

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Materiālu un konstrukciju institūts

RIGA TECHNICAL UNIVERSITY
Faculty of Civil Engineering
Institute of Materials and Structures

Edgars LABANS

**SAPLĀKŠŅA SENDVIČA-KONSTRUKCIJAS
MULTIFUNKCIONĀLO ĪPAŠĪBU INTEGRĀCIJA UN
OPTIMIZĀCIJA**

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

**INTEGRATION AND OPTIMISATION OF
MULTIFUNCTIONALITY FOR PLYWOOD SANDWICH
CONSTRUCTION**

SUMMARY of the Doctoral Thesis

Zinātniskais vadītājs/Scientific supervisor:
Dr. sc .ing.
Kaspars KALNIŅŠ

**RTU Izdevniecība/RTU Press
Rīga 2016**

Labans E. Saplākšņa sendviča-konstrukcijas multifunkcionālo īpašību integrācija un optimizācija. Promocijas darba kopsavilkums.
– R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 44 lpp.

Labans E. Integration and Optimisation of Multifunctionality for Plywood Sandwich Construction. Summary of Doctoral Thesis.– R.: RTU Press, 2016. – 44 pp.

Iespiepts saskaņā ar RTU Materiālu un konstrukciju institūta 2015. gada 21. janvāra lēmumu, protokols Nr. 2.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Komisijas 7. ietvarprogrammas *MAPICC 3D (One-shot Manufacturing on large scale of 3D upgraded panels and stiffeners for lightweight thermoplastic textile composite structures)* finansiālu atbalstu. Darbs daļēji finansētas arī projektā *IMATEH (Innovative materials and smart technologies for environmental safety)* un ir saņēmis Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

This work has been supported by European Commission 7th Framework programme project MAPICC 3D (One-shot Manufacturing on large scale of 3D upgraded panels and stiffeners for lightweight thermoplastic textile composite structures). Thesis partially financed by IMATEH (Innovative materials and smart technologies for environmental safety) project as well as the European Social Fund within the project «Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University».

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTSINŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA
IEGŪŠANAIRĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTĒ**

**DOCTORAL THESIS HAS BEEN PROMOTED FOR OBTAINING DOCTOR'S
DEGREE IN ENGINEERING SCIENCES IN RIGATECHNICAL UNIVERSITY**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 6. aprīlī plkst. 14, RTU, Rīgā, Kalķu ielā 1, 119. auditorijā.

A Thesis to obtain a doctor's degree in engineering sciences is publicly defended on 6th April of 2015 at 14:00 in RTU, Riga, Kalķu Street 1, auditorium No. 119.

OFICIĀLIE RECENZENTI/OFFICIAL REVIEWERS

Lulea University of Technology
Dr. sc. ing. Jānis Vārna

Delft University of Technology
Prof. dr. Chiara Bisagni

Latvijas Universitātes Polimēru mehānikas institūts
Dr. sc. ing. Jānis Andersons

APSTIPRINĀJUMS/CONFIRMATION

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

I hereby declare that the Doctoral Thesis submitted for the review to Riga Technical University for the promotion to the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences is my own. Thesis has not been submitted to any other university for the promotion to other scientific degree.

Edgars Labans..... Datums/Date:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, astoņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 131 attēls, 30 tabulu, kopā 161 lappuse. Literatūras sarakstā ir 152 vienības.

The thesis has been written in English and includes: introduction and 8 chapters with conclusions, a total of 131 graphical figures, 30 tables, 161 text pages and a list of 152 references.

Saturs / Content

Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	5
Aizstāvēšanai izvirzīts.....	6
Darba zinātniskā novitāte.....	6
Praktiskais nozīmīgums	6
Pētījuma metodika.....	7
Publikāciju un konferenču sarakts	7
Darba saturs.....	9
Pirmā nodaļa.....	10
Otrā nodaļa	10
Trešā nodaļa	12
Ceturta nodaļa.....	14
Piektā nodaļa	16
Sestā nodaļa.....	16
Septītā nodaļa	18
Astotā nodaļa	20
Secinājumi.....	23
Introduction — Topicality of Research	24
The Aim of the Research	24
Thesis Statements to Be Defended.....	25
Scientific Novelty of the Research.....	25
Practical Importance of the Research Results	25
The Research Methodology	26
List of Publications and Conferences.....	26
Overview of the Doctoral Thesis	29
Chapter 1	29
Chapter 2	30
Chapter 3	31
Chapter 4	33
Chapter 5	35
Chapter 6	35
Chapter 7	37
Chapter 8	39
Conclusions	43
Kopsavilkuma atsauces/ References in the Summary of the Doctoral Thesis	44

Tēmas aktualitāte

Koksnes produktu eksports ieņem nozīmīgu lomu Latvijā ražotas produkcijas eksporta struktūrā (pēc Latvijas bankas datiem ~ 15 %). Relatīvi lielā mežu platība un attīstīta tranzīta infrastruktūra rada kokrūpniecību veicinošus apstākļus. Diemžēl lielākā daļa eksportētā materiāla ir neapstrādāta koksne (izejmateriāls) un produkcija ar zemu pievienoto vērtību, piemēram, orientēto skaidu plāksnes un skaidu plāksnes mēbelēm. Nākotnes attīstība koksnes apstrādes rūpniecības konkurētspējai būs cieši saistīta ar augstas pievienotās vērtības produktiem, kas atbilst sabiedrības vajadzībām nacionālā, reģionālā (Eiropas Savienības) un globālā mērogā.

Viens no potenciālajiem koksnes materiālu pētniecības virzieniem ir vieglu sendvičpaneļu veidošana, apvienojot vairākas materiālu grupas. Stiprības ziņā tie pielīdzināmi tradicionālajām saplāksnim, taču īpatnējais stingums un stiprība ir ievērojami efektīvāka. Papildus tam sendvičpaneļu ražošanas procesā ir iespējams integrēt multifunkcionālās īpašības: siltumizolāciju, vibrāciju, skaņu un triecienu slāpējošas īpašības. Īpaši būtiski tas ir norobežojošo konstrukciju veidiem, kam nepieciešama bieža transportēšana un pretestība dažādiem ārējās vides apstākļiem.

Videi draudzīgi kompozītmateriāli pašlaik ir viens no aktuālākajiem virzieniem ilgtspējīgas koksnes pētniecībā, tai skaitā — Latvijā, un to apliecinā Eiropas Savienības ietvarprogrammas projekti *WOOD-NET*, *BIOCOBSEPT*, *TREES4FUTURE* un daļēji arī *MAPICC 3D*. Pētījumi parāda, ka koksnes materiālu ražanai nepieciešams vismazākais energētiskais patēriņš (salīdzinot ar metālu un dzelzsbetonu). Tas savukārt samazina negatīvo ietekmi uz gaisa un ūdens kvalitāti gan ražošanas, gan ekspluatācijas un arī pārstrādes posmā. Turklāt zema blīvuma paneļa serde būtiski samazina koksnes materiālu patēriņu.

Darba mērķis un uzdevumi

Multifunkcionālo īpašību (siltuma, vibrāciju izolācijas, triecienu absorbcijas) integrēšana, augsta īpatnējā stinguma saplākšņa sendviča tipa paneļiem un metodoloģijas izstrāde kopējā ieguvuma palielināšanai, kas balstīta uz skaitlisko modelēšanu, eksperimentālo validāciju un optimizāciju.

Mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi uzdevumi.

1. Noteikt atsevišķu saplākšņa sendvičpaneļu komponenšu raksturlielumus (mehāniskos un termiskos), īpaši ņemot vērā atsevišķi vienvirziena orientētu finiera slāņu mehāniskās īpašības atkarībā no tehnoloģiskās apstrādes veida.
2. Izstrādāt aprēķina metodi ekvivalenta stinguma saplākšņa sendviča tipa paneļu (ar ribotu un viļņotu viduskārtu) atrašanai, kā references punktu izmantojot tradicionāla saplākšņa mehāniskās īpašības. Veikt šīs metodikas prognozēšanas spējas eksperimentālu verifikāciju.
3. Izstrādāt metodiku saplākšņu sendviča tipa paneļu optimālu šķērsgrīezuma parametru noteikšanai vairāku atbildes reakciju gadījumā, kas balstītsa uz Pareto optimalitātes frontes izmantošanu starp relatīvā stinguma, masas (blīvuma) un relatīvo siltumvadītspējas koeficientu.

4. Prototipēt sendvičpaneļus ar saplākšņa virsmām un termoplastiskas stiklašķiedras/polipropilēna serdi, izmantojot viena piegājiena ražošanas metodi, kā arī noteikt šo paneļu mehāniskās īpašības, izmantojot gan nesagraujošās, gan tradicionālās četru punktu lieces pārbaudes.
5. Novērtēt un klasificēt saplākšņa sendvičpaneļu biezuma, virsmu un serdes tipa ietekmi uz kopējo siltumvadītspējas koeficientu, vibrāciju un triecienu absorbcijas īpašībām.

Aizstāvēšanai izvirzīts

1. Aprēķina metodika un tās eksperimentāla validācija ekvivalenta stinguma sendvičpaneļu atrašanai, izmantojot skaitlisko modelēšanu un parametrisku optimizāciju ar virsmas atbildes (metamodelēšanas) metodi.
2. Metodika paneļu efektivitātes novērtēšanai vairāku atbildes reakciju gadījumā, izmantojot Pareto optimuma frontes līknes un metamodelēšanas tehniku.
3. Pirmoreiz izgatavotu jauna tipa sendvičpaneļu ar vilņota termoplastiska kompozīta serdi un saplākšņa ribu ar putu serdes pildījuma fizikālo, mehānisko un triecienu īpašību salīdzinājumu, kā arī vibrāciju slāpēšanas un triecienizturības novērtējums.

Darba zinātniskā novitāte

Balstoties uz metamodelēšanas metodiku un parametrisko optimizāciju, izstrādāta metode kopējā ieguvuma novērtēšanai, kas matemātiski balstīta uz Pareto optimuma frontes principiem gadījumā, ja ir jānovērtē vairākas atbildes reakcijas.

Metode ir aprobēta nākamās paaudzes sendvičpaneļu izstrādei. Kombinējot koksnes un termoplastiska stikla šķiedru kompozītmateriālu, pirmo reizi izgatavots inovatīvs saplākšņa sendvičpaneļa prototips ar vilņotu serdi. Papildus validētas vadlīnijas šo paneļu kvalitātes kontrolei, izmantojot nesagraujošās kvalitātes novērtēšanas metodi. Noteikta dažādas konfigurācijas sendvičpaneļu triecienu izturība.

Praktiskais nozīmīgums

Darbā iegūtie rezultāti ļauj projektēt vieglas un multifunkcionālas saplākšņa sendviča tipa konstrukciju plātnes, kas ir vairākos fizikālos parametros efektīvāka alternatīva tradicionālam viendabīgam koksnes materiālam un liela biezuma saplākšņa plātnēm.

Verificētā skaitliskā aprēķina metodika ļauj precīzi prognozēt relatīvās deformācijas un spriegumus katrā saplākšņa slānī, izmantojot vienvirziena šķiedru mehāniskās īpašības.

Izstrādātais stalažu klāja prototips apstiprina atrasto kompromisu starp optimālu paneļa masu, stingumu un triecienizturību. Metodes aprobācijai veikta paneļa plātnes prototipēšana un pilna mēroga izraušanas tests *Renault smagās mašīnas* sēdekļa plātnei.

