savukārt perpendikulārā virzienā par 14% augstāks nekā koksnei šķērsām šķiedrām. KŠM siltumvadītspēja materiāla paralēlā virzienā ir zemāka nekā lielākajai daļai būvniecībā izmantotajiem koksnes plātņu materiāliem, kuru blīvums pārsniedz 500 kg m^{-3} .
6. KŠM perpendikulārā virziena ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība (1426 W s^{-1}) ir par 105% lielāka nekā materiāla paralēlā virzienā (696 W s^{-1}), un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā ir (108 MJ) par 86% lielāka nekā materiāla paralēlajā virzienā (58 MJ). KŠM paralēlā virzienā noteikta D ugunsreakcijas klase ar līdzīgiem ugunsreakcijas parametriem kā termiski plāniem koksnes plātņu materiāliem. Materiālam perpendikulārā virzienā prognozēta E ugunsreakcijas klase, un noteiktie ugunsreakcijas parametri būtiski pārsniedz masīvkoksnes un koksnes plātņu materiālu ugunsreakcijas parametrus.

7. KŠM mehāniskās īpašības ir atkarīgas no materiāla virziena. Noteiktie robežstiprības rādītāji ir robežās no 0.217 MPa līdz 2.15 MPa. Vidējie elastības moduļu rādītāji ir no 5.87 MPa līdz 179 MPa. Saistībā ar materiāla daudzuma samazināšanos un konstruktīvajām izmaiņām KŠM mehāniskie rādītāji ir būtiski zemāki nekā priedes masīvkoksnei.
8. KŠM slogojot paralēlā virzienā, paraugu izmēru palielināšana būtiski paaugstina tādus mehāniskos rādītājus kā robežstiprību liecē un lokālo elastības moduli liecē. Augstuma palielināšana ievērojami samazina robežstiprības rādītājus spiedē, savukārt izmēru izmaiņas neatstāj būtisku ietekmi un materiāla robežstiprību un elastības moduli bīdē.
9. KŠM līmēto plaknes savienojumu raksturo vidējā robežstiprība bīdē 0.649 MPa – tā ir būtiski augstāka par KŠM konstruktīvo bīdes stiprību vajātajā materiāla vietā 0.382 MPa, bet tā ir veidākas reizes zemāka par līmētajiem konstrukciju kokmateriāliem minimāli pieļaujamo līmēto plaknes savienojumu robežstiprību bīdē 4 MPa.
10. Tādiem tehnoloģiskajiem parametriem kā skrūvju ieskrūvēšanas dziļums, ieskrūvēšanas virziens un ieskrūvēšanas vieta KŠM ir nozīmīga ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību. Skrūvju diametra palielināšana un aizurbšanas paņēmiena izmantošana skrūvju iestrādē ievērojami palielina skrūvju izraušanas pretestības rādītājus.
11. Veidojot izstrādājumus, kuros KŠM perpendikulārā virzienā aplīmēts ar koksnes plātņu materiāliem, iegūti vidējie robežstiprības rādītāji stiepē perpendikulāri pret plātņu plakni no 0.311 MPa līdz 1.00 MPa. Perpendikulārā virzienā aplīmētam materiālam robežstiprība stiepē ir zemāka vai vienāda ar KŠM konstruktīvo robežstiprību stiepē 0.431 MPa.
12. Promocijas darbā noteiktās un apkopotās īpašības sniedz iespēju veikt inženiertehniskos aprēķinus un datorsimulācijas dažādiem izstrādājumiem un konstrukcijām, kuras projektētas no KŠM. Noteiktās īpašības var salīdzināt ar citu būvniecībā plaši izmantoto materiālu īpašībām.

4. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA PANEĻU PROTOTIPU ĪPAŠĪBAS

4.1. Siltuma caurlaidība

Pētījuma rezultātā ir aprēķinātas dažādu konstruktīvo risinājumu sienas paneļu siltuma caurlaidības koeficientu vērtības. 1. un 2. veida sienas paneļiem, kuru izgatavošanā izmantotas 28 mm biezas lameles, ir aprēķinātas ievērojami augstākas siltuma caurlaidības koeficienta vērtības ($U = 0.98 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ un $0.63 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) nekā būvnormatīvā LBN 002–01 noteiktās sienu konstrukciju U robežvērtības. Tādējādi minēto paneļu izmantošana bez papildu siltinājuma privātmāju un publisko ēku būvniecībā nav pieļaujama.

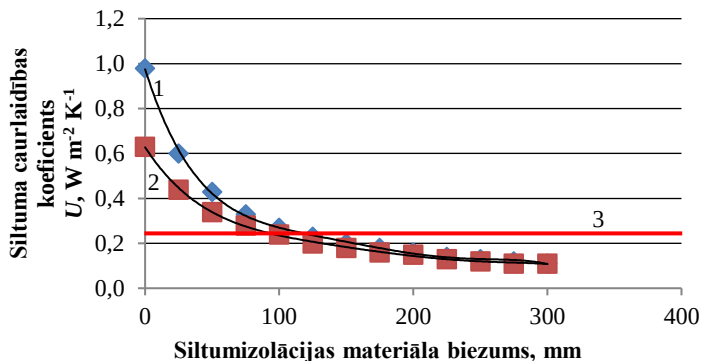
3. paneļa prototipam teorētiski aprēķināts, ka paneļa iekšējās kārtas biezums 280 mm nodrošina U vērtību $0.30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kura izpilda būvnormatīva LBN 002–01 prasības, lai paneli varētu izmantot kā norobežojošo ārsienas konstrukciju. Tomēr šāda sienas paneļa ražošana nav izdevīga, raugoties no vairākiem aspektiem: ekonomiskā – materiāla patēriņa un loģistikas; konstruktīvā, kas saistīts ar lielākām paneļa bīdes deformācijām, rukšanu un briešanu. Šī iemesla dēļ privātmāju un publisko ēku būvniecībā šādu biezu KŠM paneļu izmantošana bez papildu siltumizolācijas materiāla nav ieteicama. Lai 1. veida plānākais 92 mm panelis izpildītu būvnormatīva prasības attiecībā uz U koeficienta robežvērtību $0.25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, konkrētais sienas panelis jāpapildina ar 112 mm biezu siltumizolācijas materiālu. Savukārt 2. veida biežākais 148 mm panelis spēj nodrošināt būvnormatīva prasības, ja tas papildus nosegts ar 92 mm biezu siltumizolācijas materiālu. Pamatojoties uz veiktajiem aprēķiniem, kļūst skaidrs, ka KŠM paneļa noseģšana ar siltumizolācijas materiālu nodrošina būvnormatīvā noteiktās ārsienas konstrukcijai nepieciešamo siltuma caurlaidības koeficientu vērtības.

Siltumizolācijas materiāla biezuma ietekmi uz KŠM sienas paneļu prototipu siltuma caurlaidības koeficientiem apraksta ciešas, aprēķinu ceļā iegūts matemātiskai modelis ar pietkās pakāpes polinomiālu sakarību 4.1. (1. paneļa prototipam) un 4.2. (2. paneļa prototipam), skat. 4.1. att.:

$$U = -4 \cdot 10^{-12} \cdot s^5 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot s^4 - 10^{-6} \cdot s^3 + 0.0002 \cdot s^2 - 0.0189 \cdot s + 0.975, \quad (4.1.)$$

$$U = -10^{-12} \cdot s^5 + 10^{-9} \cdot s^4 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot s^3 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 - 0.0092 \cdot s + 0.627, \quad (4.2.)$$

kur U – siltuma caurlaidības koeficients, $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$;
 s – siltumizolācijas materiāla biezums, mm.



4.1. att. Siltumizolācijas materiāla biezuma ietekme uz KŠM sienas prototipu siltuma caurlaidības koeficientu:

1 – paneļu prototips no 56 mm bieža KŠM un 18 mm masīvkoksnes ārējās kārtās; 2 – paneļu prototips no 112 mm bieža KŠM un 18 mm masīvkoksnes ārējās kārtās; 3 – būvnormatīvā noteiktās sienu konstrukciju U robežvērtība $0.25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (LBN 002–01).

Optimāls ārsienas konstrukcijas risinājums Ziemeļeiropai ir trīs kārtu KŠM panelis ar paralēlo KŠM virzienu kombinācijā ar siltumizolācijas materiālu. Pilnai sienas konstrukcijas izstrādei 1. un 2. sienas paneļa prototips jāpapildina ar materiāliem, kuri uzlabo paneļa ugunsizturību, samazina tvaika iesūkšanos konstrukcijā, kā arī pasargā konstrukciju no klimata ietekmes saules, lietus un vēja veidā, lai izpildītu visas būvnormatīvos izvirzītās prasības.

Siltuma caurlaidības koeficienta teorētiskais aprēķins veikts arī 100 mm bieža KŠM sienas prototipam, kas sastāv no 64 mm bieža KŠM un no abām pusēm aplīmēts ar 18 mm biezu priedes masīvkoksni. Šādas teorētiskas konstrukcijas aprēķinātā siltuma caurlaidības koeficienta vērtība U ir $0.91 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, tā ir par 4% jeb $0.04 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ zemāka, salīdzinot ar 100 mm biezu trīs kārtu CLT paneļu siltuma caurlaidības koeficienta vērtību $0.95 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Izmantojot standartā LVS EN ISO 10456 norādītos orientēto kokskaidu plātņu un putupoliuretāna materiāla siltumvadītspējas koeficientus 0.14 un $0.025 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, ir aprēķināta 100 mm bieža SIP paneļa U vērtība $0.29 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Šis panelis veidots no 78 mm bieža putupoliuretāna, kas no abām pusēm aplīmēts ar 11 mm biežām orientēto kokskaidu plātnēm. Teorētiska aprēķinātā SIP paneļa siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir par $0.62 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ jeb par 68% zemāka nekā 100 mm biežam nesiltinātam KŠM sienas paneļa prototipam.

Izmantojot pētījumā iegūtās sakarības, iespējams aprēķināt KŠM sienu prototipu siltuma caurlaidības koeficientus atkarībā no izmantotās minerālvates biezuma. Pamatojoties uz pētījumā izmantoto aprēķinu metodiku un iegūtajiem KŠM siltumtehniskajiem rādītājiem, iespējams veikt datorsimulācijas no KŠM izgatavoto sienu un pārsegumu konstrukciju siltumtehnisko rādītāju prognozēšanai.

4.2. Skaņas izolēšana

Pārbaužu un aprēķinu rezultātā durvju paneļu prototipiem ar biezumu 25 mm un 60 mm noteiktas izolācijas indekss R_w , attiecīgi 26 dB un 31 dB, savukārt sienas paneļu prototipiem – 33 dB (panelis 92), 35 dB (panelim 108) un 37 dB (panelis 148).

Eksperimentāli noteiktā durvju paneļa prototipa 25 R_w vērtība 26 dB neatbilst nevienai no būvnormatīva LBN 016–11 *Būvakustika* limitētajām robežvērtībām, ja paneli izmanto kā durvju vērtnes konstrukciju. Durvju vērtnes konstrukcijai atkarībā no ēkas, telpas tipa un klases jānodrošina R_w vērtība robežās no 27 līdz pat 42 dB (LBN 016–11). To ierobežo rezonanses iekritums 1250 līdz 1600 Hz diapazonā.

Durvju paneļa prototipa 60 skaņas R_w vērtība 31 dB ir atbilstoša izmantošanai atsevišķu C klases telpu ar noteiktām minimālām prasībām skaņas izolācijai un D klases telpu jeb ekspluatācijā esošu ēku telpu norobežošanai. R_w uzlabojumu salīdzinājumā ar paneli 25 nodrošina palielinātā laukuma masa (zemajās frekvencēs +3 dB) un rezonanses iekrituma samazinājums 1250–1600 Hz diapazonā.

Kā potenciālu izmantošanas veidu panelim 60 saskaņā ar LBN 016–11 var minēt – biroju ēku durvis no darba telpām uz gaiteniem, kāpņu telpām, hallēm, vestibiliem; ārstniecības iestāžu durvis starp intensīvās terapijas telpu un gaiteni; izglītības iestāžu durvis starp klasēm, tām pielīdzināmām telpām un gaiteniem; durvis no pirmsskolas iestādes grupu telpām vai gulāmtelpām uz gaiteni.

Līdzīgi kā CLT paneļu gadījumā, neviens no sienas paneļa prototipiem bez papildināšanas ar skaņas izolējošiem materiāliem nenodrošina LBN 016–11 limitētās robežvērtības, ja paneli izmanto kā sienas konstrukciju. To ierobežo ievērojami zemākās skaņas izolācijas indeksu vērtības. KŠM sienas paneļa biezuma palielināšana no 56 mm (KŠM 2 kārtās) līdz 112 mm (KŠM 4 kārtās), pie vienāda ārējo kārtu materiāla biezuma 18 mm, paaugstina skaņas izolācijas indeksu par 4 dB – no 33 līdz 37 dB.

Skaņas izolācijas prasības ēku iekšējām norobežojošajām konstrukcijām dzīvojamās mājās atkarībā no ēkas, telpas tipa un klases ir robežās no 45 līdz 79 dB (LBN 016–11).

Tā kā ēku norobežojošo konstrukciju skaņas izolācijas prasības ir augstākas par iegūtajiem sienas paneļu prototipu mērījumu rezultātiem, tad paraugu materiāls var tikt izmantots kā atdalošo konstrukciju sastāvdaļas (slāņi), veicot pilnas konstrukcijas skaņas izolācijas aprēķinus, kuru modeļa izveidošanai var izmantot šajā nodaļā noteiktos rādītājus.

KŠM būvniecības paneļu prototipi ar biezumu 92 mm un 108 mm nodrošina līdzīgus skaņas izolācijas indeksa rādītājus kā 100 mm biezs trīs kārtu CLT panelis²³. CLT paneļa R_w ir 34 dB, savukārt KŠM sienas paneļu prototipu – attiecīgi 33 un 35 dB. KŠM sienas paneļu prototipu skaņas izolācijas uzlabošanai var izmantot analogiskus risinājumus kā CLT paneļu akustisko īpašību uzlabošanai.

Lai papildus uzlabotu daudzslāņu šūnveida koksnes materiāla sienas paneļu skaņas izolācijas īpašības, ieteicams veikt eksperimentālos pētījumus ar amortizējošiem starpslāņiem, KŠM kārtu savstarpējai salīmēšanai un papildinātiem prototipiem ar speciāliem skaņu izolējošiem materiāliem.

Pētījumā iegūtās KŠM durvju un sienu prototipu skaņas gaisā izolācijas indeksu vērtības R_w izmantojamas būvkonstrukciju ārējo un iekšējo norobežojošo konstrukciju skaņas izolācijas īpašību modelēšanā, veidojot normatīviem atbilstošas norobežojošās konstrukcijas.

4.3. Ugunsreakcija

Pētījumā novērtētas KŠM ugunsreakcijas parametru uzlabošanas iespējas ar konstruktīvo jeb aplīmēšanas paņēmieni. KŠM aplīmēts ar augsta blīvuma šķiedru plātni vai priedes masīvkoksni, kā rezultātā samazināts liesmas iedarbībai pakļautais virsmas laukums un ierobežota papildu skābekļa piekļuve degšanas zonai.

Pārbaudes laikā iegūtais ugunsgrēka attīstības ātruma indekss FIGRA 25 mm biežajam prototipam 90H25 ir 396 W s^{-1} , un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā $\text{THR}_{600\text{s}}$ veido 28.7 MJ. Iegūtā FIGRA vērtība ir par 47% zemāka nekā D ugunsreakcijas klases ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa robežvērtība 750 W s^{-1} . Saskaņā ar iegūto FIGRA vērtību 25 mm biežais KŠM panelis izpilda D ugunsreakcijas klases kritēriju. Minētā paneļa dūmu palielināšanās ātruma SMOGRA vērtība ir $2.4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, savukārt kopējā dūmu izdalīšanās $\text{TSP}_{600\text{s}}$ veido 35.1 m^2 . Iegūtās vērtības nesasniedz dūmu veidošanās indeksa s1 robežvērtības – SMOGRA $30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ un $\text{TSP}_{600\text{s}}$ 50 m^2 .

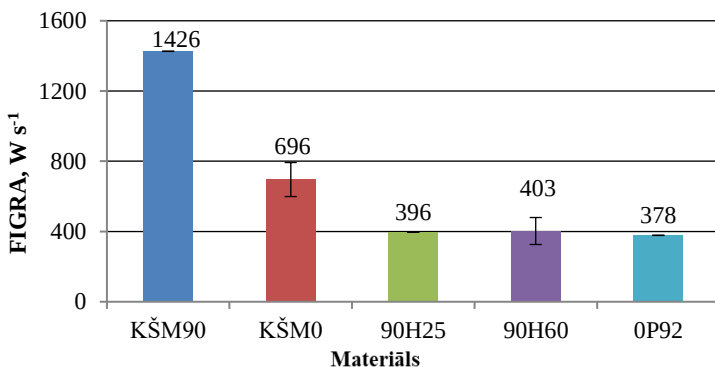
KŠM perpendikulārā virziena 60 mm biezo trīs kārtu prototipu 90H60 paraugu pārbaudes vidējie rādītāji SBI iekārtā ir šādi: FIGRA 403 W s^{-1} (SD 30.9; VAR 8%); $\text{THR}_{600\text{s}}$ 35.9 MJ (SD 5.32; VAR 15%); SMOGRA $5.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (SD 6.4; VAR 128%) un $\text{TSP}_{600\text{s}}$ 32.6 m^2 (SD 5.9; VAR 18%). Ar priedes koksni aplīmētais 92 mm biežais paneļa prototips 0P92 sasniedz FIGRA vērtību 378 W s^{-1} , un to raksturo $\text{THR}_{600\text{s}}$ vērtība $12.9 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. Pārbaudes rezultātā ir noteikta SMOGRA vērtība $2.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ un $\text{TSP}_{600\text{s}}$ 44.6 m^2 .

Ņemot vērā iegūtos rādītājus vienotās dedzināšanas iekārtas pārbaudēs, KŠM trīs kārtu būvniecības paneļu prototipiem prognozējama D ugunsreakcijas klase ar dūmu veidošanās indeksu s1 un liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu d0. Neskatoties uz to, ka visu trīs prototipu gadījumā konstatēta nozīmīga ugunsreakcijas parametru samazināšanās, vienīgi paneļiem ar KŠM perpendikulārā virzienā ugunsreakcijas klase ir par vienu klasi augstāka, salīdzinot ar neaplīmētu KŠM.