Pētījuma metodika

Saplākšņa daudzslāņu konstrukciju aprēķins un parametriskā optimizācija balstīta uz komerciāli pieejamo galīgo elementu metodes datorprogrammu *ANSYS*. Eksperimentu plāna izveidei izmantota *EDAOPT* programmatūra, un eksperimentu plāni publiski pieejami: <http://213.175.94.108/designDB/search.php>. Atbildes reakciju aproksimācijai ar nepilnas pakāpes polinomiskām funkcijām, tajā skaitā *ABFC (Adaptive Basis Function Construction)* metodi, kas integrēta *VARIREG* datorprogrammā. Mehāniskās pārbaudes stiepes un lieces slogojuma gadījumiem veiktas, izmantojot servohidraulisko *INSTRON 8802* testēšanas iekārtu. Papildus datu iegūšanai vienlaikus tika izmantoti arī *HBM* lineāri mainīgās pretestības deformāciju mērītāji un pielīmējami tenzorezistori. Siltumvadītspējas koeficiente noteikšanai tika izmantota *LINSEIS HFM 200* iekārta. Pašsvārstību frekvenču, svārstību formas un svārstību dzišanas koeficiente noteikšanai tika izmantots *POLYTECH PSV400* dinamiskās lāzerskenēšanas aprīkojums (frekvenču diapazons 0–20 kHz). Trieciena testi tika veikti ar iekārtu *INSTRON DYNATUP 9250HV*, darbības diapazons 0–1600 J. Datu apstrādei izmatota dažāda programmatūra: *MS OFFICE*, *SIGMA PLOT*, *MATLAB*, *CATMAN EASY*, *INSTRON BLUEHILL*, *IMETRUM VIDEO GAUGE*, *PYTHON GUI*.

Publikāciju un konferenču sarakts

Labans, E., Kalniņš, K. Experimental Validation of the Stiffness Optimisation for Plywood Sandwich Panels with Rib-Stiffened Core. *Wood Research*, 2014, Vol.59, Iss.4, pp.793–802. (indexed in ISI Web of Science).

Labans E., Kalnins K., Zudrags K., Rudzite S. High-performance plywood/GF/PP textile composite sandwich panels developed during MAPICC 3D Project. Proceedings of the 5th International conference on Intelligent Textiles and Mass Customization. Morocco, Casablanca, 4–6 November, 2015 (on CD).

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K., Rudzīte, S., Kirpluks, M., Cabulis, U. Evaluation of plywood sandwich panels with rigid PU foam-cores and various configurations of stiffeners. In: Proceedings of the 3rd International conference on Optimization and Analysis of Structures, Estonia, Tartu, 23–25 August, 2015, pp. 45–51.

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K. Stiffness Analysis of Sandwich Panels with Corrugated Plywood and GFRP Core. In: *Shell Structures: Theory and Application: Proceedings of the 10th International Conference «Shell Structures, Theory and Applications» (10th SSTA 2013)*, Poland, Poznan, 16–18 October, 2013. London: Taylor&Francis Group, 2014, pp. 539–542. (indexed in ISI Web of Science and SCOPUS).

Labans, E., Kalniņš, K., Bikovs, A. Simulation of Mechanical and Thermal Properties for Sandwich Panels with Cellular Wood Cores. In: The Eighth International Conference on Engineering Computational Technology: Civil-Comp Proceedings 100, Croatia, Dubrovnik, 4–7 September, 2012 (on CD) (indexed in SCOPUS).

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Versus Experimental Investigation of Plywood Sandwich Panels with Corrugated Core. In: Civil Engineering '11: 3rd International Scientific Conference: Proceedings, Latvia, Jelgava, 12–13 May, 2011. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2011, pp. 159–165(indexed in SCOPUS).

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Modelling and Experimental Validation of Dendrolight Cellular Wood Material. In: The 8th Meeting «Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)»: Proceedings, Lithuania, Kaunas, 13–14 September, 2012. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2012, pp. 177–184.

Labans, E., Kalniņš, K. Optimal design practice for plywood sandwich panels // Proceedings of the 9th ASMO UK / ISSMO conference on Engineering Design Optimization, Ireland, Cork, 5–6 July, 2012. Cork: 2012, pp. 71–79.

Labans, E., Kalniņš, K. Non-Contact Measuring System ARAMIS for Sandwich Panels Research. Proceeding of the 16th scientific students conference «Human-Environment – technologies», Latvia, Rezekne, 25–25 April, 2012. pp. 396–405.

Labans, E., Kalniņš, K., Ozoliņš, O. Experimental and Numerical Identification of Veneers Mechanical Properties. Construction Science. Vol. 11, 2010, pp. 38–43. ISSN 1407-7329.

Darba rezultāti publicēti šādās konferencēs.

Labans E., Kalnins K., Zudrags K., Rudzite S. High-performance plywood/GF/PP textile composite sandwich panels developed during MAPICC 3D Project. 5th International conference on Intelligent Textiles and Mass Customization. Morocco, Casablanca, 4–6 November, 2015.

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K., Rudzīte, S., Kirpluks, M., Cabulis, U. Evaluation of plywood sandwich panels with rigid PU foam-cores and various configurations of stiffeners. 3rd International conference on Optimization and Analysis of Structures, Estonia (OAS2015), Tartu, 23–25 August, 2015.

Labans, E., Kalnins, K., Zudrags, K. Stiffness Analysis of Sandwich Panels with Corrugated Plywood and GFRP Core Shell Structures: Theory and Application: (10th SSTA 2013), Poland, Poznan, 16–18 October, 2013.

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Versus Experimental Investigation of Wood based panels with plywood and GFRP composite components. Civil Engineering '12: 4th International Scientific Conference, Latvia, Jelgava, 12–13 May, 2013.

Labans, E., Kalniņš, K. Investigation of Wood Based Panels with Plywood and GFRP Composite Components. Civil Engineering '13: 4th International Scientific Conference, Latvia, Jelgava, 16–17 May, 2013.

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K. Stiffness Analysis of Sandwich Panels with Corrugated Plywood and GFRP Core. Shell Structures: Theory and Application: 10th International Conference (10th SSTA 2013), Poland, Poznan, 16–18 October, 2013.

Labans, E., Kalniņš, K., Bikovs, A. Simulation of Mechanical and Thermal Properties for Sandwich Panels with Cellular Wood Cores. The Eighth International Conference on Engineering Computational Technology, Croatia, Dubrovnik, 4–7 September, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Optimal design practice for plywood sandwich panels // Proceedings of the 9th ASMO UK / ISSMO conference on Engineering Design Optimization, Ireland, Cork, 5–6 July, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Modelling and Experimental Validation of Dendrolight Cellular Wood Material. The 8th Meeting «Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)», Lithuania, Kaunas, 13–14 September, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Non-Contact Measuring System ARAMIS for Sandwich Panels Research. 16th International scientific students conference «Human-Environment – technologies», Latvia, Rezekne, 25–25 April, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Versus Experimental Investigation of Plywood Sandwich Panels with Corrugated Core. Civil Engineering '11: 3rd International Scientific Conference: Proceedings, Latvia, Jelgava, 12–13 May, 2011.

E. Labans, K. Kalniņš, Optimum design guidelines for plywood sandwich panels, OAS2011 – Optimization and Analysis of Structures, Tartu, Estonia, 25–27 August, 2011.

E. Labans, K. Kalniņš, Elaboration of design guidelines for all-plywood sandwich panels, IAWS, Stockholm, Sweden, 31 August–2 September, 2011.

E. Labans, K. Kalniņš. Numerical and experimental investigation of plywood sandwich panels, RTU 52nd International scientific conference, 13 October, 2011, Riga.

E. Labans, K. Kalniņš, K. Zudrags, Testing and simulation of plywood sandwich panels with corrugated core, Wood Science and Engineering 6th meeting, Tallinn, Estonia, 21–22 October, 2010.

Labans, E., Kalnins, K., Ozolins, O. Experimental and Numerical Identification of Veneers Mechanical Properties. RTU 51st International scientific conference. Latvia, Riga, 12 October, 2010.

Darba saturs

Pirmajā nodaļā ir publicēts literatūras apskats komerciāli pieejamiem saplākšņa materiāliem un sendvičpaneļiem, kā arī jauniem daudzslāņu koksnes materiāliem, kas šobrīd vēl atrodas izpētes stadijā. Otrajā nodaļā veikta mehānisko un termisko īpašību noteikšana atsevišķām paneļu komponentēm. Trešajā nodaļā apskatīta optimizācijas metodika augsta īpatnējā stinguma saplākšņa paneļu optimizācijai, kas balstās uz skaitliski iegūtiem mehāniskās darbības robežstāvokļu rādītājiem un aproksimāciju metāmodeļiem. Ceturtajā nodaļā apskatīta jauna sendvičpaneļa ar saplākšņa virsmām un viļņotu termoplastiska kompozītmateriāla serdi prototipēšana, skaitliskā modelēšana un eksperimentālās lieces pārbaudes. Piektajā nodaļā ir pētītas bezkontakta deformāciju mērišanas priekšrocības, kā paraugu izmantojot sendvičpaneļus ar šūnveida koksnes serdi. Sestajā nodaļā doti aprēķina pamatprincipi vieglu un vienlaikus siltumefektīvu saplākšņa paneļu projektēšanai. Septītajā nodaļā ir veikta salīdzinošā analīze, eksperimentāli nosakot svārstību dzišanas koeficienti paneļiem ar dažādiem serdes tipiem. Astotajā nodaļā ir apskatīta saplākšņa paneļu un references plātnu triecienizturība.

Pirmā nodaļa

Literatūras pārskatā tika apkopota informācija par saplākšņa un sendvičpaneļu ar koksnes komponentēm fizikālajām, mehāniskajām, siltumizolējošām, vibrāciju un trieciena absorbcijas īpašībām.

Kā zināms, saplākšņa ražošana ir viens no ekonomiskākajiem koksnes apstrādes veidiem, nemot vērā nelielo materiālu zudumu. Atšķirīgu sugu koksne var tikt izmantota kā izejmateriāls saplākšņa ražošanai, taču ziemeļu reģionā augošais sudraba bērzs (*Betula Pendula*) nodrošina augstākos mehānisko īpašību rādījumus, salīdzinot ar citiem komerciāli pieejamiem saplākšņiem [1].

Ir neskaitāmi dokumentēti pētījumi saplākšņa īpašību uzlabošanai, būtiski nemainot tradicionālo saplākšņa struktūru. Piemēram, atsevišķu saplākšņa kārtu sapresēšana pirms līmēšanas samazina līmes patēriņu, kā arī palielina saplākšņa blīvumu un līdz ar to uzlabo mehāniskās īpašības [2, 3]. Termiski apstrādājot saplāksni ir iespējams būtiski palielināt šā materiāla bioloģisko, termisko izturību un dimensiju stabilitāti, tajā pašā laikā vājinot mehāniskās īpašības [4]. Līmes ķīmiskā sastāva maiņa spēj samazināt fenola-formaldehīda kaitīgos izgarojumus vai arī novērst tos vispār, taču šis solis vienlaikus palielina līmvielas izmaksas [5]. Savukārt koksnes sendvičpaneļu pētniecība zinātniskajā literatūrā ir salīdzinoši maz dokumentēta. Industriālie pētījumi jaunu sendvičpaneļu radīšanai, izmantojot koksnes produktus, galvenokārt ir vērsti uz koksnes pārstrādes atlikumu (skaidu, zaru, mizas) efektīvu izmantošanu [7] pārsegumu plātņu montāžas ātruma pilnveidošanai [8], kā arī fasāžu paneļu ar zema blīvuma koksnes šķiedru serdi izstrādei [9, 10].

Komerciāli pieejamie sendvičpaneļi galvenokārt ir paredzēti zemas mehāniskās veikspējas lietojumiem interjera un starpsienu izveidē [11], atsevišķi risinājumi ir paredzēti arī lielu laidumu pārsegšanai ar viegliem paneļiem [12].

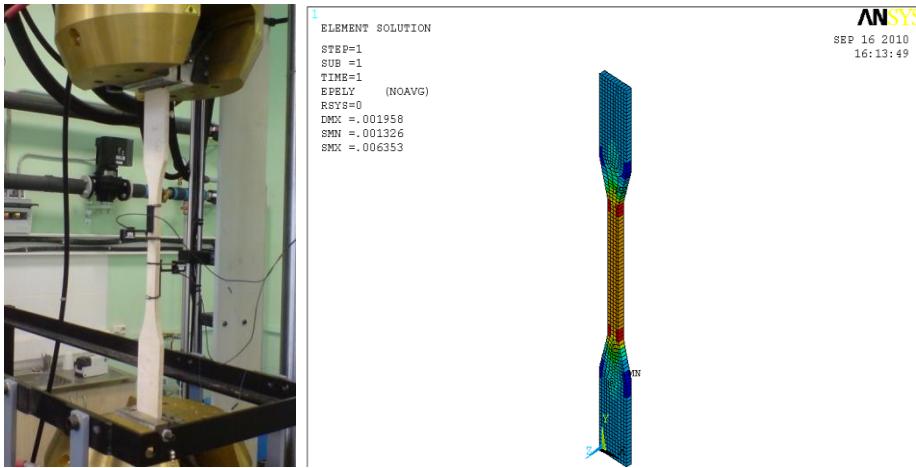
Pētījumi sendvičpaneļu multifunkcionālo īpašību integrēšanai galvenokārt koncentrējas uz stinguma un siltumizolācijas īpašību optimizēšanu [13, 14], kā arī metožu izstrādi paneļu siltumvadītspējas īpašību prognozēšanai [15]. Vairāku materiālu apvienojums dot labvēlīgu ietekmi, apskatot vibrāciju slāpēšanu salīdzinājumā ar homogēnu materiālu [16]. Trieciena izturība sendvičpaneļu gadījumā parasti ir vājāka nekā tāda paša biezuma viena veida materiālam, taču padevīgās serdes dēļ daļa no trieciena energijas tiek absorbēta [17].

Nemot vērā daudzu mainīgo lielumu ietekmi uz sendvičpaneļu veikspēju un to plašo vēlamās funkcionalitātes spektru, izmantojot analītisko vai skaitlisko modeli, ir atzīta par vienu no efektīvākajiem veidiem maksimālās/sabalansētās veikspējas sasniegšanai. Pastāv vairākas piejas, kā novērtēt kopējo ieguvumu vairāku atbildes reakciju gadījumā, taču par vienu no uzskatāmākajām ir atzīta tieši Pareto optimuma fronte [18].

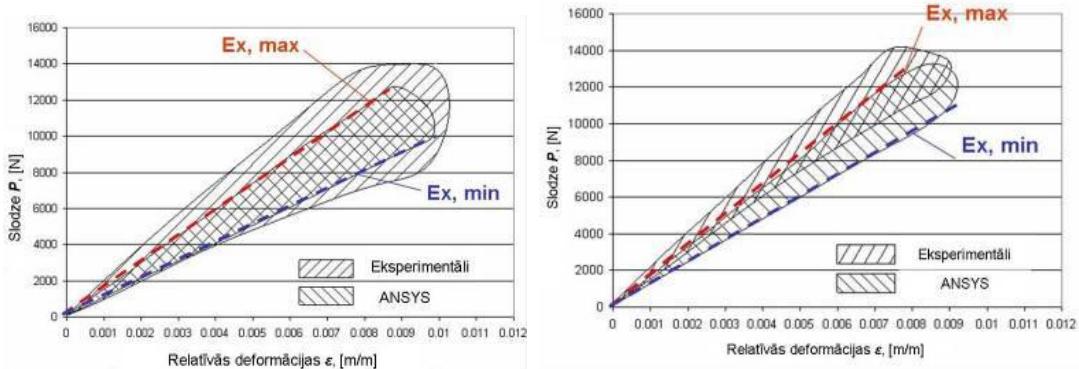
Otrā nodaļa

Lai sekmīgi projektētu sendviča tipa paneļus no vairākiem materiālu veidiem, ir svarīgi zināt katrā atsevišķā materiāla mehāniskās un fizikālās īpašības. Šie dati nodrošina ievaddatu palīvīgumu aprēķina modelim dažādās industriāli lietotās galīgo elementu programmās. Nemot vērā specifisko finiera iegūšanas procesu, kā rezultātā koksnes šķiedras tiek sapresētas un piesūcinātas ar līmi, viena slāņa mehāniskās īpašības būs atšķirīgas no zāgmateriāla paraugu īpašībām. Stiepes testi paraugiem, kas veidoti no viena un vairākiem vienā virzienā salīmētiem finiera slāņiem, tika veikti analogiski šķiedru kompozītmateriālu testa standartam, izmantojot 300 mm garus taisnstūrveida paraugus ar pielīmētām galu uzlikām. Iegūtās elastības moduļa un stiprības vērtības tika ievietotas kaula formas aprēķina modelī, kas vēlāk tika korelēts ar

eksperimentāliem stiepes testiem. Ievietojot minimālās un maksimālās iegūtās vērtības, ir iespējams novērtēt potenciālo ietekmi uz parauga stingumu materiālu īpašību izkliedes rezultātā. Kopumā skaitliski aprēķinātie rezultāti pārklāj eksperimentāli iegūto izkliedi, kā tas parādīts 1. attēlā.



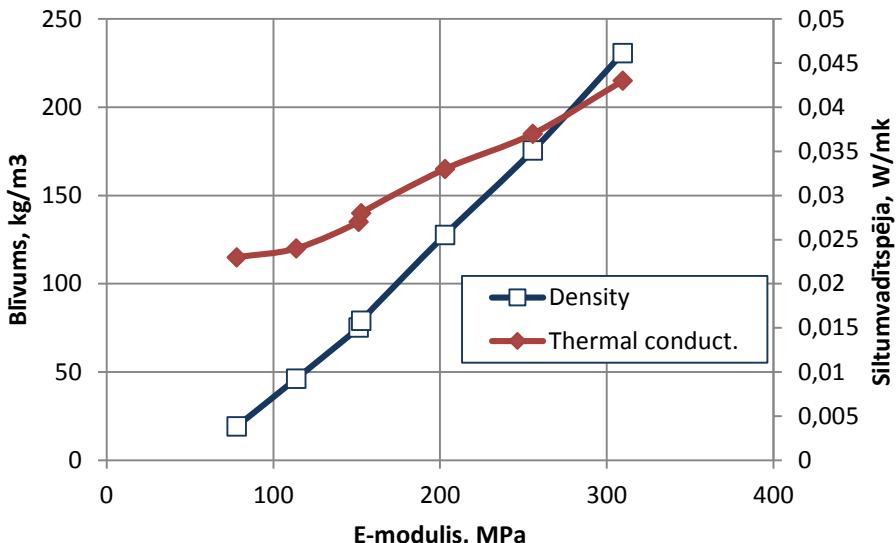
1. attēls. Kaula formas stiepes paraugs un galīgo elementu validācijas modelis.



2. attēls. Viena slāņa mehānisko īpašību validācija.

Mehāniskās īpašības termoplastiskā tekstila kompozītam tika noteiktas atbilstoši EN 527-4 standartam. Papildus ekstenzometram relatīvo deformāciju iegūšanai tika izmantots arī bezkontakta videoekstenzometrs *IMETRUM*. Ar šo iekārtu tika nomērītas relatīvās deformācijas un papildus aprēķināts Puasona koeficients.

Poliuretāna putu mehāniskās īpašības tika noteiktas dažāda blīvuma cilindriskiem paraugiem, sloganot līdz sakompaktēšanās robežai ($>80\%$ no sākotnējā garuma). Lineāra sakarība starp mehāniskajām īpašībām un putu blīvumu tika noteikta, kā parādīts 3. attēlā.



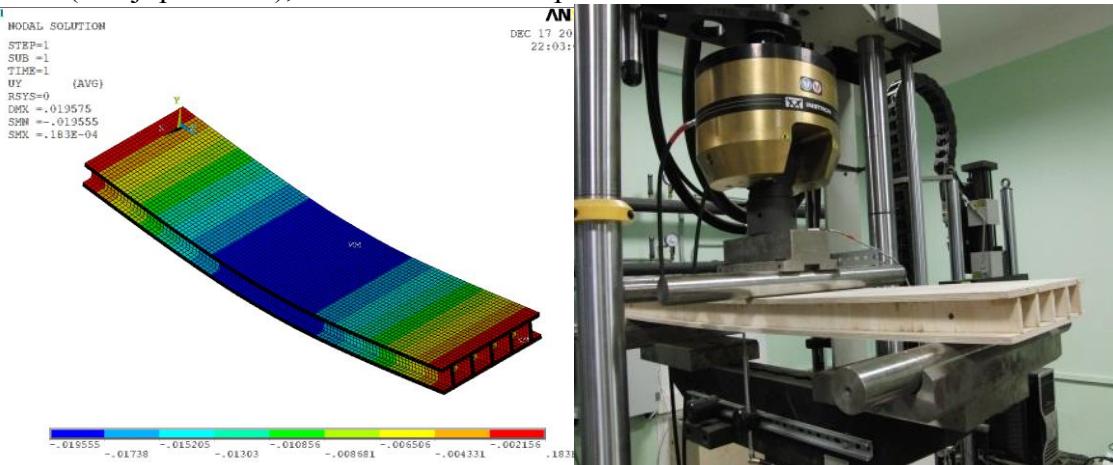
3. attēls. Sakarība starp putu blīvumu, elastības moduli un siltumvadītspējas koeficientu.

Termiskās īpašības putu un saplākšņa plāksnēm tika noteiktas, izmantojot *LINSEIS HFM 300*. Arī šajā gadījumā siltumvadītspējas koeficientam ir lineāra korelācija atkarībā no putu blīvuma un stinguma.

Trešā nodaļa

Šajā nodaļā ir veikts sendvičpaneļu ar ribotu un viļņotu serdi skaitliskais aprēķins, modeļa eksperimentāla validācija un šķērsgriezuma parametru optimizācija.