Trīs kārtu KŠM paneļu prototipu un neaplīmēta KŠM ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu FIGRA salīdzinājums aplūkojams 4.2. attēlā.

Analizējot 4.2. attēlu, redzams, ka KŠM aplīmēšana ar augsta blīvuma kokšķiedru plātni un priedes masīvkoksni ievērojami samazina materiāla ugunsgrēka

attīstības ātruma indeksu. 90H60 un 90H25 paneļu prototipu gadījumos (aplīmēti ar 4 mm biezu HDF plātni) ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir samazinājies līdz 3.6 reizēm, savukārt paneļa prototipa OP92 (aplīmētam ar 18 mm biezu priedes masīvkoksni) ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir samazinājies 1.8 reizes. Pamatojoties uz šiem faktiem, var secināt, ka KŠM aplīmēšana ar masīvkoksni un plātņu materiālu būtiski samazina materiāla ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu abos materiāla virzienos.



4.2. att. KŠM konstruktīvās uzlabošanas ietekme uz ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu:

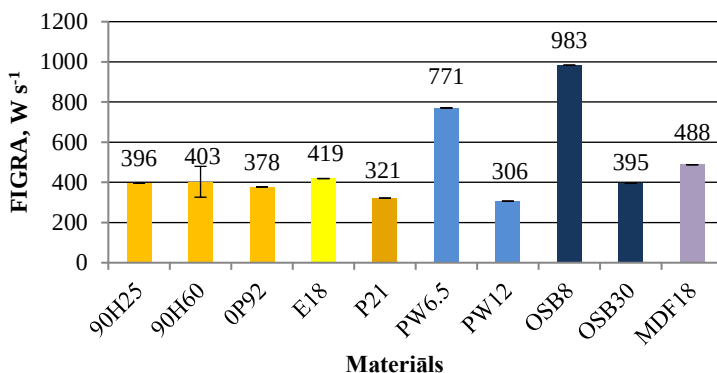
saīsinājumu skaidrojumu skatīt 6. un 21. lpp. Skaitlis aiz saīsinājuma – plātnes biezums, mm.

Prototipu ārējās kārtās, izmantojot termiski plānus materiālus (biezums < 10 mm) ar augstu blīvumu, iespējams panākt līdzīgus ugunsreakcijas parametrus, kā izmantojot termiski biežus materiālus ar zemāku materiāla blīvumu. Paneļu prototipiem 90H25 un 90H60, salīdzinot ar neaplīmētu KŠM perpendikulārā virzienā, novērota arī THR_{600s} rādītāju samazināšanās no 3 līdz 3.6 reizēm, savukārt prototipa OP92 gadījumā, salīdzinot ar KŠM THR_{600s} vērtību paralēlā virzienā, samazinājums novērojams pat par 4.5 reizēm. Atbilstošas KŠM THR_{600s} vērtības paralēlā virzienā veido 58 MJ m⁻², savukārt perpendikulārā virzienā – 108 MJ m⁻².

Trīs kārtu KŠM paneļu prototipu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu salīdzinājums ar literatūrā norādītajiem masīvkoksnes un plātņu materiālu rādītājiem atspoguļots 4.3. attēlā.

Visu trīs kārtu KŠM prototipu ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir salīdzināms ar termiski biežas egles koksnes un OSB plātņu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu vērtībām. Salīdzinot paneļu prototipu un termiski plāna saplākšņa, kā arī orientēto kokskaidu plātņu FIGRA vērtību, KŠM prototipiem tā ir 1.9 līdz 2.6 reizes zemāka. KŠM biezumam 17 un 52 mm prototipos 90H25 un 90H60, nav vērojama ietekmes uz FIGRA, jo prototipu 90H25 un 90H60 ugunsgrēka attīstības ātruma indekss atšķiras tikai par 2%.

Plānākajam prototipam 90H25 ir konstatēta līdzīga siltuma izdalīšanās 600 s laikā kā termiski biežai orientēto kokskaidu plātnei un vidēja blīvuma kokšķiedru plātnei. Biezākais prototips 90H60 ar KŠM perpendikulāro virzienu ir uzrādījis par 14 līdz 17% augstāku THR_{600s} vērtību nekā termiski biežām OSB un MDF plātnēm. Minētā atšķirība skaidrojama ar ievērojami lielāku KŠM daudzumu biežākajā prototipā, kas pakļauts uguns iedarbībai, pēc nosedzošās kokšķiedru plātnes caurdegšanas. Prototipu 90H25 un 90H60 siltuma izdalīšanās 600 s laikā ir par 21 līdz 50% augstāka, salīdzinot ar termiski biezu egles un priedes koksnes THR_{600s} .



4.3. att. Trīs kārtu KŠM prototipu un dažādu koksnes materiālu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu salīdzinājums:

saīsinājumu skaidrojumu skat. 6. un 21. lpp. Skaitlis aiz saīsinājuma – plātnes biezums, mm.

Plātņu prototipam 0P92 ar paralēlo KŠM virzienu un priedes koksni ārējā kārtā noteikta krietni zemāka THR_{600s} vērtība 12.9 MJ nekā priedes masīvkoksnei, plātņu materiāliem un pārējiem paneļu prototipiem. Minēto apstākli var izskaidrot ar paneļa prototipa lielāku biezumu un ar to saistītu augstāko materiāla siltumietilpību.

Pētījumā analizētos KŠM paneļu prototipus var izmantot kā pamatu būvkonstrukciju izgatavošanai. Lai būvkonstrukcijas no KŠM sasniegtu augstāku ugunsreakcijas klasi par D, paneļu prototipi jāpapildina ar grūti degoša vai nedegoša materiāla kārtu, piemēram, ģipškartonu ar A2 ugunsreakcijas klasi. Šādu metodi plaši izmanto CLT un SIP paneļu būvkonstrukciju ugunsreakcijas parametru samazināšanai.

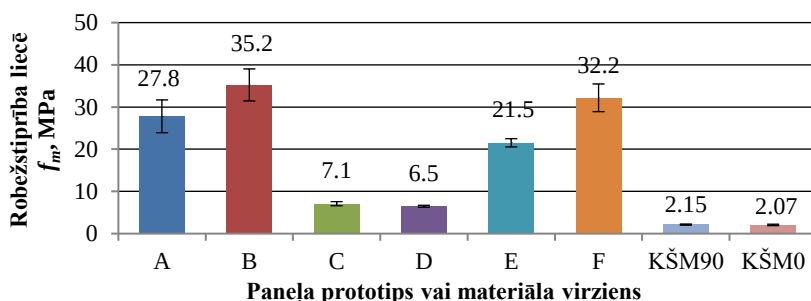
4.4. Mehāniskās īpašības

Izstrādāto pārseguma paneļu prototipu vidējais blīvums ir par 15 līdz 24% augstāks nekā KŠM blīvums. Blīvuma vidējās vērtības ir robežās no 363 $kg m^{-3}$

(prototips D) līdz 404 kg m^{-3} (prototips A). Iegūtie vidējie robežstiprības liecē rādītāji apkopoti 4.4. attēlā.

Prototips B nodrošina augstāko vidējo robežstiprību liecē 35.2 MPa , savukārt analogs prototips F bez masīvkoksnes *ribām* nodrošina vidējo robežstiprību 32.2 MPa . Salīdzinot abu prototipu vidējās vērtības statistiski, iegūts, ka masīvkoksnes *ribas* būtiski nepalielina ($p > 0.05$) robežstiprības liecē rādītājus. Savukārt, ja ārējās kārtās izmantots 12 mm bērza saplāksnis (prototipi A un E), masīvkoksnes *ribas* būtiski palielina robežstiprību liecē ($p < 0.05$).

Augstāki robežstiprības liecē rādītāji iegūti paneļiem, kuri aplīmēti ar 20 mm biezu priedes masīvkoksni (prototipi B un F), salīdzinot ar paneļiem, kuru ārējās kārtas aplīmētas ar 12 mm biezu bērza saplāksni (prototipi A un E).



4.4. att. **Paneļu konstruktīvo risinājumu ietekme uz robežstiprības liecē rādītājiem:**

paneļu prototipu aprakstu skat. 22. lpp.

Paneļu prototipi C un D ar paralēlo šūnveida materiāla novietojumu uzrādījuši aptuveni trīs reizes zemākus vidējos robežstiprības liecē rādītājus, salīdzinot ar paneļu prototipiem E un F, kuros šūnveida materiāls novietots perpendikulārā virzienā. Visiem konstruktīvajiem paneļu prototipiem vērojams robežstiprības liecē rādītāju pieaugums 3 līdz 7 reizes, salīdzinot ar KŠM robežstiprību liecē. Prototipi A, B, E un F sasniedz pēc stiprības šķīrotas masīvkoksnes robežstiprības liecē rādītājus.

Pētījumā iegūti un analizēti arī vidējie pārseguma paneļu prototipu lokālā elastības moduļa liecē rādītāji.

Augstāko elastības moduļa rādītāji iegūti paneļiem ar masīvkoksni ārējā kārtā un KŠM perpendikulāro novietojumu (prototipi B 11500 MPa un F 10900 MPa). Masīvkoksnes *ribas* prototipā B neuzlabo paneļu lokālo elastības moduli liecē, salīdzinot ar paneli F bez *ribām*. Paneļu konstruktīvie risinājumi B un F sasniedz pēc stiprības šķīrotas masīvkoksnes elastības rādītājus.

Paneļos A un E ar ārējām kārtām no 12 mm saplākšņa ielīmētās masīvkoksnes *ribas* (prototips A) būtiski palielina paneļu lieces elastības moduli ($p < 0.05$), salīdzinot ar paneli bez *ribām* (prototips E).

Paneļi ar ārējām kārtām no 20 mm masīvkoksnes (prototipi B, D un F) uzrāda augstākus vidējos elastības moduļu rādītājus, salīdzinot ar paneļiem, kuri izgatavoti no 12 mm bieza bērza saplākšņa ārējām kārtām (prototipi A, C un E).

Paneļu prototipi C un E ar paralēlo šūnveida materiāla novietojumu uzrādījuši būtiski zemākus ($p < 0.05$) vidējos elastības moduļu liecē rādītājus, salīdzinot ar paneļu prototipiem, kuros šūnveida materiāls novietots perpendikulāri (prototipi D un F).

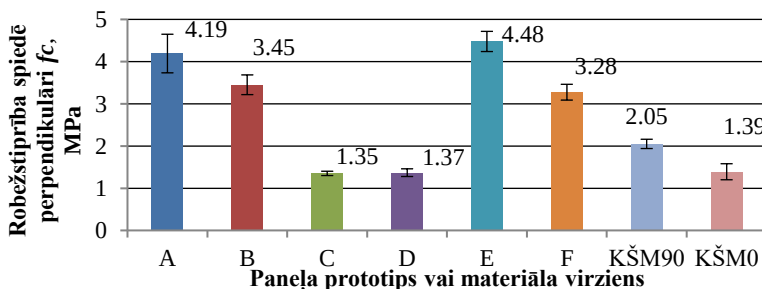
Visiem konstruktīvajiem paneļu prototipiem vērojams 29 līdz 82 reižu lokālo elastības moduļa rādītāju pieaugums, salīdzinot ar KŠM elastības moduļiem liecē. Prototipi B un F sasniedz pēc stiprības šķirotas masīvkoksnes elastības rādītājus.

Saskaņā ar Flaiga un Blasa (Flaig un Blaß, 2014) pētījumiem 9 kārtu CLT paneļu robežstiprība liecē ir 36.5 MPa, savukārt lokālais elastības modulis liecē ir 10260 MPa. CLT paneļu rādītāji ir salīdzināmi ar KŠM paneļu prototipu B un F vidējiem robežstiprības rādītājiem liecē (35.2 un 32.2 MPa). Pārējiem četriem prototipiem iegūtie rādītāji ir būtiski zemāki ($p < 0.05$). Paneļu prototipu B un F lokālā elastības moduļa rādītāji pat par 6 līdz 11% pārsniedz CLT paneļa vidējo elastības moduļa rādītāju liecē.

Paneļu prototipu robežstiprība spiedē perpendikulāri paneļa plaknei ir robežās no 1.35 līdz 4.48 MPa, skat. 4.5. att. Savukārt paralēli paneļa plaknei tā ir robežās no 6.83 līdz 17.5 MPa.

KŠM konstruktīvā uzlabošana, materiālu aplīmējot perpendikulārā virzienā, visos četros gadījumos būtiski ($p < 0.05$) palielina paneļu prototipu robežstiprību spiedē, bet aplīmēšana paralēlā virzienā neietekmē paneļu robežstiprību spiedē ($p > 0.05$), prototipu pārbaudot perpendikulāri pret paneļa plakni.

Paneļu prototipam E noteikta augstākā robežstiprības spiedē vērtība perpendikulāri pret paneļa plakni 4.48 MPa, minētajā prototipā izmantots KŠM ar perpendikulāro virzienu un ārējās kārtās iestrādātu bērza saplākšni.



4.5. att. Vidējie paneļu prototipu robežstiprības spiedē rādītāji, slogojot tos perpendikulārā virzienā:

paneļu prototipu aprakstu skat. 22. lpp.

Salīdzinot prototipu E (bez *ribām*) ar analoga paneļa A (ar *ribām*) vidējiem robežstiprības rādītājiem spiedē, tie būtiski neatšķiras ($p > 0.05$) gadījumā, ja KŠM prototipā ielīmē perpendikulārā virzienā un tas ir aplīmēts ar priedes masīvkoksni. Arī prototipiem B un F ar KŠM perpendikulāro virzienu un ārējām kārtām no bērza saplākšņa būtiska *ribu* ietekme nav novērota ($p > 0.05$).

Paneļos ar perpendikulāri novietotu KŠM būtiski augstāki robežstiprības spiedē rādītāji perpendikulārā virzienā panākti, ārējās kārtās izmantojot 12 mm biezu PW (prototipi A un E). Priedes masīvkoksnes gadījumā (prototipi B un F) rādītāji ir būtiski zemāki ($p < 0.05$). Paneļos paralēli iestrādātais KŠM (prototipi C un D) uzrāda aptuveni 3 līdz 4 reizes zemākus robežstiprības spiedē rādītājus, salīdzinot ar paneļiem, kuros KŠM iestrādāts perpendikulārā virzienā (prototipi E un F). Salīdzinot iegūtos vidējos robežstiprības spiedē rādītājus paneļiem un KŠM, varam secināt, ka paneļi, kuri izgatavoti no šūnveida materiāla ar perpendikulāro novietojumu (prototipi A, B, E un F), nodrošina aptuveni 1.6 līdz 2.2 reizes augstākus robežstiprības spiedē rādītājus, slogojot perpendikulārā virzienā, nekā vienkāršs KŠM, kas slogots perpendikulārā virzienā (2.05 MPa). Savukārt paneļos paralēlā virzienā ielīmētais KŠM (prototipi C un D) būtiski nepalielina paneļu robežstiprības spiedē rādītājus, salīdzinot ar KŠM robežstiprības spiedē rādītāju (1.39 MPa).

Analoģiski analizēta arī paneļu prototipu konstruktīvā risinājuma ietekme uz robežstiprības rādītājiem spiedē paralēli pret paneļu plakni. Visu sešu paneļu prototipu gadījumā rādītāji uzlabojas no 4 līdz pat 10 reizēm, salīdzinot ar KŠM rādītājiem.

Paneļu prototipu A, B, E un F vidējie robežstiprības rādītāji spiedē, paneļus pārbaudot perpendikulārā virzienā no 3.28 līdz 4.48 MPa, ir salīdzināmi ar CLT paneļu robežstiprības spiedē vidējiem rādītājiem perpendikulāri pret paneļu plakni no 2.80 līdz 3.43 MPa.

KŠM mehāniskās īpašības ir iespējams būtiski uzlabot, šūnveida materiālu aplīmējot ar ārējo kārtu materiālu, izvēloties atbilstošu šūnveida materiāla novietojumu panelī vai ielīmējot paneļos masīvkoksnes *ribas*, iepriekš izvērtējot panelim pieliktās slodzes un to virzienus.

Slodzi nesošu paneļu (pārseguma panelis) projektēšanas un modelēšanas vajadzībām rekomendējams izmantot F paneļa prototipa konstruktīvo risinājumu (panelis ar masīvkoksnes ārējām kārtām, KŠM ar perpendikulāro virzienu un bez masīvkoksnes *ribām*), savukārt pašnesošu starpsienu un ārsienu izgatavošanai ir ieteicams izmantot D paneļa prototipa konstruktīvo risinājumu.

4.5. Secinājumi par paneļu prototipu īpašībām

1. KŠM konstruktīvā uzlabošana jeb aplīmēšana ar augstāka blīvuma koksnes materiāliem būtiski palielina izstrādāto paneļu blīvumu.

2. Ārsienu konstrukciju veidošana vienīgi no KŠM un masīvkoksnes vai plātņu materiāliem raugoties no siltumtehnikā viedokļa nav pamatota. Iegūtās siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir salīdzināma ar krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu (CLT) paneļu siltuma caurlaidības koeficientu vērtībām. Savukārt tā ir augstāka nekā konstruktīvi izolētajiem paneļiem (SIP).
3. KŠM sienas paneļi nodrošina līdzīgus siltuma caurlaidības koeficientus kā krustām līmētie konstrukciju kokmateriālu paneļi. Lai sasniegtu normatīvās siltuma caurlaidības koeficientu vērtības, KŠM sienas paneļi jāpapildina ar siltumizolācijas materiālu.
4. Izstrādātais durvju panelis ar biezumu 60 mm un skaņas izolācijas indeksu 31 dB izmantojams atsevišķu ekspluatācijā esošu telpu un telpu ar minimālām prasībām skaņas izolācijas norobežošanai.
5. Sienas paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksu vērtības salīdzinoši ir daudz zemākas nekā nepieciešams norobežojošām sienu konstrukcijām. Tomēr tās ir salīdzināmas ar krustām līmēto kokmateriālu paneļu (CLT) rādītājiem, tādējādi to uzlabošanai var izmantot analogiskus risinājumus – kā CLT paneļu akustisko īpašību uzlabošanai. Izstrādātie sienas paneļu prototipi var tikt izmantoti kā sienu konstrukciju sastāvdaļas (slāņi), kuru pilnas konstrukcijas skaņas izolācijas aprēķinu modeļa izveidošanai var izmantot pētījumā noteiktos rādītājus.
6. KŠM aplīmēšana jeb konstruktīvā uzlabošana ar masīvkoksni vai koksnes plātņu materiāliem būtiski uzlabo materiāla ugunsreakcijas parametrus. KŠM prototipu degšanas jauda samazinās par 3 līdz 4.5 reizēm, un ugunsgrēka attīstības ātruma indekss samazināt par 1.8 līdz 3.6 reizēm, ļaujot izstrādāto durvju un sienas paneļu prototipus klasificēt D ugunsreakcijas klasē. KŠM trīs kārtu paneļu prototipu ugunsreakcijas parametri ir salīdzināmi ar termiski biezu koksnes un koksnes plātņu materiālu ugunsreakcijas parametriem.
7. KŠM aplīmēšana ar bērza saplāksni vai priedes masīvkoksni būtiski uzlabo materiāla robežstiprības rādītājus liecē, rādītāju pieaugums ir 3 līdz 16 reizes. Elastības moduļu pieaugums ir vēl ievērojamāks – no 20 līdz pat 82 reizēm. Atsevišķu paneļa prototipu rādītāji liecē un spiedē sasniedz pēc stiprības šķirotu zāģmateriālu un krustām līmēto kokmateriālu paneļu mehāniskos rādītājus.

SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS

Secinājumi

1. Līdzīgi kā citi koksnes materiāli, arī KŠM ir anizotrops un higroskopisks materiāls.
2. Noskaidrotas šādas KŠM priekšrocības salīdzinājumā ar citiem būvniecībā plaši izmantotiem koksnes materiāliem: zemāks blīvums, mazākas lineāro izmēru un tilpuma izmaiņas, zemāks ūdens tvaika difūzijas koeficients un zemāks siltumvadītspējas koeficients materiāla paralēlā virzienā. Palielinātos materiāla ugunsreakcijas parametrus un zemākas mehāniskās īpašības, salīdzinot ar masīvkoksni un koksnes plātņu materiāliem, var uzskatīt par ievērojamiem materiāla trūkumiem.
3. Pētījumu rezultātā iegūtas 23 sakarības dažādu KŠM rādītāju aprēķināšanai.
4. KŠM fizikāli mehānisko un fizikāli ķīmisko rādītāju ir nepietiekami, lai materiālu izmantotu būvniecībā. Šī iemesla dēļ pētītas KŠM konstruktīvās uzlabošanas iespējas. Rezultātā izstrādāti un pārbaudīti 2 durvju vērtni, 6 sienu paneļu un 6 pārseguma paneļu prototipu konstruktīvie risinājumi, novērtēti un salīdzināti to indikatīvie rādītāji.
5. KŠM konstruktīvā uzlabošana ar citiem materiāliem uzlabo KŠM fizikālās, fizikāli –ķīmiskās un mehāniskās īpašības, ļaujot KŠM izmantot būvniecībā kā daļu no norobežojošām durvju, sienu un pārsegumu paneļu būvkonstrukcijām.
6. Noteiktie un apkopotie īpašību rādītāji sniedz iespēju veikt inženiertehniskos aprēķinus un datormodelēšanu dažādiem izstrādājumiem un konstrukcijām, kuras projektētas no KŠM.
7. Abas promocijas darbā izvirzītās hipotēzes: koksnes šūnveida materiāla īpašības atšķiras no masīvkoksnes un koksnes bāzes plātņu materiālu īpašībām un koksnes šūnveida materiāla konstruktīvā uzlabošana ar aplīmēšanas paņēmieni būtiski uzlabo materiāla fizikālās, fizikāli – ķīmiskās un mehāniskās īpašības ir apstiprinājušās.

Rekomendācijas

1. Lai iegūtu ar citiem materiāliem un būvnormatīvu prasībām salīdzināmus KŠM un tā izstrādājumu rādītājus ieteicams izmantot standartizētās pārbaudes metodes.
2. Vispārējā koksnes līdzsvara mitruma diagramma ir izmantojama KŠM mitruma prognozēšanai atkarībā no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras.
3. Praktiskiem KŠM izmēru izmaiņu prognozēšanas aprēķiniem, atkarībā no gaisa relatīvā mitruma līmeņa, rekomendējams izmantot KŠM augstuma rūkšanas un briešanas koeficientu vidējo vērtību $0.251\ \%^{-1}$, garuma un platuma vidējo rūkšanas un briešanas koeficienta vērtību $0.0214\ \%^{-1}$.
4. KŠM rūkšanas un briešanas rādītāji garumā un platumā, kā arī materiāla masa, ir zemāka nekā priedes masīvkoksnei un lielākajai daļai koksnes plātņu materiālu,

tādēļ KŠM ieteicams izmantot produktos un izstrādājumos, kuriem ekspluatācijas laikā nepieciešams nodrošināt augstu formas stabilitāti un samazinātu masu.

5. Tādiem tehnoloģiskajiem parametriem kā skrūvju ieskrūvēšanas dziļums, ieskrūvēšanas virziens un ieskrūvēšanas vieta KŠM ir nozīmīga ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību. Skrūvju diametra palielināšana un aizurbšanas paņēmiena izmantošana skrūvju iestrāde ir rekomendējama, lai palielinātu skrūvju izraušanas pretestības rādītājus.
6. KŠM paraugu izmēru ietekme ir jāņem vērā pie materiāla mehānisko īpašību aprēķiniem un modelēšanas, jo atkarībā no slodzes veida, paraugu izmēru izmaiņas var atstāt nozīmīgu ietekmi uz materiāla mehāniskajām īpašībām.
7. Ātraudzīgo plantāciju koku sugu eikalipta (*Eucalyptus grandis* W. Hill) un radiata priedes (*Pinus radiata* D. Don) izmantošana KŠM materiāla un tā paneļu ražošanai var tikt izskatīta kā alternatīva parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksnes izmantošanai.
8. KŠM aplīmēšanai ar masīvkoksni un citiem koksnes materiāliem efektīvi var izmantot ne tikai līdz šim izmantoto termoplastisko polivinilacetāta līmi bet arī temperatūras un paaugstināta mitruma izturīgo poliuretāna līmi un emulsipolimērizocianāta līmi.
9. KŠM īpašību uzlabošanai ieteicams izmantot konstruktīvās uzlabošanas paņēmieni, samazinot konstrukcijas ugunsreakcijas parametrus, palielinot mehāniskos rādītājus, novēršot kondensāta veidošanās risku un nodrošinot ārsienai nepieciešamo siltuma caurlaidības koeficientu.

PATEICĪBA

Darba autors izsaka īpašu pateicību darba vadītājiem – asoc.prof., *Dr.sc.ing.* Uldim SPULLEM, par nerimstošu atbalstu darba tapšanā. Pateicība tiek izteikta Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes un Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūta kolēģiem par būtisko atbalstu darba eksperimentālo pētījumu realizēšanā un saturīgajām zinātniskajām diskusijām.

Īpaša pateicība manai ģimenei: maniem vecākiem – Maijai LASMANEI un Imantam IEJAVAM – par atbalstu un ticību. Sievai Ingai IEJAVAI un bērniem Kristoferam un Martai par mīlestību, sapratni un atbalstu visā promocijas darba rakstīšanas laikā.

1. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE SCIENTIFIC WORK

Justification and relevance of the chosen topic for the doctoral thesis

Reducing the costs of manufacturing, transport, and using various structures has always been a relevant issue from both ecological and economic perspectives.

One way to achieve these goals is by reducing the mass of a multilayer composite material by replacing one of its layers with another wood-based or non-wood material that has a relatively lower mass. This makes the structural solution lighter. Several researchers have sought new technological solutions for manufacturing lightweight wood structures (Skuratov, 2010; Voth, 2009), including reducing the production costs of lightweight panel materials (Pflug et al., 2003). The technologies specified in the studies are widely used for manufacturing composites, most commonly by forming the inner layers from a lower-density material while using higher-density materials for the outer layers to ensure the required mechanical properties for the composite.

The invention of cellular wood material (KŠM) and its furniture panels under the trademark Dendrolight® in 2005 and its patenting in Austria^{1;2} in 2009, can be considered one of the woodworking industry innovations of the last fifteen years. The material was created by the Austrian inventor Johann Berger, who based it on the technology used in ski manufacturing.

In 2010, the world's first and only industrial production facility for KŠM and furniture panels made from it was opened in Ventspils, Latvia. The material was expected to have broad applications not only in manufacturing furniture boards but also in the transport industry and construction.

Until then, a presentation and publication by the inventor of KŠM Johann Berger had been publicly available, which reflected the most significant properties of KŠM furniture panels. It should be noted that the structural solution of KŠM in that period differed from the technology discussed in the doctoral thesis. Initially, the lamella grooves were made only on one flat-wise side of the lamella.

With the launch of industrial production of KŠM in Latvia, a double-sided lamella groove cutting technology was introduced (instead of the single-sided cutting technology) to ensure higher shape stability and increase the contact area of the glue joint, thanks to which an improvement in the material's physical and mechanical properties was expected.

Based on the above facts, it can be argued that prior to the first pilot study of the new structure KŠM was conducted in Latvia in 2009 and the start of production in 2010, no information was available regarding the properties of the material of such structure. The use of KŠM in construction, productions of doors and building elements was set as a future goal of the company "Dendrolight Latvija" Ltd., starting the development of the second phase of the plant. Researching the properties of KŠM and declaring their properties would allow manufacturers of various products offer a

new material that, under specific strength parameters, would significantly reduce the mass of the product to be manufactured and improve its quality.

Until 2010, no comparison had been made between the properties of KŠM and the properties of typical wood materials for use in both non-load-bearing and load-bearing building structures. The study of these properties would reflect the advantages or possible disadvantages of the specific material compared to other wood materials widely used in the woodworking industry. For this reason, studies of the innovative material have been conducted, highlighting the most significant properties of the specific material and the factors influencing them.

At the beginning of the studies, a comprehensive review and analysis of information sources was conducted. The main topics covered in the situational analysis and included in the doctoral thesis are as follows:

- manufacturing technology and potential applications of KŠM;
- properties of wood materials and building elements, and affecting factors;
- methods for determining the properties of wood materials and building elements;
- possibilities for the structural improvement of wood materials;
- previous studies on the properties of KŠM and its products.

As a result, the following conclusions can be drawn.

1. Wood and wood-based materials are hygroscopic and anisotropic – their properties and the factors affecting those properties must be considered when developing new wood products and modelling their properties.
2. KŠM, due to its structure and manufacturing technology, is a unique wood material with no equivalent in the world.
3. None of the previous studies reveal comprehensive, concise information about the properties of unlaminated KŠM and the factors influencing it.
4. It is recommended to use standardized testing methods for another material with similar properties of application for identifying KŠM and its product properties.
5. The effectiveness of structural improvements of materials has been proven in the case of cross-laminated timber (CLT) structures, structurally insulated panels (SIP), and KŠM furniture panels (Dendrolight®).

In the last decade, predicting wood material properties has become an effective method in the development of new products. When predicting properties using computer modelling capabilities, one must deal with a significant dispersion of the physical-mechanical and physical-chemical indices of wood and wood materials, which is significantly increased by variable environmental parameters. Compared to inorganic materials such as concrete, steel, and polymers, the physical-mechanical properties of wood and wood materials exhibit much greater dispersion indices, making property prediction more difficult. To effectively and accurately utilize computer modelling capabilities, it is necessary to clarify the characteristic values of the properties of the material being modelled.

Unfortunately, the long-term shortage of working capital and unclear issues regarding the use of patents in “Dendrolight Latvija” Ltd. were possible reasons for the company’s declared insolvency in 2014 and its liquidation in 2016. As a result, the industrial production and trade of KŠM were discontinued⁵. Despite this, individual research institutions, researchers (Münster University of Applied Science⁶; Berger et.al. 2016; Roziņš et al., 2020), and manufacturing companies (“Gisler Holzbau” GmbH⁷; “ARB Pope” Ltd.⁸) are developing and patenting materials of a similar technological solution for creating new products and increasing the production efficiency of existing products. The acquired practical knowledge about the properties of this unique material and its panels will become particularly relevant when KŠM returns to production in some form or another.

The aim of the doctoral thesis is to determine properties of the pine cellular wood material produced in Latvia and to develop prototypes of structurally improved KŠM building panels and evaluate their properties.

The following **tasks** have been set to achieve the goal of the work:

1. collect and analyse information on the manufacturing technologies, properties, and influencing factors of KŠM and other wood materials.
2. develop a methodology and define the properties of KŠM, comparing them with the properties of solid wood and wood-based panel materials.
3. develop a research methodology and evaluate the properties of prototypes of structurally improved KŠM building panels, compare them with the properties of wood materials, similar products widely used in construction in terms of their use, and building code requirements.

The hypothesis of the doctoral thesis is supported by the following theses:

1. the properties of cellular wood material differ from those of solid wood and wood-based panel materials;
2. the structural improvement of cellular wood material by the gluing technique significantly improves the physical, physical-chemical and mechanical properties of the material.

Scientific novelty:

- the properties of KŠM have been defined, the factors affecting them have been analysed, and correlations for predicting material properties have been obtained.
- structural solutions have been developed to improve the properties of KŠM using the gluing technique, their properties have been identified and compared with the property indices of wood materials widely used in the furniture industry and construction.
- prototypes for the KŠM building panels have been developed, and their properties have been defined and compared with the properties of similar products and the requirements set out in the building code.

Practical significance of the work

The properties of KŠM and their correlations defined and summarized in the doctoral thesis provide the opportunity to perform engineering calculations and forecast properties for various products and structures designed from KŠM. Several prototypes of panel materials and building panels have been developed, in which KŠM is improved using a structural or gluing technique, utilizing solid wood, wood-based panel materials, and thermal insulation materials. The prototypes have been assessed for indicative physical, mechanical, and physic-chemical properties to characterize door leaves, wall, and ceiling panels. The properties of KŠM and the improved panel prototypes have been compared, and the conformity of the panel prototype properties to the requirements set by the building code has been evaluated.

Overall, the results obtained in the work provide a practical perspective for performing engineering calculations and computer simulations for various KŠM products and structures.

Structure and volume of thesis

The doctoral thesis consists of 5 chapters:

Chapter 1. Situation analysis;

Chapter 2. General research methodology;

Chapter 3. Studies of the properties of cellular wood material;

Chapter 4. Studies of the improved cellular wood material panel prototypes properties;

Chapter 5. Conclusions and recommendations.

The doctoral thesis is presented on 152 pages with 66 figures, 43 tables and 41 references. The list of used literature includes: 104 literature sources, 49 standards and regulations. The literature sources included in the summary of the doctoral thesis can be found in the doctoral thesis.

2. RESEARCH METHODOLOGY

2.1. Production of cellular wood material

For the production of KŠM intended for research, pine (*Pinus sylvestris* L.) sawn timber was used. Its nominal dimensions are as follows: thickness 32 mm, width 112 mm, and length 4200 mm. The production of KŠM was carried out industrially on an automated production line at the company “Dendrolight Latvija” Ltd. The principal schematic diagram of the production of KŠM is presented in Fig. 2.1.

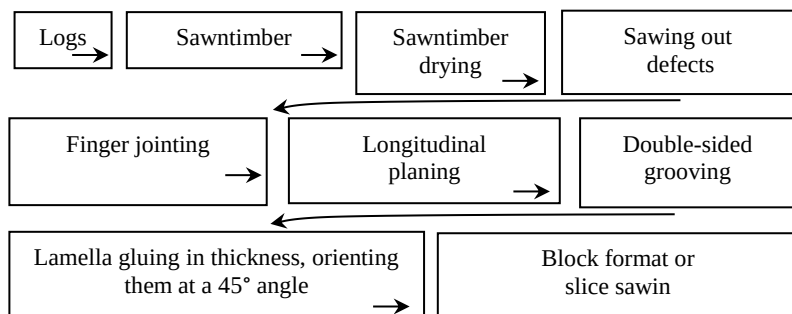


Fig. 2.1. Schematic diagram of the production technology of cellular wood material.

Rotten, partially fused branches, metal inclusions, and cracks are sawn out of the sawn timber. After sawing out the defects, the timber is lengthwise glued. The sawn timber is joined using a finger joint characterized by the following parameters: finger length 11 mm, finger pitch 4 mm, and tolerance at the finger ends 1 mm. During finger joint gluing, an end pressure of 12 MPa is applied for five seconds. The average moisture content of the lamellas to be glued is 12%. For lengthwise gluing of the lamellas and for KŠM panel gluing processes, a one-component, water-based polyvinyl acetate (PVA) glue of the D3 group, *Cascol 3353*, is used.

Finger joints are made and visible on the wide face of the lamellas. After the glue for the finger joints has hardened, the longitudinal planing of the lengthwise-jointed lamellas is performed using a four-sided longitudinal planing machine, resulting in lamellas with nominal cross-sectional dimensions of 28 mm thickness, 106 mm width, and 2010 mm length.

After longitudinal planing of the lamellas, 8 grooves are sawn on both sides along the length of the lamellas, see Fig. 2.2. The depth of the grooves is 24 mm, the bilateral groove pitch is 6.4 mm, the groove width is 3.2 mm.

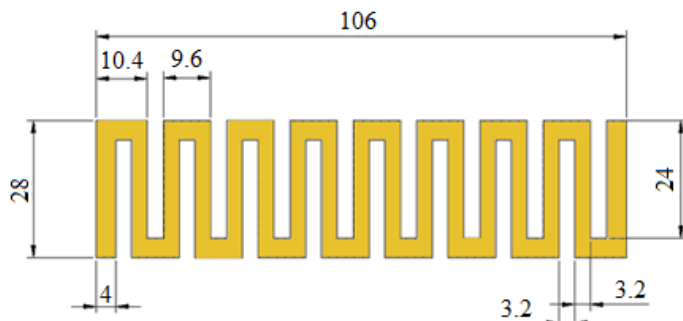


Fig. 2.2. **Cross-section of a pine lamella board with sawn grooves:** dimensions in millimeters.

The gluing of KŠM blocks in thickness was performed using a continuous-operation heated press. KŠM was laid in four layers, with each subsequent layer being oriented at a 90° angle relative to the previous one. PVA Glue *Casco 3353* was applied to the laid layers through a nozzle using an oscillation technique, ensuring an average glue consumption of approximately 250 g m^{-2} . The pressing cycle duration at a temperature of 60 to 75°C and a pressure of 0.2 MPa was maintained for 6 minutes. The resulting dimensions of the KŠM blocks are as follows: thickness 112 mm, width 1350 mm and length 2500 mm.

After gluing the inner layers of the lamellas together, a parallel direction KŠM block (relative to the feed direction of the gluing press) is obtained, see Fig. 2.3. (1).



Fig. 2.3. **Difference of cellular wood material orientations:** 1 – parallel (KŠM₀); 2 – perpendicular (KŠM₉₀).

In the subsequent processing operations, the KŠM block is sawn into blanks of the required thickness, orientated at an angle of 45° and calibrated to obtain KŠM in perpendicular direction, see. Fig. 2.3. (2). By gluing the outer layers of KŠM with various wood materials or supplementing them with thermal insulation materials, various prototypes of KŠM building panels with enhanced properties have been obtained for research purposes.

The studies were based on KŠM made of 28 mm thick pine boards, while in order to assess the effect of the thickness of the raw material on the physical, physico-

chemical and mechanical properties of individual KŠM, additional KŠM was produced using boards with a thickness of 18 or 25 mm. In case the thickness of the KŠM boards used in the study differs from 28 mm, this is specified in the relevant section of the study.

According to related studies, the use of fast-growing plantation tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis* W. Hill) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) for the production of KŠM material and its panels can be considered as an alternative based on both higher mechanical properties of the raw material and appropriate gluing quality (Iejavs et al., 2021; Iejavs et al., 2022).

2.2. Methodology to determin cellular wood material properties

For the studies of the properties of KŠM, industrially manufactured KŠM was used in accordance with the technology discussed in Section 2.1. It was sawn or glued into the sizes required for the studies. In the production of three-layer KŠM panel samples and panel prototypes, primarily wood materials were used with the technologies specified in the relevant work sections.

Moisture

A study was conducted to assess the moisture content (W) of the KŠM depending on the relative humidity of the air RH (from 30 to 85%). The assessment was carried out at a constant air temperature of 20 °C. The weighing/drying method was used to determine the moisture content of the KŠM in accordance with the standard LVS EN 13183–1 methodology. Two types of specimens with nominal dimensions of 112×112×112 mm and 56×56×300 mm were used in the study. In total, 4 specimen groups with a total number of 120 specimens were tested in the study.

Density

The dependence of the density (ρ) of KŠM on the relative humidity RH (ranging from 30 to 85%) and moisture content of KŠM W (ranging from 6 to 18%) at a constant air temperature of 20 °C was evaluated. Density calculations were performed in accordance with the methodology of referred to in 7.1 of the standard ISO 3131. Two types of samples with nominal dimensions of 112×112×112 mm and 56×56×300 mm were used in the study. A total of 4 groups of samples with a total number of 120 samples were produced and tested for the study.

Shrinkage and swelling

Shrinkage and swelling indices of KŠM depending on the relative humidity of the air (ranging from 30 to 85%) at a constant air temperature of 20 °C were evaluated. Shrinkage and swelling indices can be used to calculate the fits and tolerances of various KŠM structures, as well as in the development of new products, and to evaluate the tolerance of materials. A test methodology has been developed for calculating shrinkage and swelling indices, which is based on the standard LVS

EN 318 standard test and DIN 52184 standard calculation methodology. For each of the 3 KŠM directions (width, thickness and length), 20 samples with nominal dimensions of 56×56×300 mm were made - for exposure in 3 different levels of relative humidity of the air (30, 65 and 85%). The total number of samples subjected to testing is 60 pieces.

Water vapor permeability

Tests were carried out to determine the water vapor transmission properties of KŠM and to assess the effect of the thickness of lamellas and the number of glued layers on the water vapor transmission properties of the material. Water vapor transmission properties can be used to assess the condensation risk of building structures. The indices were determined in accordance with the methodology of the standard LVS EN 12086 for 6 specimen groups with a total number of specimens of 18 pieces.

Thermal conductivity

To evaluate KŠM as a thermal insulation material for building structures and for calculating the thermal resistance of various structures, the thermal conductivity coefficient λ of the material is determined according to the standard LVS EN 12667 testing methodology. A total of 4 specimens were tested for each direction of the material. The nominal dimensions of the specimens in both cases were 112×600×600 mm.

Reaction to fire

For the classification of KŠM in the reaction to fire class and the evaluation of reaction to fire parameters, 6 large-sized specimens were made – 3 specimens for the parallel and perpendicular directions of the material. The test was performed in a single burning item in accordance with the testing methodology of the reaction to fire class D of the standard LVS EN 13823. For each test, two KŠM lamellas with a length of 500 mm and 1000 mm were made, in both cases the width of the specimens was 1500 mm. Additionally, 9 samples with a flame exposure area of 90×250 mm were made and tested – for testing with a single flame source test in accordance with the standard LVS EN ISO 11925–2 testing methodology. KŠM samples with a thickness of 56 mm were used in both tests.

Mechanical properties

Several studies have been conducted to determine the most important mechanical properties of KŠM and to evaluate the factors influencing them. Using 16 sample groups, as well as the test methods of the standards LVS EN 408+A1:2012 and ASTM C 273–00 for 132 samples in parallel and perpendicular directions of the material, values of strength and elastic modulus in static bending, compression, tension and shear have been determined. For each direction of the material, bending tests used 8 large-sized KŠM samples with a thickness of 136 mm, a width of 280 mm and a length of 2500 mm.

To determine the compressive strength of KŠM, 30 cubic samples with an edge length of 112 mm were made. To determine the tensile strength of KŠM, a tension modulus of elasticity and a compressive modulus of elasticity, eight samples with a

length and width of 112 mm and a height of 224 mm were made for both sample types and for each property. The shear strength and shear modulus of elasticity were determined using 8 samples with a length of 300 mm and cross-sectional dimensions of 56 mm.

For design purposes and for comparison of mechanical parameters with the mechanical parameters of other materials, 5% quantiles were calculated for all parameters according to the standard LVS EN 14358.

Effect of geometric dimensions on the mechanical properties of KŠM

According to the literature, the effect of the geometric dimensions of wood and wood material samples on the mechanical properties of materials is not unambiguous, therefore, by expanding the methodology of the aforementioned study on the mechanical properties of the material, the effect of the cross-sectional geometric dimensions and area of the KŠM sample on the ultimate strength and moduli of elasticity of the material in bending, tension, compression, and shear was evaluated. In this study, the material was tested in parallel direction – according to the requirements of the standard LVS EN 408+A1:2012, clauses 10, 16, 18, and 19.

The use of the parallel direction of the material in the production of three-layer building panels is considered the most cost-effective solution due to the reduced number of manufacturing operations compared to the perpendicular direction of the material. The nominal thickness of one KŠM lamella in this study was 28 mm. The study involved 23 sample groups with a total of 150 samples. The effect of dimensions and area was analysed for samples with dimensions ranging from 28×56×300 mm to 112×600×2240 mm. To evaluate the individual and interaction significance of the effects of geometric dimensions and areas on the mechanical properties of the material, one- and two-factor regression analysis methods were used.

Durability of mechanical fasteners – wood screws – in KŠW

The most commonly used methods for the mutual connecting wood materials and products are as follows – using mechanical fasteners or screws, and the physical or gluing method. For this reason, a study has been conducted to assess the holding strength of mechanical fasteners or screws in KŠM. In addition to the established indices, factors influencing the holding strength of screws have been analysed. The experimental study methodology is based on a testing method of the modified standard LVS EN 320. The study used three different types of screws, which are widely available on the Latvian market for the manufacture of both load-bearing and non-load-bearing structures. The screw insertion depth was evaluated ranging from 14 to 70 mm.

Non-load-bearing screws SPEC17 were used to evaluate the crew withdrawal resistance depending on the direction and depth of screw insertion, while load-bearing screws HBS6220 and HBS8280 were used in the study to determine the effect of screw diameter and screw insertion type on the screw withdrawal resistance from KŠM.

In the case of SPEC17 screws, 12 groups of samples were made for testing, with a total number of samples of 120 pieces – 10 samples in each group.

In the case of HBS6220 and HBS8280 screws, 4 sample groups were used, each group containing 15 samples. The indices for these groups were determined by orienting KŠM in perpendicular direction against the longitudinal axis of the screw and inserting it in the KŠM location with the least amount of wood on the thread. The screw insertion depth in all four cases is 70 mm.

For engineering calculations, the values of screw withdrawal resistance properties were calculated for indices of individual sample groups according to the methodology of the standard LVS EN 14358.

Ultimate shear strength of a glued plane joint

KŠM is formed by gluing together several layers of wood, therefore the mechanical strength of the glue joint has been assessed. The test was carried out by loading the glue joint in shear according to the test principle specified in the standard LVS EN 392. 30 glue plane joints were subjected to the tests, whose shear strength values were compared with the structural values of KŠM90 determined by loading the material in four different zones. The material zones subjected to KŠM shear testing are presented in Fig. 2.4.

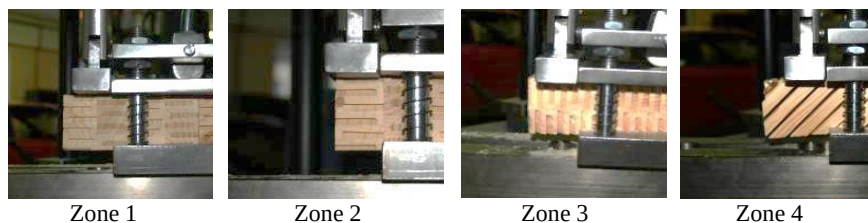


Fig. 2.4. Four cellular wood material zones subjected to shear testing:

Zone 1 – parallel to the cellular wood material layers, in the middle between two gluelines;
Zone 2 – parallel to the glueline; Zone 3 – perpendicular to the plane of the block; Zone 4 – orienting the glueline at a 90° angle to the shear plane.

All tests used samples with a shear area of 50×50 mm and a length of 112 mm.

Gluability with other wood materials

A study was conducted on the strength of glue joints between KŠM and other wood materials for the development of new wood composite materials and products. The study used the polyurethane (PUR) adhesive *Kleiberit 501* and the emulsion polymer isocyanate (EPI) adhesive *Kleiberit 304.4*, as well as six different wood materials: ash (Os), pine (P), birch plywood (PW), thermo-mechanically modified white alder (TMMBa), oriented strand board (OSB) and high-density fibreboard (HDF). According to the methodology of the standard LVS EN 319, twelve sample groups with a total number of 158 samples were tested. The nominal dimensions of the samples are 50×50 mm, while thickness is 50 or 58 mm. Two indices are

determined and evaluated for the samples – tensile strength perpendicular to the plane of the boards and the type of failure.

2.3. Methodology to evaluate improved cellular wood material panel prototype properties

Studies have found that most properties of KŠM have lower values compared to wood-based panel materials, solid wood, and building panels. Therefore, possibilities for structural improvement of KŠM for use in construction have been studied.

Thermal transmittance

Five different KŠM wall panel designs have been developed, for which theoretical calculations have been performed to assess the thermal transmittance coefficients according to the standard LVS EN ISO 6946 methodology.

The study was based on two panels – No. 1 and No. 2. In the case of panel No. 1, a two-layer KŠM was used, while in the case of the second prototype – a 4-layer KŠM with a lamella thickness of 28 mm was used. For all five panel prototypes, calculations were performed in a direction parallel to KŠM, covering on both sides with an 18 mm thick layer of solid pine wood.

The minimum required thickness of KŠM in the panel that meets the requirements of the building standard regarding the thermal conductivity coefficient has been calculated, resulting in panel prototype No. 3 with a KŠM thickness of 280 mm, covered on both sides with 18 mm thick pine wood layers.

The following calculations obtained optimal solutions for insulating prototypes of panels 1 and 2 with 112 and 92 mm thick mineral wool, respectively, obtaining values of the thermal conductivity coefficient of the wall structure according to the building standard LBN 002–01.

The obtained values were compared with the thermal conductivity coefficients of CLT and SIP panels and the requirements of the building standard.

Soundproofing

Two door leaf (1st and 2nd) structural solutions and three (3rd to 5th) wall panel structural solutions have been developed, to which large-sized samples have been made and airborne sound insulation values have been evaluated according to the methodology of the standards LVS EN ISO 140–3, LVS EN ISO 140–1, LVS EN ISO 717–1 and LVS EN ISO 10140–(1–5).

The door leaf samples were made of KŠM in perpendicular direction, glued on both sides with 4 mm thick high-density fibreboard, resulting in samples with a total thickness of 25 and 60 mm. In both cases, the height of the door leaf is 1972 mm and the width - 825 mm.

Three wall panel prototypes were made of KŠM in parallel direction, using KŠM with different number and thickness of lamellas (prototype 3 was made from four lamellas with a total thickness of 112 mm, prototype 4 – from 2 lamellas with a

thickness of 56 mm, while prototype 5 – from 4 lamellas with a total thickness of 72 mm). All wall prototypes were glued on both sides with 18 mm thick pine solid wood lamellas. The height of the wall panel prototypes is 3000 mm, and the width is 1150 mm. One large-sized sample was made and tested for each prototype.

The study assessed the impact of door panel thickness and wall panel design on the airborne sound insulation index. The obtained indices are considered indicative, they were compared with the values of the CLT panel sound insulation values and the limit values of the airborne sound insulation values of door and wall structures regulated by the building standard LBN 016–11.

Reaction to fire

With the aim of determining the possibilities of improving the reaction to fire values of KŠM by implementing constructive techniques, three large-sized prototypes of KŠM have been made and tested.

Two prototypes were made by gluing 17 and 52 mm thick KŠM in perpendicular direction with thermally thin (4 mm), high-density fibreboard, respectively designated 90H25 and 90H60. They are intended for use as lightweight structural partitions or door leaves. The thickness of the prototypes is 25 and 60 mm, respectively. In turn, for the third prototype, 56 mm thick KŠM is glued in parallel direction with 18 mm thick pine solid wood (designation 0P92) for use in load-bearing wall and ceiling panel structures, resulting in a panel with a total thickness of 92 mm.

The reaction to fire tests of all three panel prototypes were carried out using the standard LVS EN 13823 Single Burning Instrument (SBI) test method corresponding to the reaction to fire class D. A total of 5 large-sized samples were tested for 3 prototypes. The obtained indices are considered indicative.

As a result of the study, the effect of thermally thin and thermally thick panel outer layer materials on the potential reaction to fire parameters of building panels was assessed. The obtained values were compared with the reaction to fire parameters of solid wood and wood-based panel materials.

Mechanical properties

To determine the possibilities of improving KŠM with structural techniques, six prototypes of ceiling panels have been developed (designated in the study from A to F). The effect of the material of the outer layers, the direction of KŠM and the glued *ribs* on the 4 most important mechanical properties of the material – strength and elasticity modulus in four-point static bending, as well as compressive strength in parallel and perpendicular direction to the plane of the panels, has also been evaluated. The study used test methods of the standard LVS EN 408+A1.

In the prototypes of the panel coverings ABEF, the material is oriented in perpendicular direction, while in C and D – in parallel direction. In the panels ACE – 12 mm thick PW, and in the panels BDF – 20 mm thick pine solid wood is used as the outer layer material. In addition, pine solid wood *ribs* are glued into the panels A and B. 18 groups of samples with a total number of 144 samples were analysed. The total thickness of the prototypes glued with birch plywood is 136 mm, while in the

case of pine solid wood it is 152 mm. The width and length of the samples in the case of bending tests are 300 and 2500 mm, respectively. In the case of compression tests, it is 300×300 mm.

Panel orientation in the compression testing machine is presented in Fig. 2.5.



Fig. 2.5. Panel orientation in the compression testing machine:

1 – perpendicular to the panel plane; 2 – parallel to the panel plane.

The obtained strength and elasticity values have been compared with the mechanical properties of the strength classes of glued laminated timber, CLT and sawn timber.

3. CELLULAR WOOD MATERIAL PROPERTIES

3.1. Moisture

Moisture content is one of the most important parameters affecting the properties of wood and wood-based materials. Considering that the mass of KŠM consists of approximately 96% wood and 4% glue, the material was expected to have the same equilibrium moisture content as the wood from which KŠM is made.

After conditioning pine KŠM in a standard atmosphere at a temperature of 20 ± 2 °C and a relative humidity of the air of $65 \pm 5\%$, the average moisture content of 60 KŠM samples was 12.5% (ranging from 11.9 to 13.6%). The average equilibrium moisture content of pine KŠM of 12.5% after conditioning in a standard atmosphere does not differ significantly from the average moisture content of pine solid wood specified in DIN 68100–07 - 12.0% ($p > 0.05$).

After conditioning at a relative humidity of the air of 35 or 85% (at an air temperature of 20 °C), the average moisture values of the KŠM were 5.9 and 16.9%.

There is a close ($r = 1.00$) positive polynomial correlation of the second degree between the moisture content of KŠM and the relative humidity of the air at an air temperature of 20 ± 2 °C:

$$W = 0.00114RH^2 + 0.0838RH + 1.61, \quad (3.1.)$$

where W – moisture content of KŠM, %;

RH – relative humidity of the air, %.

This correlation is applicable in the range of relative humidity of the air from 30 to 85%.

The study found that the moisture content of KŠM at three relative humidity levels does not differ significantly from the moisture content of solid pine wood, therefore the wood equilibrium moisture diagram can also be used to expected the moisture content of KŠM depending on the relative humidity of the air humidity and temperature.

3.2. Density

The density of materials, like humidity, often has a direct effect on the physical, mechanical and physicochemical parameters of wood and wood-based materials, therefore, the density of wood-based materials was determined. The average density value of 308 kg m^{-3} (ranging from 277 to 332 kg m^{-3}) was determined for 60 cubic wood-based materials after conditioning in a standard atmosphere.

After conditioning at a relative humidity of 35 or 85% (at an air temperature of 20 °C), the average density values of the KŠM were 293 and 321 kg m⁻³.

The study resulted in a moderately strong ($r = 0.53$) positive linear correlation 3.2. for calculating the density of KŠM depending on KŠM moisture content:

$$\rho = 2.55W + 277.9, \quad (3.2.)$$

where ρ – density of KŠM, kg m⁻³;

W – moisture of KŠM, %.

The given correlation is applicable for calculating the density of KŠM made from 28 mm thick lamellas within the material moisture range of 6 to 17%.

According to the standard LVS EN 14358, lower 5% characteristic value of density ρ_k 285 kg m⁻³ is calculated. Additionally, it has been determined that increasing the thickness of KŠM lamellas from 18 mm to 28 mm significantly ($p < 0.05$) reduces the material's density, as the volume of grooves made into the lamellas increases in relation to the volume of wood.