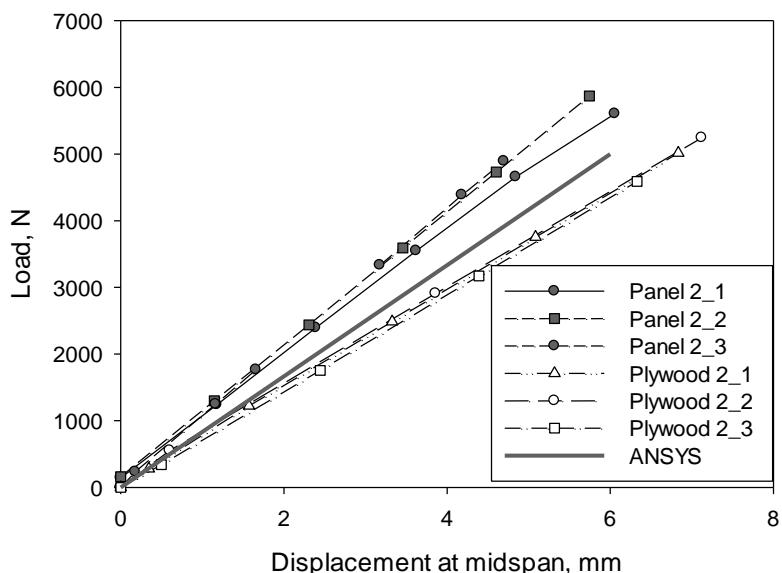
Sākotnēji saplākšņa paneļu skaitliskais modelis ir būvēts ANSYS komerciāli pieejamā programmu paketē, izmantojot četru mezglu SHELL 181 tipa čaulas elementus. Saplāksnis tika modelēts kā slāņaina struktūra ar perpendikulāri izvietotām finiera kārtām. Mehāniskās īpašības finierim tika pieņemtas no eksperimentāli pārbaudītajiem stiepes paraugiem. Saplākšņa sendvičpanelis modelēts atbilstoši EN 789 (4. attēls) slogošanas standartam. Balsti ir izvietoti paneļa galos, simulējot brīvi balstītu siju. Lineāra slodze ir pielikta paneļa vidusdaļā, apvienojot pārvietojumus punktiem, kas atrodas uz vienas līnijas perpendikulāri paneļa garenasij. Optimālais tīkla solis tika uzstādīts — 10 mm. Ārējiem saplākšņa slāniem tika samazināts biezums (vidēji par 30 %), lai ievērtētu vērā slīpēšanas ietekmi.



4. attēls. Skaitlisks aprēķina modelis un eksperimentālā validācija.

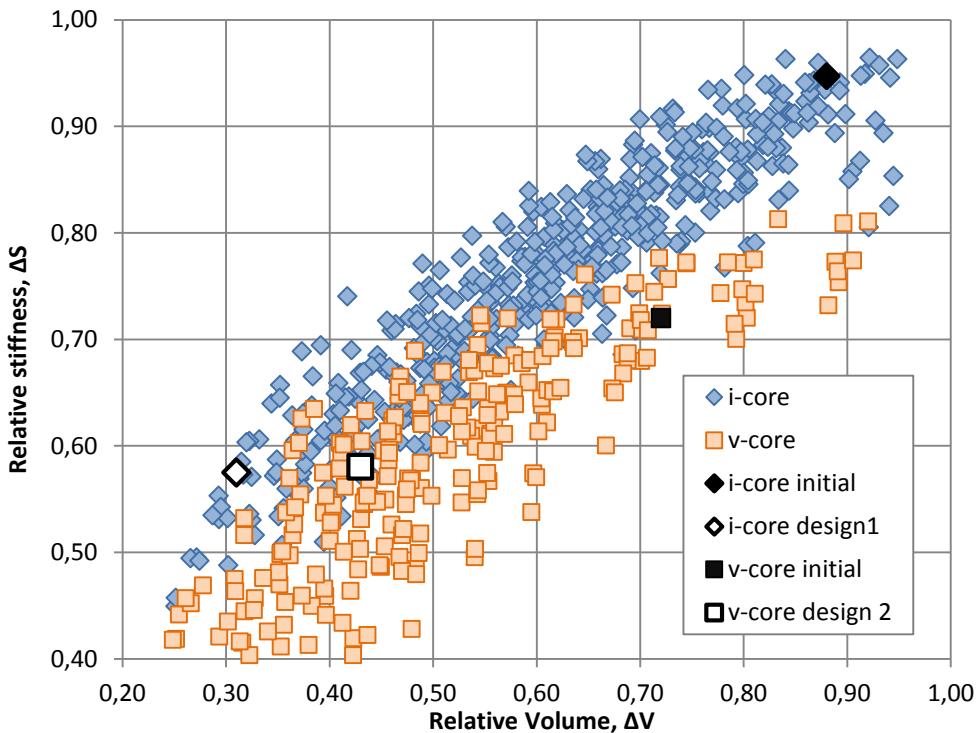
Pirmie paneļu prototipi ar rībotu viļņotu serdes tipu tika izmantoti izstrādāto skaitlisko modeļu validācijai. Veicot saplākšņa sendvičpaneļu testus četru punktu liecē (atbilstoši EN 789), ir noteikta paneļu izliece un virsējo šķiedru relatīvais pagarinājums. Izmantojot iegūtos rezultātus, tika aprēķināts paneļu lieces elastības modulis un lieces stingums. Salīdzinot eksperimentāli un skaitliski iegūtos rezultātus var redzēt, ka aprēķina modelis korelē ar iegūtajām izliecēm. Tas savukārt ir uzskatāms par pārliecinošu indikatoru, ka skaitliskais modelis var tikt izmantots turpmākai optimizācijai.

Sākotnējā paneļu optimizācija tika veikta ar mērķi uzlabot pirmo prototipu veikspēju, kā arī identificēt paneļus ar ekvivalentu stingumu salīdzinājumā ar tradicionālām saplākšņa plāksnēm. Papildus skaitliskais saplākšņa modelis tika izmantots, lai novērtētu sendvičpaneļu relatīvo veikspēju atkarībā no masas indikatora. Iegūtā optimizācijas rezultāta validācijai tika veikta, izgatavojot stinguma ziņā ekvivalentus paneļu 30, 40 un 50 mm biezam saplāksnim un veicot laboratorijas lieces testus gan saplākšņiem, gan ekvivalentiem sendvičpaneļiem (5. attēls). Iegūtie rezultāti apstiprina, ka, izmantojot šādu optimizācijas metodi, iespējams sasniegt references saplākšņa plāksnes stingumu, tajā pašā laikā samazinot paneļa svaru par vismaz 45 %.



5. attēls. Slodzes deformācijas līknes 40 mm biezam saplāksnim un ekvivalenta stinguma saplāksnim.

Rezultātu uzskatāmībai relatīvā sendvičpaneļu masa un stingums tika apkopoti vienā Pareto optimalitātes problēmas formulējumā, kas redzams 6. attēlā.



6. attēls. Relatīvais stingums un masa sendvičpaneļiem ar ribotu un viļņotu saplākšņa serdi.

No augstākminētā attēla var noprast, ka sendvičpaneļi ar ribotu serdi nodrošina lielāku stingumu garenvirzienā nekā tāda paša biezuma panelis ar viļņotu saplākšņa serdi.

Ribota paneļa praktiskai aprobācijai tika uzprojektēts 3 m garš panelis (analogiski *Plettac SL70* [14]) ar nolūku pārbaudīt tā atbilstību izmantošanai pārvietojamu stalažu klājā. Noslogojot klāju ar vienmērīgi izkliedētu ūdens slodzi atbilstoši EN 12811, tika noteikts, ka paneļi apmierina 3. slodzes klases nestspējas kritērijiem. Jāatzīmē, ka izgatavoto paneļu masa ir ievērojami zemāka nekā metāla un koka stalažu klājiem, tomēr ir vienādā līmenī ar tirgū pieejamiem alumīnija klājiem.

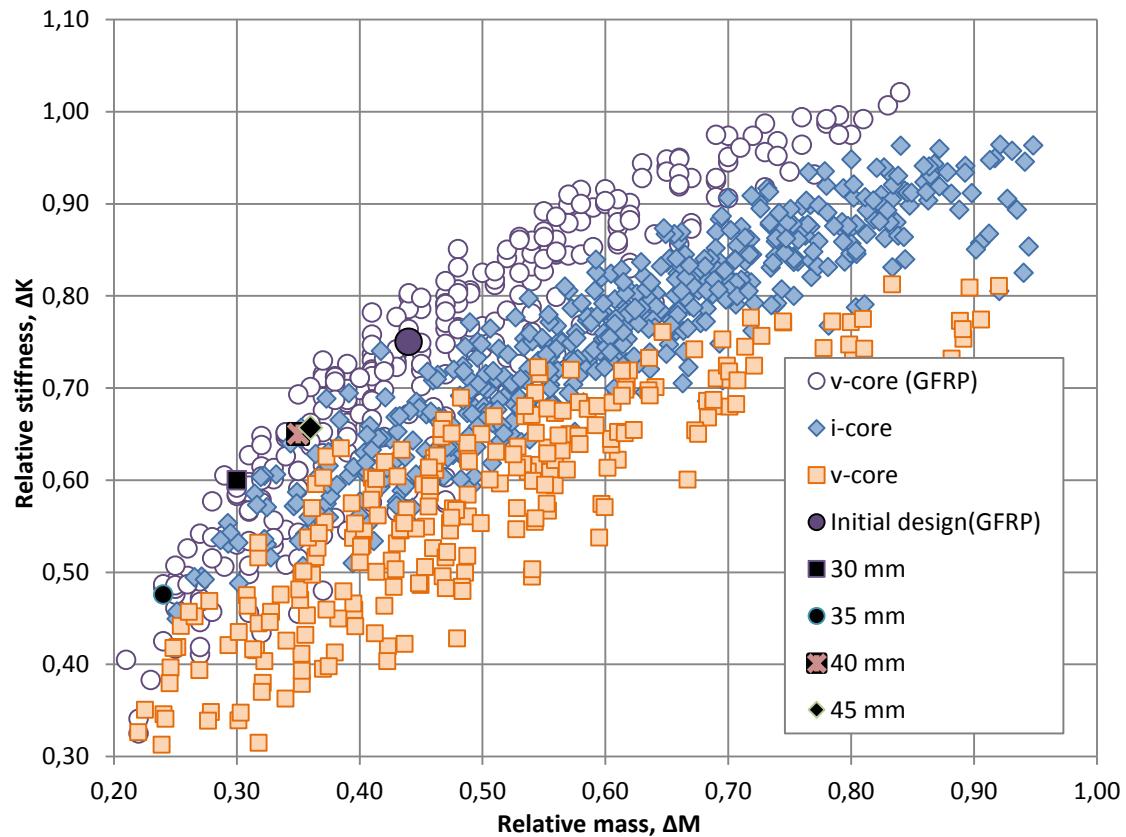
Ceturta nodaļa

Lai vēl būtiskāk uzlabotu stinguma/masas attiecību paneļiem ar saplākšņa virsmām, pētījumā tiek piedāvāts saplākšņa serdi aizstāt ar stikla šķiedras kompozīta viļņotu loksmi. Tehnoloģijas izmēģināšanas nolūkā un skaitliskā modeļa validācijai sākotnējie prototipi tika izveidoti vienkāršotā tehnikā, serdi pielīmējot pie virsmām atsevišķos izgatavošanas solos (7. attēls).