The average density of KŠM of 308 kg m⁻³ is 38% lower than the average density of solid pine wood of 510 kg m⁻³ reported in the literature (Wagenführ, 1996). Compared to the density of wood-based panel materials (PW, OSB, PB and medium MDF) widely used in construction, the density of KŠM is 35 to 65% lower, see Fig. 3.1.

Only low-density fibreboard can have a density of up to 52% lower than that of KŠM. Density values of KŠM can be used to calculate the mass of KŠM and its building panels.

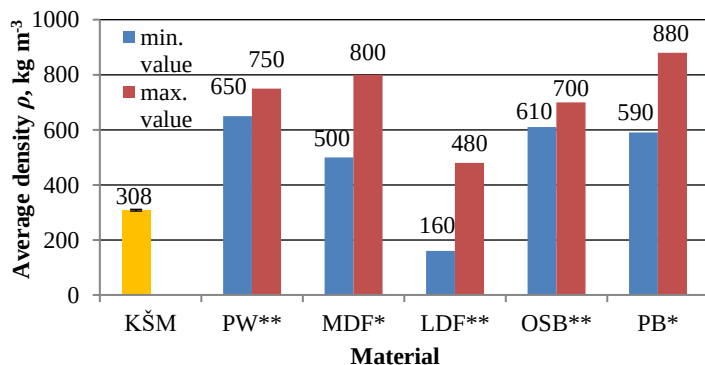


Fig. 3.1. Comparison of average density values of KŠM and wood-based panel materials:

see page 6 for explanation of abbreviations (*Bowyer u.c., 2003; **Lüsiņa u.c., 2007).

3.3. Shrinkage and swelling

Changes in relative humidity of the air within the range of 30 to 85% and the related changes in wood moisture within the range of 6 to 18% affect the changes in the dimensions of the cellular wood material. As the moisture content of KŠM increases or decreases, the dimensions of the cellular wood material increase or decrease linearly. For example, the effect of humidity on changes in the thickness of KŠM can be described by the following close ($r = 1.00$) positive correlation:

$$b = 0.752W + 291, \quad (3.3.)$$

where b – thickness, mm;

W – moisture content, %.

The correlation is only applicable to samples with a length of 300 mm and a cross-sectional dimension of 50 mm.

The calculated average shrinkage coefficient of the cellular wood material along the thickness of the material is $0.248 \% \%^{-1}$, while the swelling coefficient is $0.255 \% \%^{-1}$. The changes in the thickness of pine KŠM can be compared with the average value of the radial and tangential shrinkage coefficient of pine solid wood $0.22 \% \%^{-1}$ (Rijsdijk et al., 1994). The small difference in the coefficients can be explained by the greater presence of tangential boards along the thickness of the cellular wood material than radial boards.

The changes in the dimensions of KŠM along the width and length of the material are approximately ten times smaller than the changes in the thickness of the material. The calculated shrinkage coefficient of the cellular wood material along the length of the material is $0.0182 \% \%^{-1}$, while the swelling coefficient is $0.0183 \% \%^{-1}$. The corresponding coefficients along the width of the material: shrinkage coefficient $0.0245 \% \%^{-1}$ and swelling coefficient is $0.0246 \% \%^{-1}$. For practical calculations in the length and width of the material, using the average value of the shrinkage and swelling coefficients of length and width $0.021 \% \%^{-1}$ is recommended.

A comparison of the shrinkage coefficients of KŠM with the shrinkage coefficients of panel materials widely used in construction is presented in Figure 3.2. The shrinkage coefficients of KŠM along the length of the material of $0.018 \% \%^{-1}$ and along the width of $0.025 \% \%^{-1}$ are lower compared to the shrinkage coefficients of most panel materials in the longitudinal and transverse directions of the boards. Similar indices are shown only by cement-bonded wood fibreboards. Comparing the obtained shrinkage coefficient of KŠM along the thickness of the material of $0.25 \% \%^{-1}$, it is lower than that of such panel materials as plywood, particle boards and oriented strand boards along thickness. Approximately six times lower shrinkage coefficients are indicated for cement-bonded wood fibreboards, when shrinking in thickness.

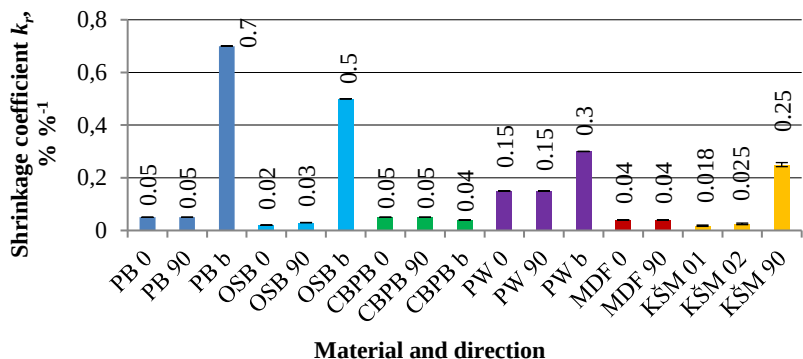


Fig. 3.2. Comparison of shrinkage coefficients of cellular wood material and wood-based panels (LVS CEN/TS 12872):

see page 6 for explanation of abbreviations.

The determined volume shrinkage coefficient of 0.275 % %⁻¹ for KŠM is 36% lower than the shrinkage coefficient of 0.42 % %⁻¹ (Wagenführ, 1996) for solid pine wood.

3.4. Water vapor permeability

The water vapor permeability properties of KŠM are summarized in Table 3.1. Six different types (thickness, number of layers and direction) of KŠM samples were tested. For each type of KŠM, samples were tested in both parallel and perpendicular directions.

Table 3.1.
Average water vapor permeability properties of KŠM

Sample type	Parallel direction		Perpendicular direction	
	Water vapour permeability index μ	Water vapour diffusion equivalent air layer thickness S_d , m	Water vapour permeability index μ	Water vapour diffusion equivalent air layer thickness S_d , m
2–25	14.4 (SD 2.10)	0.697 (SD 0.102)	5.44 (SD 0.617)	0.280 (SD 0.033)
4–18	21.1 (SD 6.07)	1.53 (SD 0.441)	4.31 (SD 0.255)	0.311 (SD 0.019)
4–28	15.5 (SD 2.20)	1.71 (SD 0.240)	6.53 (SD 0.762)	0.734 (SD 0.084)

As demonstrated in Table 3.1., when testing the material in parallel direction, the lowest average value of the water vapor permeability index (μ) of 14.4 was obtained for the KŠM samples made of two 25 mm thick lamellas, resulting in a total KŠM

thickness of 50 mm. The highest μ value of 21.1 was obtained for KŠM made from four 18 mm thick lamellas, forming KŠM with a nominal thickness of 72 mm. KŠM made from four 28 mm thick lamellas with a total nominal material thickness of 112 mm is characterized by an average value of the water vapor permeability index of 15.5. Comparing the confidence intervals of the average μ values of the three sample types, we can assume that the obtained indices for all three sample types do not differ significantly and for assessing the risk of critical surface moisture and internal condensation in structures, the average μ value of 17.0 of all nine samples can be used.

The structural solution of KŠM (with or without an air gap on the exposed external or internal material surfaces) has a significant impact on the water vapor permeability properties. For the thickness of four-layer KŠM layers ranging from 18 to 28 mm, no significant effect on the average value of the diffusion resistance coefficient was observed. Comparing the water vapor resistance diffusion equivalent air layer thickness S_d for two-layer KŠM (thickness 50 mm) with four-layer KŠM (thickness 112 mm), the S_d value increases 2.5 times – from 0.697 to 1.71 m. The significant difference can be justified by the non-overlapping confidence intervals of the average S_d value.

As demonstrated in Table 4.1, when testing the material in perpendicular direction, the lowest average value of the water vapor permeability index μ 4.31 was obtained for KŠM samples with a thickness of 72 mm, made of 18 mm thick lamellas. The highest average value of μ 6.53 was obtained for KŠM with an actual thickness of 112 mm, made of four 28 mm thick lamellas. The confidence intervals of the average μ and S_d values for all three sample types overlap, suggesting that the obtained indices do not significantly differ for all three sample types, and for assessing the risk of critical surface moisture and internal condensation in structures, the overall average water vapor permeability index of 5.42 for all nine samples can be used, while for material characterization, the average water vapor diffusion equivalent air layer thickness of 0.448 m can be used. A comparison of the water vapor permeability indices of KŠM made from 28 mm thick lamellas with the μ values of materials widely used in construction is presented in Fig. 3.3.

As demonstrated in Figure 3.3., the value of the water vapor permeability index of KŠM is 2.4 times lower in perpendicular direction of the material than in the parallel direction. Despite the air channels passing through KŠM in perpendicular direction, the material has significantly higher water vapor permeability properties than a stationary air layer. Accordingly, the μ value of the stationary air layer, as indicated in literature, is 1 – the same as for mineral wool. The μ value of the parallel direction of KŠM, namely 15.5, is 23% lower than the μ value of MDF - 20. Compared with the value of the water vapor permeability index of solid wood across the grain, the μ value of the parallel direction of KŠM is 3.2 times lower, and the value of the perpendicular direction is 7.7 times lower, respectively.

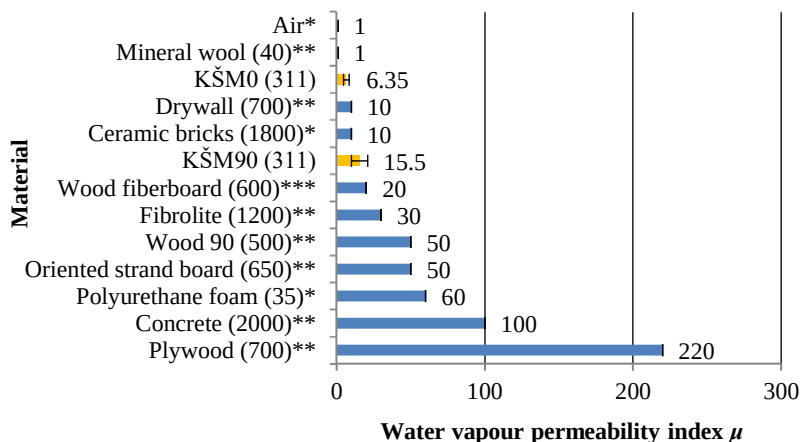


Fig. 3.3. **Comparison of water vapour permeability index of KŠM and other construction materials:**

in the brackets material density values are given, in kg m^{-3} . (Borodiņecs un Krēslīņš, 2007*; LVS EN ISO 10456**, LVS EN 13986***).

For fibreboard, oriented strand board, polyurethane foam and plywood, the μ value is from 1.9 to 14.2 times higher than for KŠM in parallel direction, as well as from 4.6 to 33.7 times higher than for KŠM in perpendicular direction.

The obtained water vapor permeability properties of KŠM can be used to assess the risk of internal condensation in structures made of KŠM. The indices allow for the thermally correct placement of materials in structures, placing materials with lower water vapor permeability on the warm side of the structure, while those with higher water vapor permeability on the cold side of the structure.

3.5. Thermal conductivity

KŠM in parallel direction is characterized by the thermal conductivity coefficient λ $0.0977 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (SD $7.07 \cdot 10^{-4}$; VAR 0.729), while in perpendicular direction of the material - $0.148 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (SD $21.2 \cdot 10^{-4}$; VAR 1.43). KŠM thermal conductivity coefficient in parallel direction is 34% lower than KŠM in perpendicular direction. This can be explained by the higher thermal conductivity of wood in grain direction rather than a cross direction of the grain. When evaluating the thermal properties of KŠM, it can be argued that KŠM in parallel direction is more efficient, from a thermal engineering perspective, for the manufacture of building structures, compared to the material in perpendicular direction.

The thermal conductivity coefficient of KŠM in parallel direction is 25% lower than that of solid pine wood in a cross direction of the grain, while in perpendicular

direction it is 14% higher than that of solid pine wood in a cross direction of the grain $0.13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (LVS EN ISO 10456).

The thermal conductivity coefficient of KŠM in parallel direction is lower than that of most wood-based panel materials used in construction, the density of which exceeds 500 kg m^{-3} . In perpendicular direction, the thermal conductivity is comparable with the thermal conductivity of solid wood in a cross direction of the grain, the thermal conductivity coefficients of oriented strand boards and fibreboards, see Fig. 3.4.

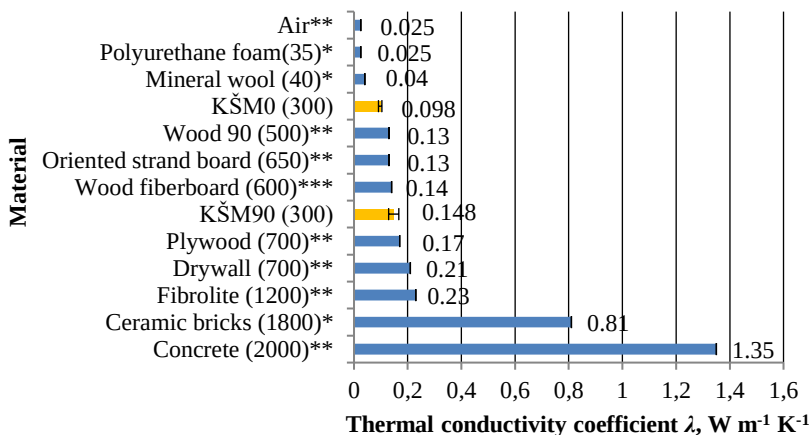


Fig. 3.4. Comparison of thermal conductivity coefficients of KŠM and other construction materials:

in the brackets material density values are given, in kg m^{-3} . (Borodņecs un Krēsliņš, 2007*; LVS EN ISO 10456**, LVS EN 13986***).

Direction of KŠM significantly affects λ . This can be explained by the significantly higher thermal conductivity of wood in the grain direction rather than in a cross direction of the grain. For example, for spruce wood, a cross-grain direction is characterized by $\lambda 0.11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, but in grain direction it is half as large, respectively $0.22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Niemz, 1993). KŠM in parallel direction provides 1.3 to 2.3 times lower λ than for panel materials widely used in construction and for a cross grain direction of the wood, while the obtained parameter is 2.5 to 4 times higher compared to λ of rock wool and polyurethane foam. The thermal conductivity coefficient determined in perpendicular direction of KŠM is comparable to λ of wood fibreboards and plywood, at the same time it is 13% higher than λ of solid wood and wood fibreboards. Compared to rock wool and polyurethane foam λ , the KŠM parameter is 3.8 to 6 times higher.

Based on the obtained thermal conductivity parameters, it can be concluded that KŠM in parallel direction can be classified as a thermal insulation material with a high thermal conductivity coefficient, since its $\lambda 0.0975 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} < 0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

¹ K⁻¹. KŠM in perpendicular direction exceeds the λ limit value of 0.1 W m⁻¹ K⁻¹ by 48%, as a result of which it cannot be classified as a thermal insulation material according to the standard DIN 4108-2. The obtained λ values can be used in thermal engineering calculations of various KŠM structures.

3.6. Reaction to fire

Four large-sized KŠM samples were tested in a single burning item (SBI) – three in parallel direction of the material and one (the burning power of the sample exceeds that allowed in the unit) sample in perpendicular direction of the material.

The testing of a KŠM sample in perpendicular direction in the SBI device was stopped 381 s after the start of the test, when the sample reached a maximum allowed burning power of 350 kW in the SBI device. The fire growth rate index (FIGRA) obtained during the test is 1426 W s⁻¹, while the total heat release in 600 s (THR_{600s}) is 108 MJ. The obtained value exceeds the FIGRA of the reaction to fire class D by 90% of 750 W s⁻¹. The obtained FIGRA value, when testing KŠM in perpendicular direction, does not allow it to be classified in reaction to fire class D. Classification of the material in the reaction to fire class D requires additional testing using a separate flame source test method. As a result of this test, it was also found that the KŠM sample in perpendicular direction does not meet the requirements for materials in the reaction to fire class D. The material is predicted to have the reaction to fire class E.

As a result of the KŠM test in the SBI device, when testing the material in parallel direction, the following results were obtained: FIGRA average value 696 W s⁻¹ (SD 39.0; VAR 6%) and THR_{600s} 58 MJ (SD 7.81; VAR 13%). The FIGRA average value is 7 % lower than the permissible limit value for the reaction to fire class D of 750 W s⁻¹. The FIGRA value of KŠM in parallel direction of 117% exceeds the FIGRA of pine wood 321 W s⁻¹ reported in literature (Mayes and Oksanen, 2003). Despite the fact that the area of KŠM exposed to fire is larger than in the case of solid wood, the FIGRA average values determined in the SBI device and the results of the test of a single flame source allow the material to be classified in the reaction to fire class D.

The burning capacity in perpendicular direction of the material is 105% higher than in parallel direction. This is due not only to the larger area of the material exposed to fire, perpendicular to direction of the material, but also to the additional oxygen supply through the material channels from the rear part of the sample.

A comparison of the fire growth rate indices of both directions of KŠM with the parameters of solid wood and panel materials reported literature is presented in Figure 3.5.

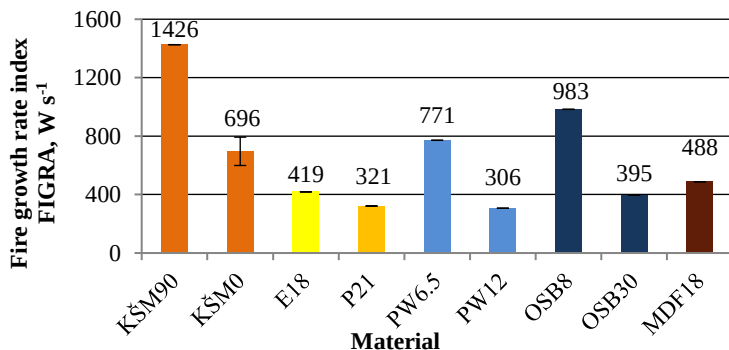


Fig. 3.5. **Comparison of fire growth rate index FIGRA of KŠM with wood-based panels and solid timber:**

see page 6 for explanation of abbreviations. Number after abbreviation – panel thickness in mm.

As presented in Fig. 3.5., the direction of KŠM and the thickness of the panel material have a significant impact on the reaction to fire parameters. As the material thickness decreases, the reaction parameters for the same material increase. The FIGRA value of 1426 W s⁻¹ determined in perpendicular direction of KŠM is 45 to 366% higher than for pine, spruce wood and panel materials widely used in construction. This can be explained by the constructively formed channels along the thickness of the material, which increase the burning area and oxygen supply to the burning zone.

The fire growth rate index of 696 W s⁻¹ for KŠM determined in parallel direction is 43 to 127% higher than the FIGRA value for thermally thick wood materials (thickness > 10 mm). In turn, it is 10 to 29% lower compared to thermally thin birch plywood and oriented strand board. This can be explained by the similarity of the material combustion (through-burning) for thermally thin materials and KŠM.

Considering the large difference between the reaction to fire parameters of KŠM and thermally thick materials, it is recommended for construction purposes to improve the reaction to fire properties of the material by means of structural techniques.

3.7. Mechanical properties

The average values of the mechanical properties of KŠM with their 5% characteristic values are summarized in Figures 3.6. and 3.7.

The mechanical properties of KŠM depend on the direction of the material. In perpendicular direction, the material exhibits higher strength values, but lower elastic modulus values, compared to the parallel direction of the material.

Analysing the strength parameters of KŠM, we can see that they range from 0.217 MPa (shear strength in parallel direction) to 2.15 MPa (bending strength in perpendicular direction), see Fig. 3.6.

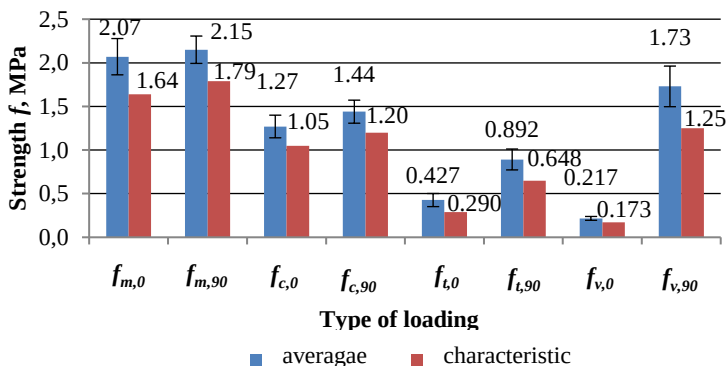


Fig. 3.6. **Average and characteristic strength values of KŠM:** see page 6 for explanation of abbreviations.

The bending strength of the two directions of KŠM does not differ significantly ($p > 0.05$) and ranges from 2.07 to 2.15 MPa. For engineering calculations, a lower 5% characteristic value of 1.64 MPa can be used. KŠM in parallel direction has shown significantly lower ($p < 0.05$) average strength parameters in compression, tension and shear, compared to perpendicular direction of the material.

The average compressive strength of 1.44 MPa and tensile strength of 0.892 MPa in perpendicular direction of the material are significantly ($p < 0.05$) higher than the corresponding values of 1.27 and 0.427 MPa in parallel direction of the material. The tensile strength values of both material directions are significantly ($p < 0.05$) lower than the compressive values. The shear strength of 0.217 MPa and the shear modulus of elasticity of 5.87 MPa in parallel direction of KŠM are the lowest mechanical properties of KŠM. In perpendicular direction, the shear strength and the shear modulus of elasticity are 8 to 16 times higher, 1.73 and 94.5 MPa, respectively.

The values of the strength values (compression, tension and shear) for design purposes must be selected separately for each direction of KŠM and each type of material loading.

Analysing the elasticity values of KŠM, we can conclude that they range from 5.87 MPa (modulus of elasticity in shear in parallel direction) to 179 MPa (local bending modulus of elasticity, when the material is loaded in parallel direction), see Figure 3.7.

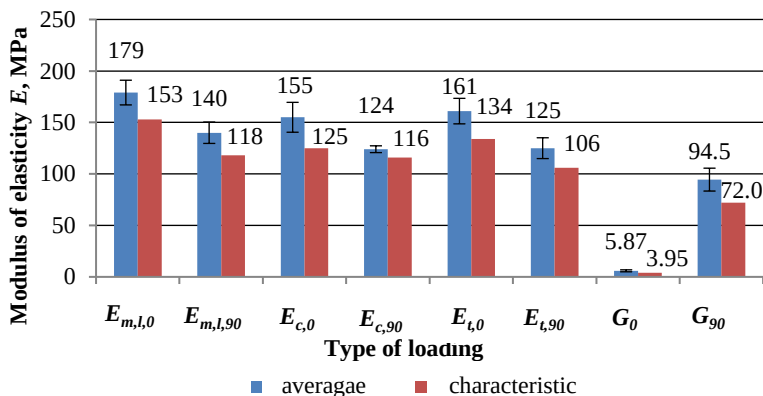


Fig. 3.7. **Average and characteristic modulus of elasticity values of KŠM:**
see page 6 for explanation of abbreviations.

The material average bending modulus of elasticity, when tested in parallel direction, is 179 MPa, but in perpendicular direction it is lower – 140 MPa. The corresponding characteristic values are 153 and 118 MPa.

The tensile moduli of elasticity 161 MPa and the compressive moduli of elasticity 155 MPa are higher than those in parallel direction of the material - 125 and 124 MPa, respectively. The values of the compressive moduli and the tensile moduli do not differ significantly when examining both directions of KŠM separately.

When loading KŠM in parallel direction in bending, compression and tension, significantly higher values of modulus of elasticity were observed, while when testing the material in shear, a significantly higher modulus of elasticity was found in perpendicular direction of the material ($p < 0.05$). For the design needs of KŠM products, the characteristic value specified in Fig. 3.7. should be chosen for each KŠM direction and elasticity property.

The average bending, tensile and compressive moduli of elasticity obtained in the study are 2 to 3 times lower compared to the average values of modulus of elasticity of C24 strength class sawn timber in the material perpendicular direction to the grain (370 MPa). The obtained average shear modulus of elasticity of softwood is 7 to 118 times lower compared to the average shear modulus of elasticity of C24 strength class sawn timber in the grain direction (690 MPa). A comparison of the mechanical properties of KŠM and softwood sawn timber is presented in Table 3.2 of Subsection 3.12.

3.8. Effect of sample size on mechanical properties

To evaluate the influence of the geometric dimensions and cross-sectional area of KŠM samples on the mechanical properties of the material, an extensive study was conducted, testing the material in parallel direction. The study confirms that, in certain cases, the geometric dimensions of the material and the cross-sectional area of KŠM have a significant influence on the strength and elasticity values of KŠM. The average values of the bending strength $f_{m,0}$ of KŠM obtained in the study range from 0.53 to 2.29 MPa, which are on average 20 to 50 times lower than for solid pine wood.

The interaction effect of the width and thickness of the samples on the ultimate bending strength $f_{m,0}$ of KŠM can be described by a linearly close ($r = 0.93$) positive correlation:

$$f_{m,0} = 0.055 + 0.003p + 0.006b, \quad (3.4.)$$

where p – width of specimen, mm;
 b – thickness of specimen, mm.

In turn, the average values of the local bending modulus of elasticity $E_{m,l,0}$ range from 33.3 to 156 MPa, which is approximately 100 times lower compared to solid pine wood.

The effect of the interaction of the thickness and width of the bending samples on the bending modulus of elasticity of KŠM can be described by a linearly close ($r = 0.88$) positive correlation:

$$E_{m,l,0} = -20.5 + 0.151p + 0.856b, \quad (3.5.)$$

where b – thickness of specimen, mm;
 p – width of specimen, mm.

It has been found that as the cross-sectional area of KŠM increases, the ultimate bending strength of the material increases significantly.

Similarly, the parameters and correlations that form between the geometric dimensions of KŠM, cross-sectional area, strength, and elasticity parameters in compression and shear have been obtained. The average values of the determined compressive strength $f_{c,0}$ of KŠM, when loading the material in parallel direction, range from 1.11 to 1.69 MPa, while the average values of the compressive modulus of elasticity range from 155 to 222 MPa.

The experimentally obtained average values of the shear strength $f_{v,0}$ of KŠM samples range from 0.19 to 0.22 MPa, while the average values of the shear modulus of elasticity G_0 range from 5.64 to 10.4 MPa. Similar to the previously discussed

methodology, the influence of the geometric dimensions and cross-sectional area of the samples on the shear strength and elasticity of KŠM has been analysed.

In total, the study has obtained 27 correlations for predicting mechanical properties of various KŠM depending on the geometric dimensions and cross-sectional area of the samples.

3.9. Screw withdrawal resistance

The screw withdrawal resistance (F_{sk}) within the range of screwing depths of 14 to 70 mm tends to increase, both when KŠM is oriented parallel to and perpendicular to the longitudinal axis of the screws. A greater increase is observed for screws that are inserted with the material oriented perpendicular to the longitudinal axis of the screw.

As the screwing depth of SPEC17 screws increases from 14 to 70 mm, $F_{sk,90}$ increases significantly ($p < 0.05$). There is a close ($r = 0.81$) positive linear correlation between the screwing depth and the screw withdrawal resistance, when the material is oriented in perpendicular direction:

$$F_{sk,90} = 34.3d_z + 559, \quad (3.6.)$$

where $F_{sk,90}$ – screw SPEC17 withdrawal resistance when screwed in perpendicular direction in KŠM, N;

d_z – screw in depth of SPEC17 screws, mm.

By increasing the screw insertion depth by 56 mm (from 14 to 70 mm), it is possible to achieve approximately 3 times higher screw withdrawal resistance by orienting the cellular wood material perpendicularly. When converting the screw withdrawal resistance to 1 mm, it's found that, with an increase in the screw insertion depth by 1 mm, $F_{sk,90}$ increases by an average of 34 N.

Also, in the cellular wood material parallel direction, the screw insertion depth in the range from 14 to 70 mm has a significant ($p < 0.05$) effect on the screw withdrawal resistance. There is a close ($r = 0.92$) linear correlation between the screw insertion depth and the screw withdrawal resistance:

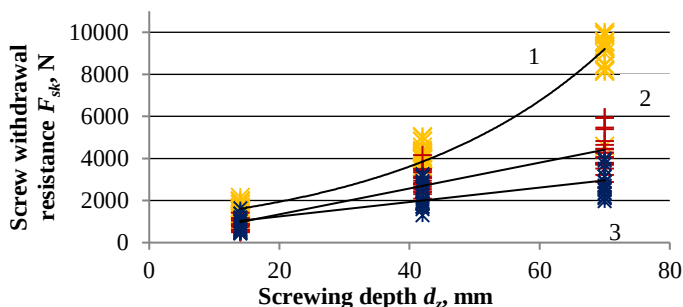
$$F_{sk,0} = 61.5d_z + 115.6, \quad (3.7.)$$

where $F_{sk,0}$ – screw SPEC17 withdrawal resistance when screwed in parallel direction in KŠM, N;

d_z – screw in depth of SPEC17 screws, mm.

By increasing the screw insertion depth by 56 mm (from 14 to 70 mm), it is possible to achieve approximately 5 times higher screw withdrawal resistance by

orienting KŠM parallelly to the longitudinal axis of the screw. It has been calculated that in this case, with an increase in the screw insertion depth by 1 mm, $F_{sk,0}$ increases on average by 61 N. Using SPEC17 screws, samples of solid timber were additionally manufactured and tested for the study, determining the screw withdrawal resistance in a cross direction of the grain. A comparison of F_{sk} values of KŠM and solid timber is shown in Figure 3.8.



3.8. att. **Comparison of screw withdrawal resistance values of KŠM compared to solid timber perpendicular to the grain:**

1 – from solid timber perpendicular to the grain; 2 – from KŠM0; 3 – from KŠM90.

As the screw insertion depth in solid timber increases, F_{sk} increases significantly ($p < 0.05$). The study also obtained a close ($r = 0.97$) positive exponential correlation for predicting $F_{sk,P,90}$ for solid timber depending on the screw insertion depth.

In all three cases of screw insertion depths, F_{sk} values of solid timber are 1.5 to 3.2 times higher than F_{sk} values of KŠM. The difference in all cases viewed is considered significant ($p < 0.05$).

In addition, the use of parameters such as screw diameter and drilling method in screw insertion was also examined, as well as the calculation of screw withdrawal resistance properties was performed.

Technological parameters such as screw insertion depth, screw insertion direction and screw insertion location in KŠM have a significant impact on the screw withdrawal resistance of KŠM. Increasing the diameter of the screws and using the predrilling method in screw insertion significantly increases the screw withdrawal resistance of KŠM.

3.10. Shear strength of glued joints

The glue plane joint of KŠM (zone 2) provides higher ($p < 0.05$) shear strength (f_v) values of 0.649 MPa (SD 0.145; VAR 22%), compared with the structural shear

strength of KŠM of 0.382 MPa (SD 0.284%; VAR 22%), which is determined parallel to the layers of KŠM, in the middle between two glue joints (zone 1).

In cases where f_v is determined perpendicular to the block plane of cellular wood material (zone 3) and f_v is determined by orienting the glue joint of cellular wood material at an angle of 90° to the shear plane (zone 4), the obtained average f_v values are significantly higher ($p < 0.05$), respectively 0.906 MPa (SD 123; VAR 14%) and 0.715 MPa (SD 0.118; VAR 17%), compared to the shear strength values of the glue joint.

The tests of the glue joint of KŠM have shown that the mechanical strength of the gluing of KŠM is higher than the structural strength of KŠM in some of its directions and zones. It is therefore possible to conclude that the mechanical strength of the glue joint is sufficient for the manufacture of KŠM panels. The average f_v values of KŠM in all directions are 4 to 10 times lower compared to the minimum permissible f_v of the plane joint of the glue laminated timber structure 4 MPa - according to the standard LVS EN 14080.

3.11. Gluability with other wood-based materials

As a result of the study, 158 samples of three-layer material have been tested in 12 groups with 11 to 15 samples per group.

The average values of the tensile strength perpendicular to the plane of the three-layer panel material $f_{t,apl}$ and the 95% confidence interval of the average values for samples glued with PUR and EPI glue are presented in Figure 3.8.

The highest tensile strength values, using PUR glue *Kleiberit 501*, are provided by cellular wood material covered with a layer of solid timber or birch plywood. The average tensile strength value is 1.0 MPa, and it does not differ significantly for both groups of materials ($p > 0.05$). When covering cellular wood material with pine (P) or ash (Os) timber and breaking it, the breaking mainly occurs along the glue line. This indicates that the gluing technology used in the study with the average gluing technological parameters recommended by the glue manufacturer cannot be assessed as optimal for gluing cellular wood material with P and Os timber. Polyurethane glue *Kleiberit 501*, whose technological parameters for gluing are as follows: glue application 150 g m^{-2} , pressing pressure 0.2 MPa, holding time under pressure 60 min., is suitable for covering cellular wood material with TMMBa, HDF, PW and OSB.

The highest tensile strength value of the three-layer material perpendicular to the plane of the panel is for samples glued with EPI glue (0.86 MPa), it has been obtained by covering KŠM₉₀ with PW. At the same time, this obtained average tensile strength value does not differ significantly from the cellular wood material glued with P, Os and TMMBa. Analysing the destruction type of the mentioned three-layer materials, we can conclude that when gluing cellular wood material with P timber, the

technological parameters of gluing used in the study can be improved, because destruction was most often detected along the glue joint. Glue application 170 g m^{-2} , pressure 0.2 MPa and holding time under pressure 60 min. are suitable for covering KŠM with Os solid timber, TMMBa, HDF, PW and OSB.

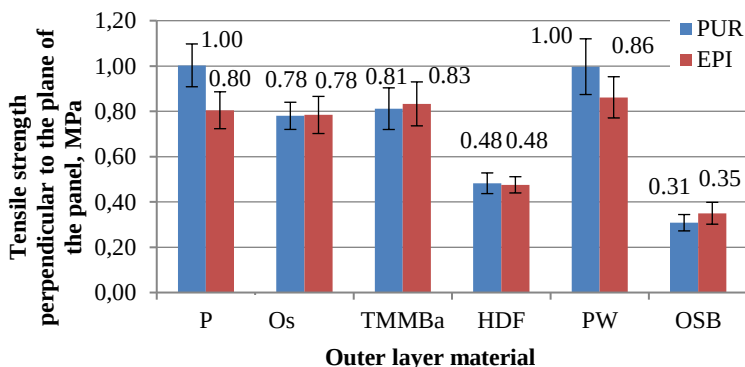


Fig. 3.8. **Average values of the tensile strength perpendicular to the plane of the three-layer KŠM panel bonded with different adhesives:**

Average values and their 95% confidence interval, see page 6 for explanation of abbreviations.

The use of EPI glue for the destruction of all three-layer materials, except for the one covered with solid timber, is characterized by the destruction of the material along the KŠM (Os, PW) or along the outer layer material (TMMBa, HDF, OSB).

The tensile strength of the uncovered KŠM in the direction perpendicular to the material is 0.89 MPa, which does not significantly differ from the obtained average values of the tensile strength of the covered materials for the samples, the destruction of which occurred mainly along the KŠM ($p > 0.05$).

Considering the tensile strength of KŠM in the direction parallel to the KŠM of 0.43 MPa, it can be stated that depending on the tensile strength of the material used for gluing, the tensile strength of the joint will be less than or equal to 0.43 MPa.

3.12. Summary of cellular wood material properties

To make it easier to navigate KŠM properties obtained in several studies, they are summarized in Table 3.2. Considering that all studies are mainly based on KŠM, the production of which uses 28 mm thick pine wood lamellas, the properties of this material are summarized and compared with the parameters of the solid pine timber or softwood.

Table 3.2.