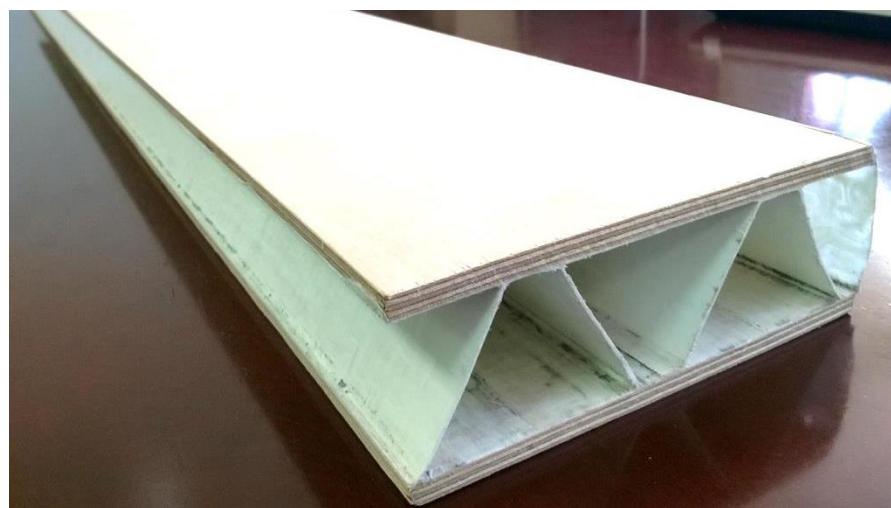
7. attēls. Sākotnējie prototipi — viļņota stiklašķiedras un epoksīda matricas serde.

Pirmie rezultāti uzrādīja labākas mehāniskās stinguma īpašības nekā paneļiem ar saplākšņa ribotu serdi. Līdzīga tendence parādās, arī salīdzinot Pareto optima fronti paneļiem ar stikla šķiedras kompozīta un saplākšņa serdi (8. attēls).



8. attēls. Relatīvais stingums un masa sendvičpaneļiem — Pareto optimalitātes datu kopas plakne.

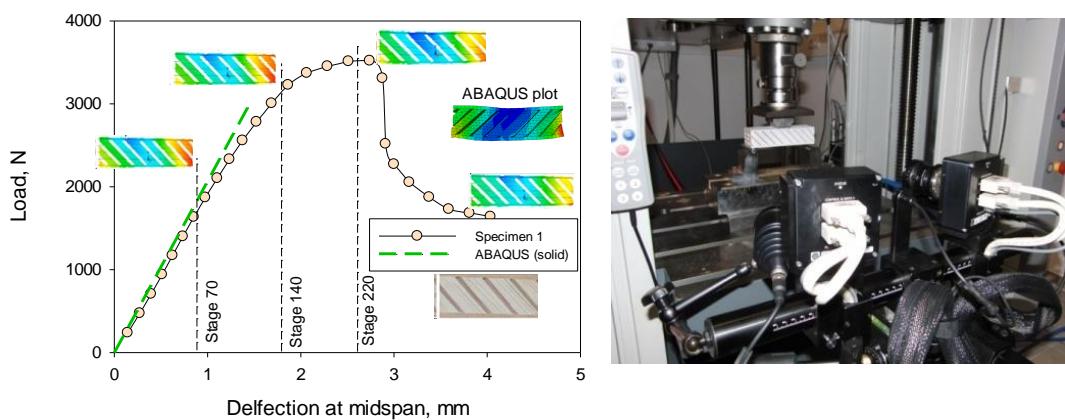
Likumsakarīgs turpinājums paneļu ar viļņotas loksnes serdi pētījumam ir ražošanas tehnoloģijas pilnveidošana, aizstājot tradicionālu termoreaktīvu stikla šķiedras serdi (epoksīdu matrica) ar stikla šķiedras/polipropilēna termoplastiska kompozītmateriāla viļņotu serdi. Darbā tika aprobēts, kā ir iespējams izgatavot sendvičpaneļus no atšķirīgiem materiālu veidiem vienā ražošanas solī, kas sakrita ar EK ietvarprogrammas projekta *MAPICC 3D* mērķiem. Sākotnējais termoplastiskas serdes prototips redzams 9. attēlā.



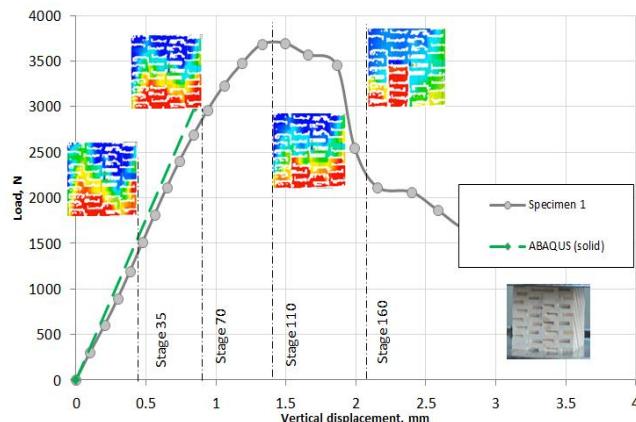
9. attēls. Divu sekciju sendvičpanelis ar viļņotu termoplastiska kompozītmateriāla serdi.

Piekta nodaļa

Šajā nodāļā apskatīta *ARAMIS* un *IMETRUM* bezkontakta virsmas deformācijas mērišanas sistēmu priekšrocības skaitlisko modeļu validācijai ar mērķi validēt skaitlisko aprēķinu rezultātus. Šim nolūkam galvenokārt tika izmantoti sendvičpaneļi ar šūnveida koksnes serdi. Lieces testa uzstādījums un iegūstamais rezultāts, izmantojot bezkontakta mērišanas sistēmu, ir parādīts 10. attēlā. Papildus slodzes un deformāciju līknei iespējams iegūt arī deformāciju vērtības visā plaknē, kā arī relatīvo deformāciju vērtības nelielās pikselu apakškopās. Iegūtie pārvietojumu grafiskie attēlojumi uz virsmas palīdz ne tikai skaitliskā modeļa validācijai, bet arī dod priekšstatu par struktūras viendabīgumu un parauga kvalitāti. Piemēram, 11. attēlā ir redzams, ka atsevišķās šūnu sekcijas sāk neatkarīgi pārvietoties īsi pirms kritiskās slodzes sasniegšanas. Nodaļā ir salīdzināti arī čaulas un tilpuma ķermeņu aprēķina modeļi nelielu sijas un lielāka mēroga paneļu lieces slogojuma simulešanai.



10. attēls. Vertikālo pārvietojumu spektrs uz sendvičpaneļa malas, kā arī *ARAMIS* sistēmas uzstādījums.



11. attēls. Vertikālo pārvietojumu spektrs uz spiedes parauga sānu skaldnes.

Sestā nodaļa

Šajā nodaļā apkopota informācija par saplākšņa sendvičpaneļu termiskās darbības analīzi, integrējot siltumizolācijas slāni. Iegūtie rezultāti galvenokārt atspoguļo valsts pētījumu programmā *IMATEH* paveikto.

Termisko īpašību uzlabošanai saplākšņa paneļos ar vertikālu ribu serdi tika iepildīts poliuretāna putu maisījums, kas daļēji veidots no pārstrādāto, atjaunojamo dabas resursu komponentēm. Siltumizolācijas iepildīšana paneļos nodrošina vairākas priekšrocības. Pirmkārt, tiek nodrošināts gaisa nekustīgums slēgto poru sistēmā, kas sekmē siltumizolācijas īpašības. Otrkārt, putas kalpo arī kā lielisks adhēzijas slānis ribu pielīmēšanai pie virsmām, līdz ar to šādā veidā ir iespējams paātrināt paneļu ražošanas kapacitāti. Treškārt, putas uzlabo paneļu mehāniskās īpašības, it īpaši — bīdes stiprību.

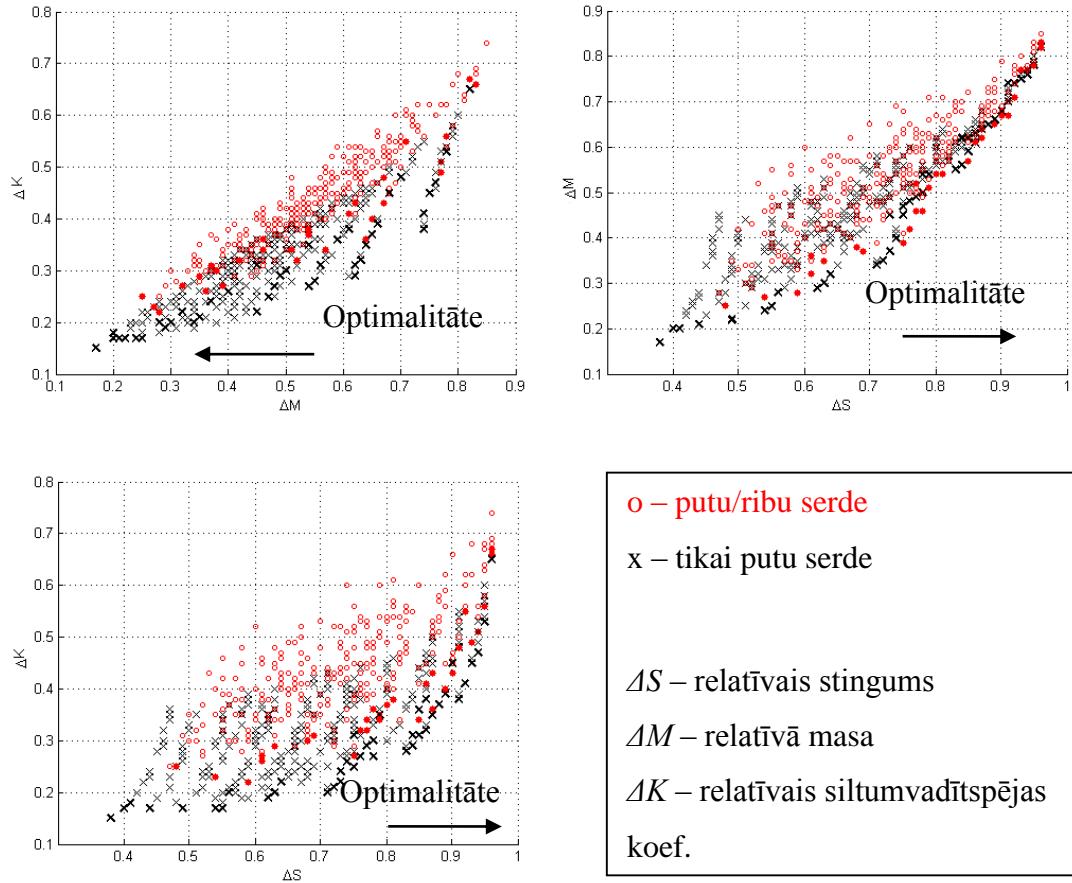
Pirmie paneļu prototipi ar putu serdi tika izveidoti, par pamatu ņemot paneli ar vertikālām ribām garenvirzienā. Vairāk komponentu ķīmisko vielu sajaukšanas un infūzijas iekārta (Koksnes ķīmijas institūtā) tika pielāgota šim uzdevumam, pagarinot maisījuma padošanas diapazonu. Svarīgākais izaicinājums iepildīšanas procesā ir nodrošināt virsmu nekustīgumu, putām izplešoties ķīmiskās reakcijas rezultātā. Iegūtie prototipēšanas rezultāti parāda, ka putas var tikt efektīvi izmantotas kā adhēzijas līdzeklis ribu pielīmēšanai, tomēr turpmāk putu viendabīgums ir jāuzlabo, lai samazinātu poru skaitu (12. attēls).



12. attēls. Ribots saplākšņa panelis ar un bez putu komponentes.

Termisko īpašību modelēšanai tika izveidots vienkāršots šķērsgrīzuma plaknes galīgo elementu modelis, izmantojot datorprogrammā ANSYS pieejamos četru mezglu plātnes elementus (*PLANE 55*). Temperatūras gradients tika piesaistīts apakšējai un augšējai virsmai, līdzīgi kā pārbaudes procedūrā atbilstoši EN-12667 standartam. Siltumvadītspējas koeficients tika noteikts tikai termiskā līdzsvara gadījumā. Pateicoties lineārai sakarībai starp putu blīvumu, elastības moduli un siltumvadītspējas koeficientu, ir iespēja izmantot šīs vērtības kā nepārtrauktus lielumus parametriskajā optimizācijā.

Izmantojot izveidoto termisko aprēķina modeli un sekvenciālo Latīņu hiperkuba eksperimentu plānu, tika noteikts sendvičpaneļu efektīvais siltumvadītspējas koeficients un masa. Tas pats eksperimentu plāns tika izmantots arī lieces skaitliskajam modelim, lai noteiktu arī paneļu stinguma raksturlielumus. Izdevīgāko risinājumu atrašanai starp vairākām atbildes funkcijām tika izveidots Pareto optimuma problēmas formulējums. Iegūtie saplākšņa paneļu relatīvie lielumi (siltumvadītspējas koeficients, stingums, masa) tika proporcionāli salīdzināti ar tradicionāla saplākšņa aprēķina vērtībām (13. attēls).

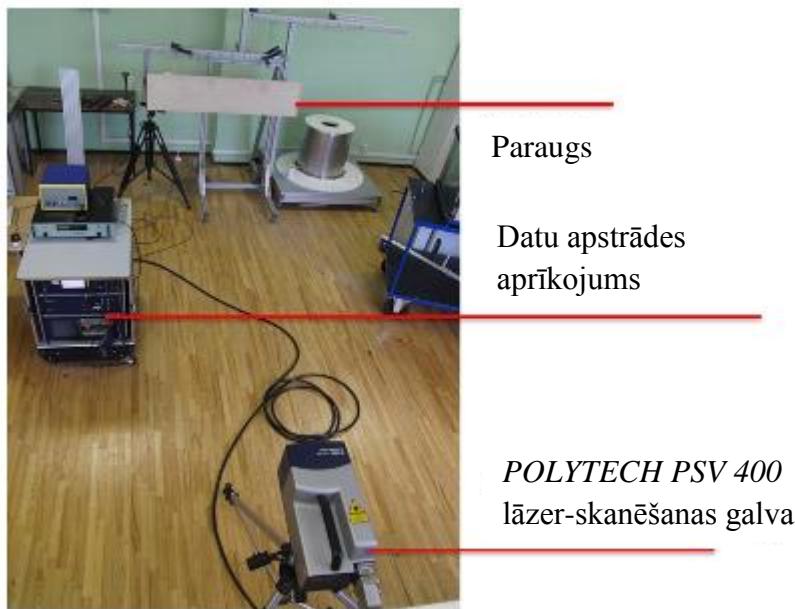


13. attēls. Pareto frontes grafisks attēlojums starp vairākām atbildes reakcijām.

Salīdzinājuma nolūkos Pareto optima fronte tika izveidota arī paneļiem ar putu serdi bez ribām. Abu veidu serdes konfigurācijām ir līdzīga veikspēja, ja salīdzina relatīvo masu un stingumu, taču paneļiem bez ribām ir ievērojami zemāka siltumvadītspēja.

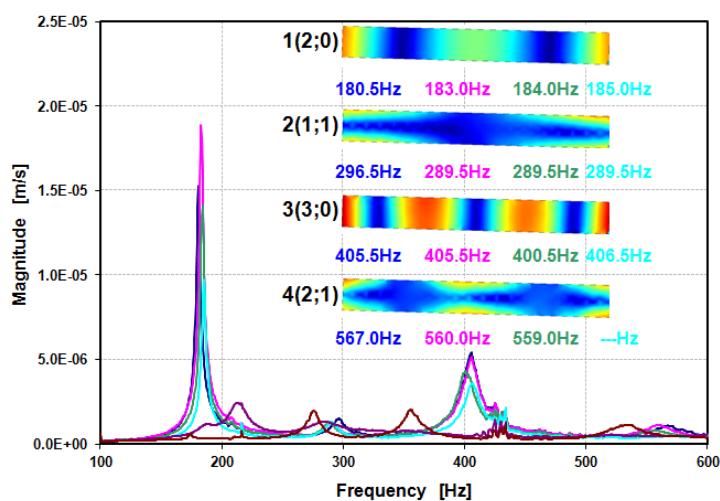
Septītā nodaļa

Vibrāciju slāpējošo īpašību noteikšanai sendvičpaneļiem ar atšķirīgu serdes un virsmu konfigurāciju tika izmantota modālās analīzes metode un *POLYTECH PSV 400* virsmas lāzerskenēšanas aprīkojums (14. attēls). Paraugs tika iekārts un iesvārstīts ar skaļruni plašā frekvenču diapazonā, lai noteiktu atbildes reakciju uz katru no pašsvārstību frekvencēm. Pašsvārstību formas tika noskenētas visā frekvenču diapazonā. Datu apstrādes programmatūras aprīkojums ļauj izveidot frekvenču/atbildes līknes un vizuāli attēlot svārstību formas.



14. attēls. Modālās analīzes testa uzstādījums.

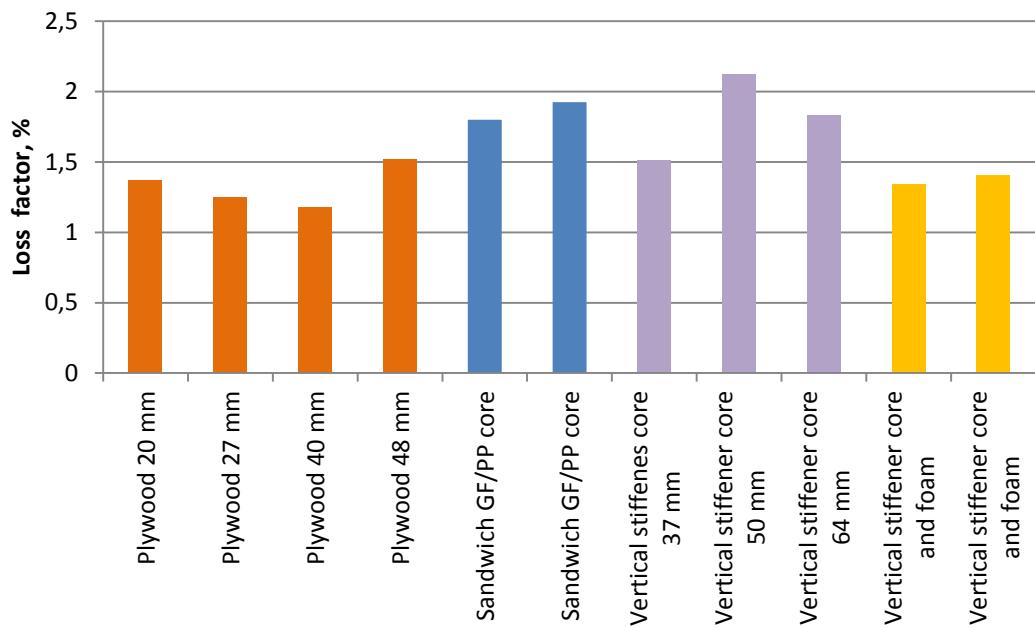
Šis pats aprīkojums tika izmantots arī, lai noteiktu svārstību dzišanas koeficientu sendvičpaneļiem un references saplākšņa plātnēm. Zinot pirmo lieces un bīdes svārstību formu, ir iespējams noteikt arī paneļa elastīgās mehāniskās īpašības — elastības moduli un bīdes moduli atbilstoši *ASTM E1876* standartam, šīs dinamiskās stinguma vērtības tika verificētas ar sagraujošos testos iegūtajiem rezultātiem. Tipisks piemērs frekvenču/atbildes spektram ir parādīts 15. attēlā, testējot paneļus ar viļņotu termoplastiskā kompozītmateriāla serdi. Četriem no testētajiem paneļiem ir samērā neliela rezultātu izkliede, kur pirmā pašsvārstību frekvence ir 180,5 Hz un otrā 296,5 Hz. Salīdzināšanas nolūkos ir pievienots viens brāķets paraugs, kas uzrāda nobīdītus amplitūdas ekstrēmus visā frekvenču skalā.



15. attēls. Frekvenču/atbildes līknes un pašsvārstību formas paneļiem ar 170 mm platumu.

Izmantojot modālās analīzes rezultātus, tika aprēķināts enerģijas zuduma faktors, kas raksturo materiāla svārstību slāpējošās īpašības. Jo lielāks ir zuduma faktors, jo vairāk enerģijas tiek noslāpēts. Matemātiski šis raksturlielums tiek aprēķināts kā laukums zem katra no pašsvārstību frekvenču maksimumiem ar nosacījumu, ka ekstrēma augstums atbilst *ASTM E756*

standarta prasībām. Rezultātu apkopojums paneļiem ar dažādiem serdes tipiem pirmajai pašsvārstību frekvencei ir dots 16. attēlā.

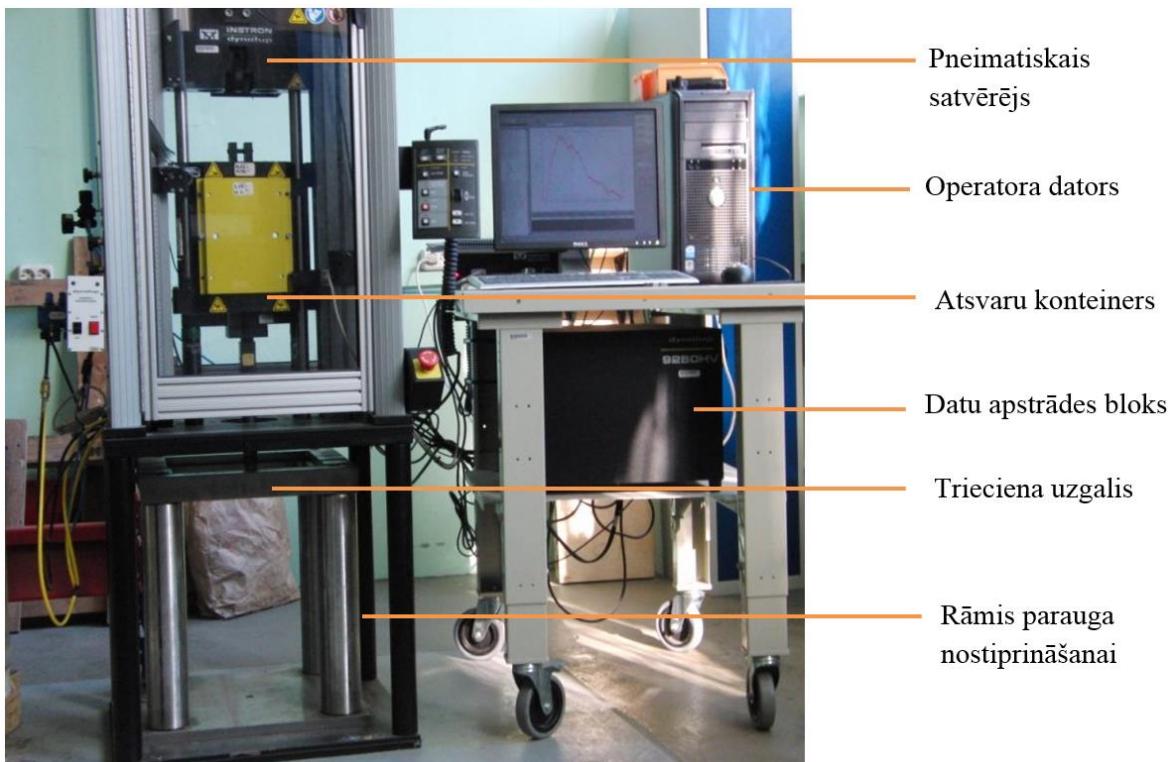


16. attēls. Svārstību zuduma koeficients saplākšņiem un sendvičpaneļiem pirmajai pašsvārstību frekvencei.