Comparison of KŠM and solid pine timber properties

No.	Propertie	Unit	Cellular wood material		Pine solid timber	
			0	90	0	90
1	2	3	4	5	6	7
Physical properties						
1	moisture W	%	12.3		12.0 ¹⁾	
2	density ρ	kg m ⁻³	308		500 ¹⁾	
3	shrinkage coefficient k_r	% % ⁻¹	0.248	0.021	0.010 ²⁾	0.220 ²⁾
4	swelling coefficient k_b	% % ⁻¹	0.255	0.022	–	–
5	volume shrinkage coefficient k_v	% % ⁻¹	0.27		0.42 ²⁾	
6	water vapour permeability index μ	–	15.5	6.5	–	50.0 ³⁾
7	water vapour diffusion equivalent air layer thickness S_d	m	1.71	0.73	–	4.48 ³⁾
8	thermal conductivity coefficients λ	W m ⁻¹ K ⁻¹	0.097	0.148	0.300 ⁵⁾	0.130 ³⁾
Physicochemical properties and reaction to fire class						
9	fire growth rate index FIGRA	W s ⁻¹	696	1426	321 ⁴⁾	–
10	total heat release in 600 s THR _{600s}	MJ	58	108	23 ⁴⁾	–
11	reaction to fire class	–	D–s1, d0	E	D–s2, d0 ⁷⁾	–
Mechanical properties						
12	bending strength f_m	MPa	2.07	2.15	39.90 ⁸⁾	–
13	lower 5% characteristic value of bending strength $f_{m,k}$	MPa	1.64	1.79	24.00 ⁶⁾	–
14	compressive strength f_c	MPa	1.27	1.44	42.10 ¹⁰⁾	–
15	lower 5% characteristic value of compressive strength $f_{c,k}$	MPa	1.05	1.20	21.00 ⁶⁾	2.50 ⁶⁾
16	tensile strength f_t	MPa	0.427	0.892	16.000 ¹¹⁾	–
17	lower 5% characteristic value of tensile strength $f_{t,k}$	MPa	0.290	0.648	14.000 ⁶⁾	0.400 ⁶⁾
18	shear strength f_v	MPa	0.22	1.73	5.81 ⁹⁾	–
19	lower 5% characteristic value of shear strength $f_{v,k}$	MPa	0.17	1.25	4.00 ⁶⁾	–

Table 3.2. End

1	2	3	4	5	6	7
20	local modulus of elasticity in bending $E_{m,l}$	MPa	179	140	12500 ⁸⁾	370 ⁶⁾
21	lower 5% characteristic value of local modulus of elasticity in bending $E_{m,l,k}$	MPa	153	118	7400 ⁶⁾	–
22	compression modulus of elasticity E_c	MPa	155	124	11800 ⁸⁾	–
23	lower 5% characteristic value of compression modulus of elasticity $E_{c,k}$	MPa	125	116	7400 ⁶⁾	–
24	tensile modulus of elasticity E_t	MPa	161	125	11600 ⁸⁾	–
25	lower 5% characteristic value of tensile modulus of elasticity $E_{t,k}$	MPa	134	106	7400 ⁶⁾	–
26	shear modulus of elasticity G	MPa	6	95	690 ⁶⁾	–
27	lower 5% characteristic value of shear modulus of elasticity G_k	MPa	4	72	–	–
28	shear strength of glue joint f_{sl}	MPa	0.649	–	4.000 ⁷⁾	–
29	screw SPEC 17 withdrawal resistance when screwed to a depth of 70 mm $F_{s,90}$	N	4311	2811	–	9044
30	internal bond strength of covered cellular wood material $f_{t,apl}$	MPa	<0.427	0.311–1.000	–	–

¹DIN 68100; ²Wagenführ, 1996; ³LVS EN ISO 10456; ⁴Bukšāns, 2010; ⁵Niemz, 1993; ⁶LVS EN 338 for C24 strength class sawntimber; ⁷LVS EN 14080; ⁸Bacher un Krzosek, 2013; ⁹Ермолаева и.с., 1977; ¹⁰Малыгина ил Хавратова, 1980.

Chapter conclusions

1. The moisture content of KŠM directly depends on the relative humidity of the air. The moisture content of pine KŠM at the same microclimate parameters corresponds to the equilibrium moisture content of solid pine timber, therefore the timber equilibrium moisture content diagram can also be used to predict the moisture content of KŠM depending on the relative humidity of the air and temperature.
2. The density of KŠM depends on the relative humidity of the air and the moisture content of the material. The average density of pine KŠM is determined to be 308 kg m⁻³, which is 38% lower than the density of solid pine timber reported in the

literature. The difference between the density of KŠM and the density of wood-based panel materials is even greater.

3. Changes in humidity significantly affect the geometric dimensions and volume of KŠM. KŠM in parallel direction is characterized by a shrinkage coefficient of $0.248\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; it is comparable to the average value of the shrinkage coefficient of the radial and tangential directions of pine timber, $0.22\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. In perpendicular direction of the material, the shrinkage coefficient is $0.0214\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; it is 6 to 8 times smaller than for pine timber in tangential direction. Volume changes are characterized by a volumetric shrinkage coefficient of $0.275\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. They are 1.6 times or 36% smaller than for pine timber. Shrinkage coefficients in all three material directions are significantly lower compared to the shrinkage coefficients of most wood-based panel materials.
4. The direction of KŠM has a significant impact on the water vapor permeability properties. The unobstructed air flow through KŠM in perpendicular direction ensures a low water vapor diffusion resistance coefficient of 6.53, while the closed structure in the direction parallel to the material ensures 2.4 times higher water vapor diffusion resistance coefficient of 15.5. The determined water vapor diffusion resistance of the KŠM is lower compared to the water vapor diffusion resistance parameters of wood-based panel materials and solid wood widely used in construction.
5. The thermal conductivity coefficient of KŠM in parallel direction is $0.0977 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, while in the perpendicular direction of the material it is higher by $0.148 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. The thermal conductivity coefficient of KŠM in parallel direction is 25% lower than that of timber in a cross direction of the grain, while in perpendicular direction it is 14% higher than that of wood in a cross direction of the grain. The thermal conductivity of KŠM in parallel direction of the material is lower than that of most wood-based panel materials used in construction, the density of which exceeds 500 kg m^{-3} .
6. The fire growth rate index value of the perpendicular direction of KŠM (1426 W s^{-1}) is 105% higher than that of the parallel direction of the material (696 W s^{-1}), and the total heat release in 600 s is (108 MJ) 86% higher than that of the parallel direction of the material (58 MJ). The reaction to fire class D has been determined in parallel direction of KŠM with similar reaction to fire parameters as for thermally thin wood panel materials. The reaction to fire class E has been predicted in perpendicular direction of the material, and the determined reaction to fire parameters significantly exceed the reaction to fire parameters of solid timber and wood-based panel materials.
7. The mechanical properties of KŠM depend on the direction of the material. The determined strength values range from 0.217 MPa to 2.15 MPa. The average elastic modulus values are from 5.87 MPa to 179 MPa. Due to the reduction in the amount of material and the structural changes, the mechanical properties of KŠM are significantly lower than those of solid pine timber.

8. When loading KŠM in parallel direction, increasing the size of the samples significantly increases such mechanical parameters as bending strength and local bending modulus. Increasing the height significantly reduces the compressive strength, while changing the size does not have a significant effect and the shear strength and modulus of elasticity of the material remain the same.
9. KŠM glue plane joint is characterized by an average shear strength of 0.649 MPa – it is significantly higher than the structural shear strength of KŠM at the weakest point of the material of 0.382 MPa, but it is ten times lower than the minimum permissible shear strength of glue plane joints for glued laminated timber of 4 MPa.
10. Technological parameters such as screw insertion depth, screw insertion direction and screw insertion location in KŠM have a significant impact on the screw withdrawal resistance. Increasing the screw diameter and using the predrilling method for screw insertion significantly increases the screw withdrawal resistance.
11. When creating products in which KŠM is covered in perpendicular direction with wood-based panel materials, average tensile strength parameters perpendicular to the plane of the boards from 0.311 MPa to 1.00 MPa were obtained. For material covered in perpendicular direction, the tensile strength is lower than or equal to the KŠM structural tensile strength of 0.431 MPa.
12. The properties determined and summarized in the doctoral thesis provide an opportunity to perform engineering calculations and computer simulations for various products and structures designed from KŠM. The determined properties can be compared with the properties of other materials widely used in construction.

4. PROPERTIES OF IMPROVED PANEL PROTOTYPES

4.1. Thermal conductivity

As a result of the study, the values of the thermal conductivity coefficients of wall panels of various structural solutions have been calculated. For wall panels of types 1 and 2, the production of which uses 28 mm thick lamellas, significantly higher thermal conductivity coefficient values ($U = 0.98 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ and $0.63 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) than the U limit values for wall structures specified in the building code LBN 002–01 have been calculated. Thus, the use of the aforementioned panels without additional insulation in the construction of private houses and public buildings is not permissible.

For the prototype of panel 3, it has been theoretically calculated that the thickness of the inner layer of the panel, 280 mm, provides a U value of $0.30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, which meets the requirements of the building code LBN 002–01, so that the panel can be used as an enclosing external wall structure. However, the production of such wall panel is not profitable from several aspects: economic - material consumption and logistics; structural - which is associated with greater panel shear deformations, shrinkage and swelling. For this reason, the use of such thick KŠM panels without additional thermal insulation material in the construction of private houses and public buildings is not recommended. In order for the thinnest 92 mm panel of type 1 to meet the requirements of the building code regarding the U coefficient limit value of $0.25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, the specific wall panel must be supplemented with 112 mm thick thermal insulation material. In turn, the thickest 148 mm panel of type 2 is able to meet the requirements of the building code if it is additionally covered with 92 mm thick thermal insulation material. Based on the calculations performed, it becomes clear that covering KŠM panel with thermal insulation material ensures the values of the thermal conductivity coefficients required for the external wall structure specified in the building code.

The effect of the thickness of the thermal insulation material on the thermal conductivity coefficients of the prototypes of the KŠM wall panels is described by a close, calculated mathematical model with a fifth-degree polynomial correlation 4.1. (for the prototype of the 1st panel) and 4.2. (for the prototype of the 2nd panel), see Fig. 4.1:

$$U = -4 \cdot 10^{-12} \cdot s^5 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot s^4 - 10^{-6} \cdot s^3 + 0.0002 \cdot s^2 - 0.0189 \cdot s + 0.975, \quad (4.1.)$$

$$U = -10^{-12} \cdot s^5 + 10^{-9} \cdot s^4 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot s^3 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 - 0.0092 \cdot s + 0.627, \quad (4.2.)$$

where U – thermal transmittance coefficient, $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$;
 s – thickness of thermal insulation material, mm.

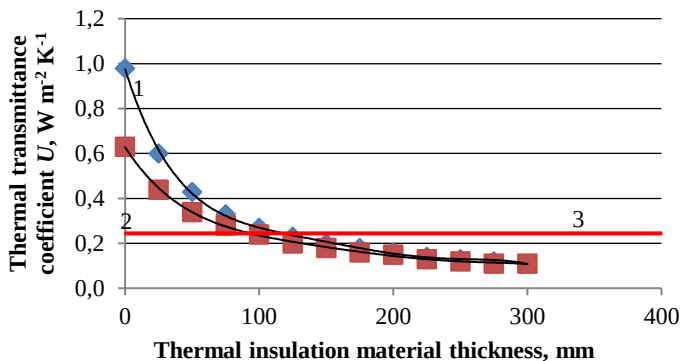


Fig. 4.1. Effect of thermal insulation material thickness on the thermal transmittance coefficient of KŠM0 wall panel prototypes:

- 1 – prototype of panel made of 56 mm thick KŠM0 and 18 mm solid wood in the outer layers;
- 2 – prototype of panel made of 112 mm thick KŠM0 and 18 mm solid wood in the outer layers;
- 3 – limit value of U for wall structures specified in the building code $0.25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (LBN 002–01).

The optimal solution for the construction of the external wall for Northern Europe is a three-layer KŠM panel with the parallel direction of KŠM in combination with thermal insulation material. For the full development of the wall construction, the 1st and 2nd wall panel prototypes must be supplemented with materials that improve the panel's resistance to fire, reduce the penetration of steam into the structure, as well as protect the structure from the effects of the climate in the form of sun, rain and wind, in order to meet all the requirements, set out in the building code.

A theoretical calculation of the thermal conductivity coefficient has also been performed for a 100 mm thick KŠM wall prototype, consisting of 64 mm thick KŠM and covered on both sides with 18 mm thick pine solid wood. The calculated thermal conductivity coefficient value U of such theoretical construction is $0.91 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, which is 4% or $0.04 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ lower than the thermal conductivity coefficient value of $0.95 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ for 100 mm thick three-layer KŠM panels. Using the thermal conductivity coefficients of 0.14 and $0.025 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ for oriented strand board and polyurethane foam material specified in the LVS EN ISO 10456 standard, the value U of a 100 mm thick SIP panel has been calculated to be $0.29 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. This panel is made of 78 mm thick polyurethane foam, which is glued on both sides with 11 mm thick oriented strand boards. The theoretical calculated value of the thermal conductivity coefficient of the SIP panel is $0.62 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ or 68% lower than that of the 100 mm thick uninsulated KŠM wall panel prototype.

Using the correlations obtained in the study, it is possible to calculate the thermal conductivity coefficients of the prototypes of the KŠM walls depending on the thickness of the mineral wool used. Based on the calculation methodology used in the study and the obtained thermo-dynamic properties of KŠM, it is possible to

perform computer simulations to predict the thermo-dynamic properties of the walls and ceilings made of KŠM.

4.2. Sound insulation

As a result of tests and calculations, the insulation index R_w for door panel prototypes with a thickness of 25 mm and 60 mm was determined to be 26 dB and 31 dB, respectively, while for wall panel prototypes – 33 dB (panel 92), 35 dB (panel 108) and 37 dB (panel 148).

The experimentally determined R_w value of 26 dB for prototype door panel 25 does not satisfy any of the limited limit values of the building code LBN 016–11 *Building Acoustics*, if the panel is used as a door leaf structure. The door leaf structure, depending on the building, room type and class, must ensure a R_w value within the range of 27 to 42 dB (LBN 016–11). This is limited by the resonance incidence within the range of 1250 to 1600 Hz.

The door panel prototype 60 has a sound R_w value of 31 dB, which is suitable for use in individual C class rooms with certain minimum requirements for sound insulation and for the separation of D class rooms or rooms in buildings in operation. The R_w improvement compared to panel 25 is provided by the increased area mass (+3 dB at low frequencies) and the reduction of resonance incidence in the 1250 to 1600 Hz range.

Potential uses for panel 60 according to LBN 016–11 include: doors between work areas and corridors, stairwells, halls, lobbies in office buildings; doors between an intensive care unit and a corridor in medical institutions; doors between classrooms, similar rooms and corridors in educational institutions; doors between group rooms or bedrooms and a corridor in preschool institutions.

Similar to the case of KŠM panels, none of the wall panel prototypes without addition of sound-insulating materials provide the LBN 016–11 limit values when the panel is used as a wall structure. This is limited by significantly lower sound insulation index values. Increasing the thickness of the KŠM wall panel from 56 mm (KŠM in 2 layers) to 112 mm (KŠM in 4 layers), with the same thickness of the outer layers of material of 18 mm, increases the sound insulation index by 4 dB – from 33 to 37 dB.

Sound insulation requirements for internal building enclosing structures in residential buildings range from 45 to 79 dB (LBN 016–11), depending on the building, room type and class.

Since the sound insulation requirements of building enclosing structures are higher than the obtained measurement results of wall panel prototypes, the sample material can be used as components (layers) of separating structures, performing sound insulation calculations of the complete structure, for the creation of which the parameters specified in this chapter can be used.

The prototypes of the KŠM building panels with a thickness of 92 mm and 108 mm provide similar sound insulation index values as a 100 mm thick three-layer KŠM panel²³. The R_w of the KŠM panel is 34 dB, while the prototypes of the KŠM wall panels – 33 and 35 dB, respectively. Similar solutions can be used to improve the sound insulation of the prototypes of the KŠM wall panels as for improving the acoustic properties of the KŠM panels.

To further improve the sound insulation properties of multilayer cellular wood material wall panels, it is recommended to conduct experimental studies with damping interlayers for gluing KŠM layers to each other and prototypes supplemented with special sound insulation materials.

The airborne sound insulation index values R_w of KŠM door and wall prototypes obtained in the study can be used in modelling the sound insulation properties of external and internal enclosing structures of building structures creating enclosing structures that comply with regulations.

4.3. Reaction to fire

The study assessed the possibilities of improving the reaction to fire parameters of KŠM with the structural or gluing method. KŠM is covered with high-density fibreboard or solid pine wood, which results in a reduced surface area exposed to the flame and limited access of additional oxygen to the combustion zone.

The FIGRA fire growth rate index obtained during the test for the 25 mm thick prototype 90H25 is 396 W s^{-1} , and the total heat release in 600 s $\text{THR}_{600\text{s}}$ is 28.7 MJ. The obtained FIGRA value is 47% lower than the fire growth rate index limit value of 750 W s^{-1} for reaction to fire class D. According to the obtained FIGRA value, the 25 mm thick KŠM panel meets the reaction to fire class D criterion. The SMOGRA value of the smoke growth rate of the mentioned panel is $2.4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, while the total smoke release $\text{TSP}_{600\text{s}}$ is 35.1 m^2 . The obtained values do not reach the smoke generation index s_1 limit values – SMOGRA $30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ and $\text{TSP}_{600\text{s}}$ 50 m^2 .

The average test parameters of the 90H60 samples of the 60 mm thick three-layer prototypes in the perpendicular direction of KŠM on the SBI device are as follows: FIGRA 403 W s^{-1} (SD 30.9; VAR 8%); $\text{THR}_{600\text{s}}$ 35.9 MJ (SD 5.32; VAR 15 %); SMOGRA $5.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (SD 6.4; VAR 128%) and $\text{TSP}_{600\text{s}}$ 32.6 m^2 (SD 5.9; VAR 18%). The 92 mm thick panel prototype 0P92, covered with pine timber, achieves a FIGRA value of 378 W s^{-1} and is characterized by a $\text{THR}_{600\text{s}}$ value of $12.9 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. The test results have determined a SMOGRA value of $2.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ and a $\text{TSP}_{600\text{s}}$ of 44.6 m^2 .

Considering the obtained values in the single burning item tests, the prototypes of the three-layer KŠM building panels are predicted to have the reaction to fire class D with a smoke generation index s_1 and a flaming droplet and particle index d_0 . Despite the fact that a significant decrease in reaction to fire parameters was found in the case of all three prototypes, only the panels with KŠM in perpendicular

direction have a reaction to fire class one class higher compared to uncovered KŠM with increase from class E to class D.

A comparison of the FIGRA fire growth rate indices of three-layer KŠM panel prototypes and uncovered KŠM can be seen in Figure 4.2.

Analysing Figure 4.2, it can be seen that covering KŠM with a high-density fibreboard and pine solid wood significantly reduces the fire growth rate index of the material. In the cases of 90H60 and 90H25 panel prototypes (covered with 4 mm thick HDF board), the fire development rate index has decreased by 3.5 to 3.6 times, while the fire growth rate index of the panel prototype 0P92 (covered with 18 mm thick pine solid wood) is decreased by 1.8 times. Based on these facts, it can be concluded that covering KŠM with solid wood and panel material significantly reduces the fire growth rate index of the material in both directions of the material.

In the outer layers of the prototypes, using thermally thin materials (thickness < 10 mm) with high density, it is possible to achieve similar reaction to fire parameters as using thermally thick materials with lower material density. For panel prototypes 90H25 and 90H60, compared to the uncovered KŠM in perpendicular direction, a decrease in THR_{600s} parameters by 3 to 3.6 times was also observed, while in the case of the prototype 0P92, compared to the KŠM THR_{600s} value in parallel direction, a decrease of as much as 4.5 times was observed. The corresponding KŠM THR_{600s} values in parallel direction are 58 MJ m^{-2} , while in perpendicular direction – 108 MJ m^{-2} .

Comparison of the fire growth rate indices of three-layer KŠM panel prototypes with the parameters of solid wood and panel materials reported in the literature is presented in Figure 4.3.

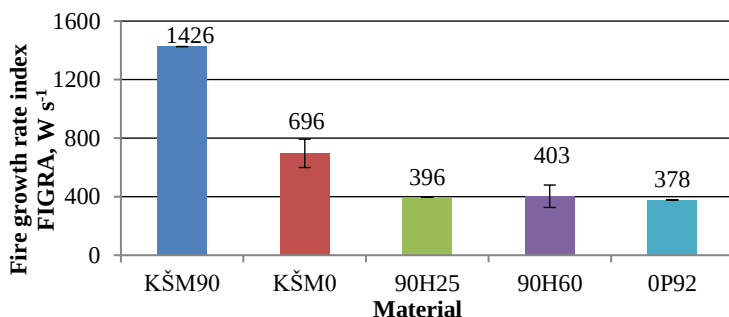


Fig. 4.2. Impact of structural improvement of KŠM on the fire growth rate index:

see page 6 and 21 for explanation of abbreviations. Number after abbreviation – panel thickness in mm.

The fire growth rate index of all three-layer KŠM prototypes is comparable with the fire growth rate index values of thermally thick spruce timber and OSB boards. When comparing the FIGRA value of the panel prototypes and thermally thin

plywood, as well as oriented strand board, it is 1.9 to 2.6 times lower for KŠM prototypes. For KŠM thicknesses of 17 and 52 mm in prototypes 90H25 and 90H60, there is no effect on FIGRA, since the fire growth rate index of prototypes 90H25 and 90H60 differs by only 2%.

The thinner prototype 90H25 has been found to have similar heat release in 600 s as thermally thick oriented strand board and medium density fibreboard. The thicker prototype 90H60 with the perpendicular direction of KŠM has shown a 14 to 17% higher THR_{600s} value than thermally thick OSB and MDF boards. The mentioned difference can be explained by the significantly higher amount of KŠM in the thicker prototype exposed to fire after the covering fibreboard has burned through. The heat release of prototypes 90H25 and 90H60 in 600 s is 21 to 50% higher compared to the thermally thick spruce and pine timber THR_{600s} .

For prototype 0P92 with KŠM in parallel direction and pine timber in the outer layer, a significantly lower THR_{600s} value of 12.9 MJ than for solid pine timber, panel materials and other panel prototypes was established. This circumstance can be explained by a greater thickness of the panel prototype and the associated higher heat capacity of the material.

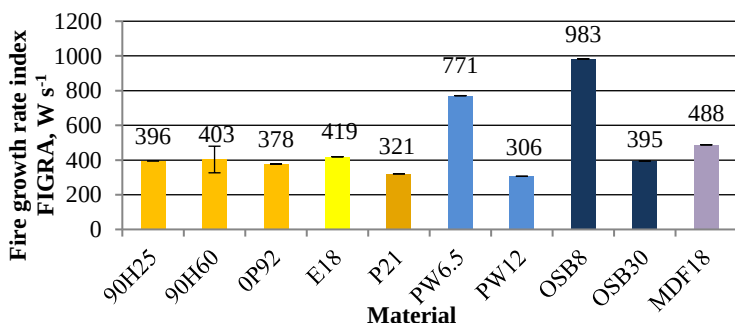


Fig. 4.3. **Comparison of fire growth rate index of three-layer KŠM prototypes and various wood materials:**

see page 6 and 20 for explanation of abbreviations. Number after abbreviation – panel thickness in mm.

The prototypes of KŠM panels analysed in the study can be used as a basis for the manufacture of building structures. In order for building structures made from KŠM to achieve a higher reaction-to-fire class than D, the panel prototypes must be supplemented with a layer of a difficult-to-burn or non-combustible material, for example, gypsum board with a reaction to fire class A2. This method is widely used to reduce the reaction to fire parameters of CLT and SIP panel building structures.

4.4. Mechanical properties

The average density of the developed covering panel prototypes is 15 to 24% higher than the density of KŠM. The average density values range from 363 kg m⁻³ (prototype D) to 404 kg m⁻³ (prototype A). The obtained average bending strength values are summarized in Figure 4.4.

Prototype B provides the highest average bending strength of 35.2 MPa, while the analogous prototype F without solid timber *ribs* provides an average strength of 32.2 MPa. Comparing the average values of both prototypes statistically, it was found that solid timber *ribs* do not significantly increase ($p > 0.05$) the bending strength values. In turn, if 12 mm birch plywood is used in the outer layers (prototypes A and E), solid timber *ribs* significantly increase the bending strength ($p < 0.05$).

Higher bending strength values were obtained for panels covered with 20 mm thick pine solid timber (prototypes B and F) compared to panels with outer layers covered with 12 mm thick birch plywood (prototypes A and E).

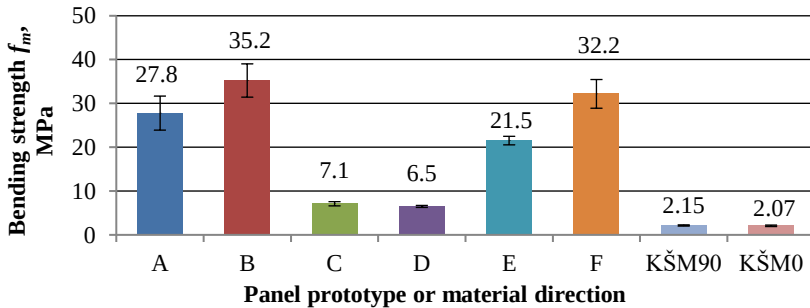


Fig. 4.4. Influence of panel design on panel bending strength: description of the panel prototypes, see page 21.

Panel prototypes C and D with parallel cellular material position demonstrated approximately three times lower average bending strength values compared to panel prototypes E and F, where the cellular material is positioned in a perpendicular direction. All structural panel prototypes showed 3 to 7 times higher bending strength values compared to the bending strength of KŠM. Prototypes A, B, E and F reached the bending strength values comparable to those of strength-graded solid wood.

The study also obtained and analysed the average local bending modulus values for the ceiling panel prototypes.

The highest values of modulus of elasticity were obtained for panels with solid wood in the outer layer and KŠM positioned in a perpendicular direction (prototypes B 11500 MPa and F 10900 MPa). The solid wood *ribs* in prototype B did not improve the local bending modulus of the panels compared to panel F without *ribs*. The

structural solutions for panels B and F achieved the elasticity values comparable to those of strength-graded solid wood.

For panels A and E with outer layers of 12 mm plywood, solid wood ribs glued therein (prototype A) significantly increased the bending modulus of elasticity of the panels ($p < 0.05$) compared to the panel without *ribs* (prototype E).

Panels with outer layers made of 20 mm solid wood (prototypes B, D and F) demonstrate higher average values of modulus of elasticity compared to panels made of 12 mm birch plywood outer layers (prototypes A, C and E).

Panel prototypes C and D with parallel cellular material direction showed significantly lower ($p < 0.05$) average values of bending modulus of elasticity compared to panel prototypes with perpendicular cellular material direction (prototypes E and F).

All structural panel prototypes demonstrated 29 to 82 times higher local modulus compared to the bending modulus of KŠM. Prototypes B and F reached elasticity values comparable to those of strength-graded solid wood.

According to the research conducted by Flaig and Blaß (2014), bending strength of 9-layer CLT panels is 36.5 MPa, while the local modulus of elasticity is 10260 MPa. The CLT panel values are comparable to the average bending strength values of KŠM panel prototypes B and F (35.2 and 32.2 MPa). The values obtained for the other four prototypes are significantly lower ($p < 0.05$). The local modulus of elasticity for panel prototypes B and F exceeds the average modulus of elasticity of the CLT panel by as much as 6 to 11%.

The compressive strength of the panel prototypes perpendicular to the panel plane ranges from 1.35 to 4.48 MPa, see Fig. 4.5. In turn, parallel to the panel plane, it ranges from 6.83 to 17.5 MPa.

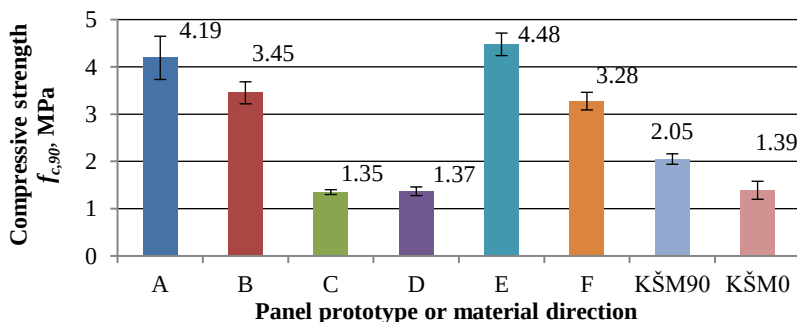


Fig. 4.5. Influence of panel design on panel compressive strength loaded in perpendicular direction:

description of the panel prototypes, see page 21.

The structural improvement of KŠM by laminating the material in a perpendicular direction significantly ($p < 0.05$) increases the compressive strength of

the panel prototypes in all four cases, however, laminating in a parallel direction does not affect the compressive strength of the panels ($p > 0.05$) when the prototype is tested perpendicular to the panel plane.

The highest compressive strength value perpendicular to the panel plane of 4.48 MPa was determined for panel prototype E, this prototype used KŠM with a perpendicular direction and birch plywood embedded in the outer layers.

When comparing the average compressive strength values of prototype E (without *ribs*) with the analogous panel A (with *ribs*), they do not differ significantly ($p > 0.05$) in the case when KŠM is glued in the perpendicular direction in the prototype and it is covered with plywood. Also, for prototypes B and F with KŠM perpendicular direction and outer layers of solid pine wood, no significant effect of *ribs* was observed ($p > 0.05$).

In panels with perpendicularly placed KŠM, significantly higher compressive strength values in perpendicular direction were achieved by using 12 mm thick PW in the outer layers (prototypes A and E). In the case of solid pine wood (prototypes B and F), the values are significantly lower ($p < 0.05$). KŠM embedded in parallel direction in the panels (prototypes C and D) demonstrates approximately 3 to 4 times lower compressive strength values compared to the panels in which KŠM is embedded in perpendicular direction (prototypes E and F). Comparing the obtained average compressive strength values for panels and KŠM, we can conclude that panels made of cellular wood material with perpendicular orientation (prototypes A, B, E and F) provide approximately 1.6 to 2.2 times higher compressive strength values when loaded in perpendicular direction than simple KŠM loaded in perpendicular direction (2.05 MPa). In turn, KŠM glued in parallel direction to the panels (prototypes C and D) does not significantly increase the compressive strength values of the panels compared to the compressive strength values of KŠM (1.39 MPa).

Similarly, the influence of the structural solution of the panel prototypes on the values of compressive strength parallel to the panel plane was analysed in a similar manner. In the case of all six panel prototypes, the values improve from 4 to as much as 10 times compared to the values of KŠM.

The average compressive strength values of panel prototypes A, B, E and F, when the panels are tested in perpendicular direction, range from 3.28 to 4.48 MPa, which is comparable with the average compressive strength values of KŠM panels perpendicular to the plane of the panels, range from 2.80 to 3.43 MPa.

The mechanical properties of KŠM can be significantly improved by covering the cellular wood material with outer layer material, choosing the appropriate location of the cellular wood material in the panel, or gluing solid wood *ribs* into the panels, having previously evaluated the loads applied to the panel and their directions.

For the design and modelling of load-bearing panels (ceiling panels), it is recommended to use the structural solution of the F panel prototype (panel with solid timber outer layers, KŠM with a perpendicular direction and without solid timber

ribs), while for the manufacture of self-supporting partitions and external walls, it is recommended to use the structural solution of the D panel prototype.

4.5. Panel prototypes – conclusions

1. Structural improvement of KŠM or covering with higher density wood materials significantly increases the density of the developed panels.
2. Building external wall structures only from KŠM and solid timber or panel materials is not justified from an aspect of thermal engineering. The resulting thermal conductivity coefficient value is comparable to the thermal conductivity coefficient values of cross-laminated timber (CLT) panels. In turn, it is higher than that of structurally insulated panels (SIP).
3. KŠM wall panels provide similar thermal conductivity coefficients as cross-laminated structural timber panels. To achieve the regulatory values of thermal conductivity coefficients, KŠM wall panels must be supplemented with thermal insulation material.
4. The developed door panel with a thickness of 60 mm and a sound insulation index of 31 dB can be used for the separation of a separate room in operation and a room with minimal sound insulation requirements.
5. The values of the sound insulation indices of the wall panel prototypes are comparatively much lower than those required for enclosing wall structures. However, they are comparable to the values of cross-laminated timber panels (CLT), thus analogous solutions can be used to improve them – as for improving the acoustic properties of CLT panels. The developed wall panel prototypes can be used as components (layers) of wall structures, the values established in the study can be used to create a sound insulation calculation model for the complete structure.
6. The covering or structural improvement of KŠM with solid wood or wood-based panel materials significantly improves the reaction to fire parameters of the material. The burning capacity of KŠM prototypes decreases by 3 to 4.5 times, and the fire growth rate index decreases by 1.8 to 3.6 times, allowing the developed door and wall panel prototypes to be classified in the reaction to fire class D. The reaction to fire parameters of KŠM three-layer panel prototypes are comparable to the reaction to fire reaction parameters of thermally thick wood and wood-based panel materials.
7. Covering KŠM with birch plywood or pine solid timber significantly improves the material's bending strength values, with an increase in values ranging from 3 to 16 times. The increase in moduli of elasticity is even more significant – ranging

from 20 to as much 82 times. The bending and compression values of individual panel prototypes reach the mechanical properties of strength-graded timber and cross-laminated timber panels.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Conclusions

1. Like other wood materials, KŠM is an anisotropic and hygroscopic material.
2. The following advantages of KŠM compared to other wood materials widely used in construction have been identified: lower density, smaller changes in linear dimensions and volume, lower water vapor diffusion coefficient and lower thermal conductivity coefficient in the direction parallel to the material. The increased reaction to fire values of the material and lower mechanical properties compared to solid timber and wood-based panel materials can be considered significant disadvantages of the material.
3. The research resulted in 23 correlations for calculating various KŠM parameters.
4. The physical, mechanical and physicochemical properties of KŠM are insufficient for the material to be used in construction. For this reason, the possibilities of structural improvement of KŠM have been studied. As a result, structural solutions of prototypes of 2 door leaves, 6 wall panels and 6 ceiling panels have been developed and tested, and their indicative properties have been evaluated and compared.
5. Structural improvement of KŠM by means of other materials improves the physical, physic-chemical and mechanical properties of KŠM, allowing KŠM to be used in construction as part of enclosing door, wall and ceiling panel constructions.
6. The established and summarized properties values provide the opportunity to perform engineering calculations and computer modelling for various products and structures designed from KŠM.
7. The two hypotheses put forward in the doctoral thesis: the properties of cellular wood material differ from the properties of solid wood and wood-based panel materials and the structural improvement of cellular wood material by means of the gluing technique significantly improves the physical, physic-chemical and mechanical properties of the material have been confirmed.

Recommendations

1. In order to obtain parameters of KŠM and its products comparable to other materials and building code requirements, it is recommended to use standardized testing methods.

2. The general equilibrium moisture diagram of wood can be used to predict the moisture content of KŠM depending on the relative humidity and temperature.
3. For practical calculations of forecasting changes in the dimensions of KŠM, depending on the level of relative humidity of the air, it is recommended to use the average value of the KŠM height shrinkage and swelling coefficient of 0.251 % %⁻¹, and the average value of the length and width shrinkage and swelling coefficients of 0.0214 % %⁻¹.
4. The values of KŠM shrinkage and swelling in length and width, as well as the mass of the material, are lower than those of solid pine timber and most wood-based panel materials, therefore KŠM is recommended for use in products and articles that require high dimensional stability and reduced mass during operation.
5. Technological parameters such as screw insertion depth, screw insertion direction and screw insertion location in KSM have a significant impact on the screw withdrawal resistance. Increasing the screw diameter and using the drilling method for screw embedment is recommended to increase the screw withdrawal resistance.
6. The effect of size of KŠM samples must be considered in calculations and modelling of the mechanical properties of the material, because depending on the type of load, changes in the size of the samples can have a significant impact on the mechanical properties of the material.
7. The use of fast-growing plantation tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis* W. Hill) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) for the production of KŠM material and its panels can be considered as an alternative based on both higher mechanical properties of the raw material and appropriate gluing quality.
8. For covering KŠM with solid timber and other wood materials, not only the thermoplastic polyvinyl acetate adhesive used so far, but also temperature and high humidity resistant polyurethane adhesive and emulsion polymer isocyanate adhesive can be effectively used.
9. To improve the properties of KŠM, it is recommended to use the structural improvement method, reducing the reaction to fire parameters of the structure, increasing the mechanical indices, eliminating the risk of condensation formation and ensuring the required heat conductivity coefficient for the external wall.

GRATITUDE

The author of the work expresses special gratitude to the supervisor – assoc.prof., *Dr.sc.ing.* Uldis SPULLE, for his unwavering support in the preparation of the doctoral thesis. Gratitude is expressed to colleagues at the “Latvia University of Life Sciences and Technologies” and the “Forest and Wood Products Research and Development Institute” Ltd. for their significant support in the implementation of the experimental research and substantive scientific discussions.

Special thanks to my family: my parents – Maija LASMANE and Imants IEJAVS – for their support and faith. My wife Inga IEJAVA and children Kristofers and Marta for their love, understanding and support throughout the writing of my doctoral thesis.