Analizējot iegūtos rezultātus, var redzēt, ka reference saplākšņa un sendvičpaneļu vibrāciju slāpējošās īpašības ir samērā līdzīgas. Viļņota stiklašķiedras/PP serdes gadījumā zuduma koeficients ir par 22 % lielāks nekā 48 mm references saplāksni. Ribotam panelim tas ir par 29 % lielāks nekā saplāksnim. Putu klātbūtne paneļa serdē palielina paneļa stingumu un samazina zuduma koeficientu līdz tradicionāla saplākšņa līmenim.

Astotā nodaļa

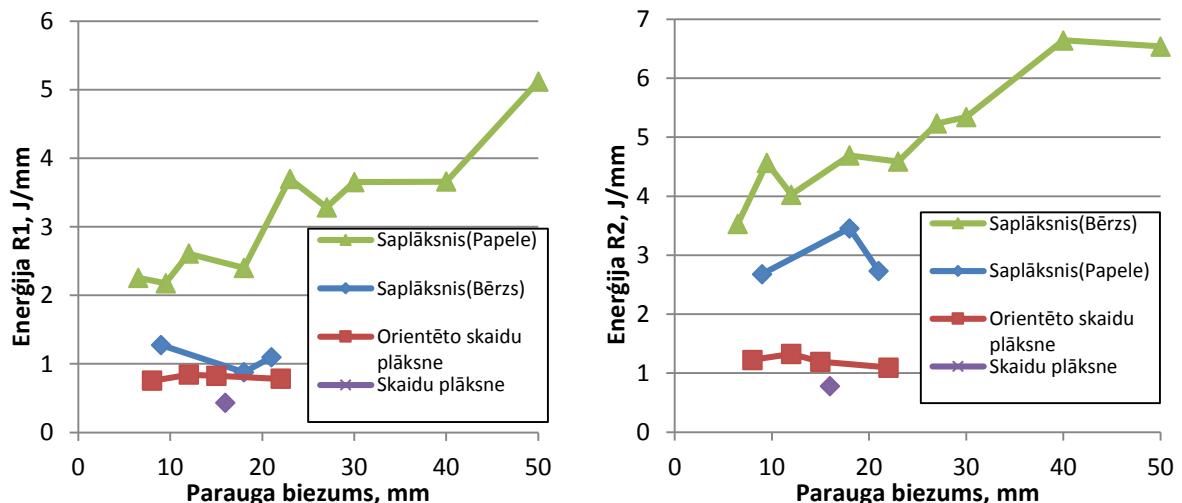
Pēdējā darba nodaļā tiek apskatīta saplākšņa paneļu trieciena izturība, izmantojot trieciena torņa *INSTRON Dynatup* uzstādījumu, kas parādīts 17. attēlā. Testa procedūra atbilstoši NF B51-327 standartam paredz parauga plaisāšanas un penetrācijas enerģijas noteikšanu, izmantojot krītošu svaru ar 25 mm diametra uzugali. Paraugs ar malu garumu 315x315 mm tiek ievietots nostiprināšanas rāmī un novietots tā, lai trieciens trāpītu tieši parauga centrā.



17. attēls. *INSTRON Dynatup 9250HV* trieciena tornis.

Testa rezultātā, izdarot atkārtotus triecienus paraugam, tiek iegūta potenciālā enerģija R_1 , kas raksturo enerģijas līmeni, kas nepieciešams, lai parauga apakšējā daļā izveidotu plaisiru, un R_2 — enerģija, kas nepieciešama, lai izveidotu parauga virsmā 12,5 mm iedziļinājumu. Izmantojot šo metodi, tika testēti trīs veidu paraugi: tradicionālais saplāksnis un viendabīgas uzbūves koksnes plātnu materiāli; saplāksnis ar plānu korķa vai polimērmateriāla vidusslāni; sendvičpaneļi ar viļņotu stiklašķiedras polipropilēna serdi un vertikālām saplākšņa ribām. Rezultātu apkopojumā turpmākajos attēlos iegūtā plaisirāšanas un penetrācijas enerģija ir dalīta ar paraugu biezumu ērtākai datu salīdzināšanai.

Iegūtie rezultāti (18. attēls) parāda, ka bērza saplākšņa references paneļiem ir būtiski lielāka plaisirāšanas un penetrācijas enerģija, salīdzinot ar papeles saplāksni vai orientēto skaidu plāksni, kā arī un mēbeļu ražošanā plaši izmantoto neorientēto skaidu plāksni.

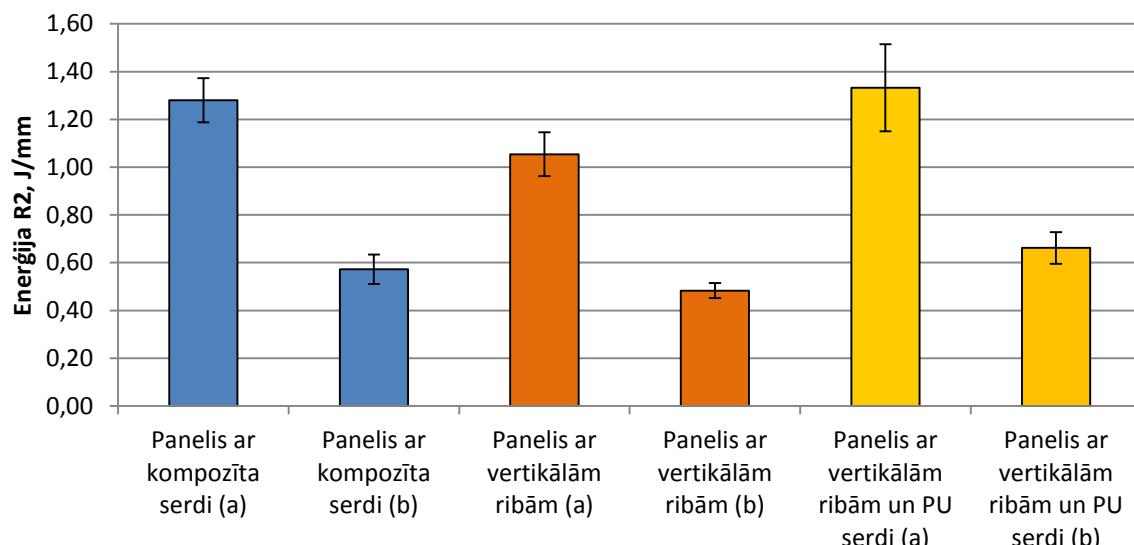


18. attēls. Trieciena enerģija saplāksnim un viendabīgiem koksnes materiāliem.

Plāna (2–3 mm) vidusslāņa integrācija saplākšņa serdē neatstāj būtisku ietekmi uz plāsāšanas izturību ar R_1 . Tajā pašā laikā plāns un elastīgs vidusslānis ļauj sasniegt vismaz divkāršu penetrācijas enerģijas rādītāju uzlabošanos.

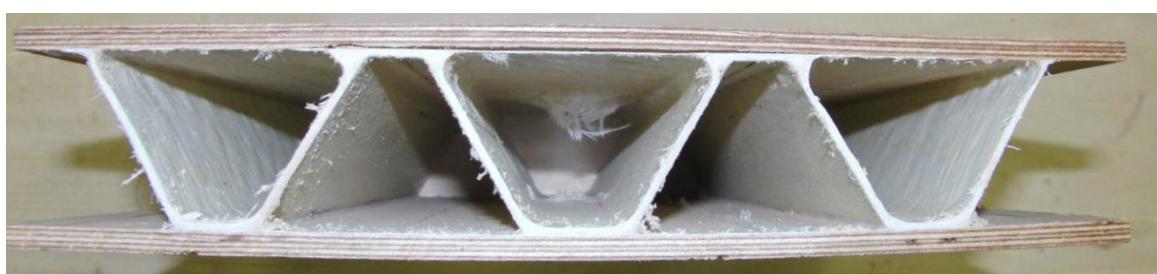
Liela biezuma (> 50 mm) saplākšņa sendvičpaneļiem nav novērojama aizmugurējās virsmas plāsāšana, attiecīgi triecienu enerģija R_1 nav nosakāma. Savukārt to penetrācijas enerģija R_2 , kas attēlota 19. attēlā, ir ievērojami zemāka nekā viendabīgam references saplāksnim — galvenokārt nelielā biezuma virsmu dēļ. Zīmīgi, ka penetrācijas enerģija sendvičpanelim ir tieši atkarīga no triecienu lokācijas. Trieciens virs ribas (apzīmēts ar a) ļauj uzņemt būtiski lielāku enerģiju nekā trieciens starp ribām (b). Putu klātbūtne paneļa iekšpusē uzlabo triecienu izturību un neļauj virsmām trausli atdalīties, līdz ar to ir vērojams gandrīz divkāršs uzlabojums triecienu pretestībai starp ribām.

Saplākšņa panelim ar termoplastiska kompozītmateriāla serdi un 60 mm biezumu ir līdzīga triecienu izturība kā ribotam panelim ar poliuretāna putu pildījumu un 65 mm biezumu. Līdz ar to var apgalvot, ka viļnotai termoplastiska kompozītmateriāla serdei ir būtiskas priekšrocības, salīdzinot ar citiem serdes tipiem.



19. attēls. Penetrācijas enerģija sendvičpaneļiem ar dažādiem serdes tipiem.

Tipisks bojājuma rakstura attēlojums viļnotas serdes gadījumā ir parādīts 20. attēlā. Trieciens starp viļniem augšdaļā ir atstājis pamanāmu stikla šķiedras pārrāvumu, kas liecina, ka kompozītmateriāla delaminācija notikusi tikai ļoti šaurā apgabalā. Savukārt trieciens uz viļņa augšdaļas atstājis mazāk izteiktu deformāciju.



20. attēls. Triecienu bojājums panelim ar viļnotu termoplastiskā kompozīta serdi — iekšskats.

Secinājumi

Promocijas darbā eksperimentāli un skaitliski tika izpētītas saplākšņa sendvičpaneļu multifunkcionālās īpašības (siltuma, vibrāciju izolācijas, trieciena absorbcijas), kā arī parādīts, kā tās iespējams prognozēt, izmantojot darbā izstrādātās projektēšanas metodes. Pamatojoties uz skaitlisko aprēķinu rezultātiem, parametrisko optimizāciju un eksperimentu validācijas, iegūti šādi secinājumi.

1. Apstiprināts, ka, neskatoties uz koksnes materiālu īpašību izkliedi apstrādes, spiediena un līmvielas ietekmē, iegūtās finiera īpašības ir izmantojamās precīziem saplākšņa mehāniskiem aprēķiniem diapazonā no 3 līdz 35 slāņiem, kas atbilst pilnam saplākšņa biezumu sortimentam.
2. Izstrādāta metodoloģija saplākšņa paneļu projektēšanai ar mērķi atrast pilnajām saplākšņa loksnēm ekvivalenta stinguma sendviča alternatīvu. Metode balstās uz augstas detalizācijas galīgo elementu modeļa izveidi, optimizāciju un eksperimentālu validāciju. Praktiskā aprobācija veikta, projektējot un eksperimentāli validējot industriāli izgatavotus (AS «Latvijas Finieris») ribotus paneļus ar 3 m laidumu atbilstoši stalažu klāju ekspluatācijas prasībām.
3. Metode, kas balstās uz Pareto optimuma fronti, var tikt izmantota, lai atrastu optimālakos sendvičpaneļu risinājumus starp vairākām atbildes reakcijām, piemēram, stingumu, masu un siltumvadītspēju. Metode dod iespēju salīdzināt dažādu serdes veidu ietekmi uz šiem parametriem plašā rezultātu apgabalā. Verifikācija apstiprina, ka šādi iespējams panākt vienmērīgi nospriegotu konstrukcijas darbību līdz pat pilnīgam parauga sabrukumam.
4. Darbā pirmo reizi izveidots inovatīvs saplākšņa panelis ar termoplastiskā kompozīta vilņotu serdi, kā arī nodemonstrēts, ka šādu produktu ir izspējams izgatavot vienā ražošanas paņēmienā. Izgatavotajiem paneļu prototipi noteiktas mehāniskās īpašības un trieciena pretestība. Iegūtie rezultāti liecina, ka, apvienojot saplākšņa un termoplastiskā kompozīta komponentes, iespējams iegūt augstāku paneļu stingumu nekā viena materiāla gadījuma. Piemēram, vienāda biezuma un mehāniskā stinguma (attiecībā pret saplāksni) sendvičpanelis var sasniegt vismaz 20 % masas samazinājumu.
5. Eksperimentāli salīdzinot triju veidu serdes, tika novērtēta to ietekme uz saplākšņa sendvičpaneļu multifunkcionālām īpašībām:
 - i) putu serdes integrēšanā samazina siltumvadītspējas koeficientu no $0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ līdz $0,05 - 0,07 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
 - ii) saplākšņa paneļiem ir potenciāls palielināt vibrāciju absorbējošās īpašības. Zemā stinguma dēļ saplākšņa paneļiem ar ribotu serdi ir par 30 % lielāks svārstību zuduma koeficients, salīdzinot ar tradicionālo saplāksni;
 - iii) sendvičpaneļu noteiktā penetrācijas enerģija ir tieši atkarīga no virsmas biezuma un trieciena lokācijas. Putu vidusslānis, kā arī ar termoplastisko kompozītmateriālu pastiprinātas virsmas, par 40–50 % uzlabo paneļu triecienizturību, salīdzinot ar vienkāršu ribotu paneli.

Summary of the Doctoral Thesis

Introduction — Topicality of Research

Forestry product export plays a significant role in the Latvian export structure (according to the data estimate by the Bank of Latvia ~ 15 %). Vast territories of growing timber and proximity to transit networks allow developing the lumber processing factories and wood-based plate manufactories for plywood, chipboard and oriented strand board (OSB). One should also bear in mind historical wood product research traditions in Latvia, which make a good background for the development of innovative wood-based products. The production of timber building materials requires less energy compared to metal, reinforced concrete or plastics. This reduces the negative impact on air and water quality; both in the production process, exploitation and recycling process.

One of most promising areas for new product research and development (R&D) may be considered lightweight sandwich structures with reduced structural weight and upgraded load bearing capacities close to conventional wood-based panels. Such a solution offers structure with improved specific strength — strength/ density ratio compared to solid wood plate. Plywood sandwich panels consisting of all-plywood surfaces and light material core may become a disruptive alternative for thick conventional plywood boards in fields such as surface and maritime transport demanding reduced weight and appropriate load bearing capacity. Moreover, a considerable environment gain could be achieved by saving raw materials. However, a considerable scientific effort is required to further develop a functional product with optimal cross-section parameters. Main effort is dedicated to optimise design and to implement functionality not originally associated in conventional designs.

Birch plywood is considered an outstanding natural laminate material mainly taking into account its high stiffness and strength properties in planar direction. Therefore, it is further considered for the current study to be most appropriate face material for lightweight sandwich panels. Advantages from different core materials were also studied in order to elaborate strength and weaknesses of each material considering application/manufacturing aspects. The preliminary analysis of combined sandwich materials may give some understanding of the general behaviour of the structure. However, to assess the maximum capacity of the structure, optimisation of the cross-section parameters is required.

Environmentally friendly composite/sandwich materials are among those promising research topics currently funded by the European Commission's Framework Programme for innovation. Some results obtained within projects, such as WOOD-NET, BIOCOPSEPT, TREES4FUTURE and mainly MAPICC 3D, are summarised and integrated in the present Doctoral Thesis.

The Aim of the Research

The aim of the research is to integrate multifunctional properties (such as heat and vibration insulation and impact absorption) in plywood sandwich panels and to develop the design methodology in order to increase overall performance of the panels. The proposed methodology is based on the Pareto optimality detailed numerical modelling, prototyping and experimental validation.

The following tasks are set to reach the aim of the research:

1. To characterise properties of individual sandwich components, birch veneer, PU foam and thermoplastic composite.
2. To develop a numerical method in order to find plywood sandwich-type panels (with straight stiffeners or corrugated core) with improved or equivalent mechanical performance of conventional plywood panels.
3. To develop methodology based on Pareto optimality between plywood sandwich and conventional panels considering simultaneous optimisation of several response properties.
4. To prototype a novel plywood sandwich-type panel with plywood outer surfaces and thermoplastic glass fibre/polypropylene core by one-step manufacturing approach. To characterise realised mechanical properties by a non-destructive evaluation and subcomponent level flexural tests.
5. To assess and classify the influence of design parameters such as thickness, surface and core type on heat conduction, vibration as well as impact absorption properties.

Thesis Statements to Be Defended

1. Validated design methodology of equivalent mechanical performance of plywood sandwich panels assuming solid plywood boards as stiffness reference.
2. The methodology for assessment of panel efficiency in order to simultaneously improve several response criteria by Pareto optimality and meta-modelling technique.
3. Evaluation of physical, mechanical, impact resistance and vibration damping properties of novel sandwich panel with plywood surfaces and corrugated thermoplastic composite core made by one-step manufacturing process.

Scientific Novelty of the Research

Method based on Pareto optimality approach is developed to assess the efficiency of the panel in case of several responses and various core types. It is based on numerical modelling, meta-modelling technique and parametric optimisation. Efficiency of the method is confirmed by extensive validation trials.

Novel plywood sandwich panels with plywood surfaces and thermoplastic glass fibre/polypropylene core were made by a one-step manufacturing/prototyping approach. Guidelines for quality control are established for a non-destructive evaluation testing method. Impact resistance for different types of sandwich panel cores has been evaluated.

Practical Importance of the Research Results

The outcome of the present research enables to design light and multi-functional plywood sandwich-type panels, which are an effective alternative to traditional plywood and wood-based sheet boards. The described numerical methodology supports the strain and stress distribution assessment in each layer of plywood. This allows emerging disruptive tailored designs with improved stiffness (quasi-isotropic or gradual transversal isotropic) properties. The validated

prototype of scaffolding deck complies with a set of industrial requirements and additional safety factors gained by the improved technology process.

The Research Methodology

The numerical analysis of multi-layer plywood structures and parametrical optimisation were based on commercially available finite element software ANSYS. In-house software EDAOPT was employed for computer design of experiments, while in-house software VARIREG provided both parametrical and non-parametrical response approximation functions by the ABFC method. All mechanical tests of sub-component scale specimens for bending load were done using servo-hydraulic testing equipment INSTRON 8802. Both HBM linear alternating resistance deformation measurements and strain gauges were added for auxiliary measurements. Furthermore, IMETRUM digital image correlation system was applied for non-contact strain measurements. In order to obtain the heat conduction coefficient the equipment LINSEIS HFM 200 was used. For non-destructive evaluation, the dynamic laser-scanning equipment POLYTECH PSV400 was employed to obtain natural frequencies, and mode shapes as well as coefficient of damping. For specimen excitation, the loudspeaker with frequency range of 0–20 kHz was utilised. The impact tests were conducted on INSTRON Dynatup 9250 HV with a working range between 0–1600 J. The following software was used for data processing — MS-Office, Sigma Plot, Matlab, Catman Easy, Instron Bluehill, Imetrum Video Gauge, ANSYS and PYTHON GUI.

List of Publications and Conferences

Labans, E., Kalniņš, K. Experimental Validation of the Stiffness Optimisation for Plywood Sandwich Panels with Rib-Stiffened Core. *Wood Research*, 2014, Vol.5 9, Iss. 4, pp. 793–802. (indexed in ISI Web of Science).

Labans E., Kalnins K., Zudrags K., Rudzite S. High-Performance Plywood/GF/PP Textile Composite Sandwich Panels Developed during MAPICC 3D Project. Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customization. Morocco, Casablanca, 4–6 November, 2015 (on CD).

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K., Rudzīte, S., Kirpluks, M., Cabulis, U. Evaluation of Plywood Sandwich Panels with Rigid PU Foam-Cores and Various Configurations of Stiffeners. Proceedings of the 3rd International Conference on Optimization and Analysis of Structures, Estonia, Tartu, 23–25 August, 2015, pp.45–51.

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K. Stiffness Analysis of Sandwich Panels with Corrugated Plywood and GFRP Core. *Shell Structures: Theory and Application*. Proceedings of the 10th International Conference “Shell Structures, Theory and Applications” (10th SSTA 2013), Poland, Poznan, 16–18 October, 2013. London: Taylor & Francis Group, 2014, pp. 539–542. (indexed in ISI Web of Science and SCOPUS).

Labans, E., Kalniņš, K., Bikovs, A. Simulation of Mechanical and Thermal Properties for Sandwich Panels with Cellular Wood Cores. The Eighth International Conference on Engineering Computational Technology: Civil-Comp Proceedings 100, Croatia, Dubrovnik, 4–7 September, 2012 (on CD) (indexed in SCOPUS).

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Versus Experimental Investigation of Plywood Sandwich Panels with Corrugated Core. Civil Engineering 11: 3rd International Scientific Conference: Proceedings, Latvia, Jelgava, 12–13 May, 2011. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2011, pp. 159–165 (indexed in SCOPUS).

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Modelling and Experimental Validation of Dendrolight Cellular Wood Material. The 8th Meeting “Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)”: Proceedings, Lithuania, Kaunas, 13–14 September, 2012. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2012, pp. 177–184.

Labans, E., Kalniņš, K. Optimal Design Practice for Plywood Sandwich Panels. Proceedings of the 9th ASMO UK / ISSMO Conference on Engineering Design Optimization, Ireland, Cork, 5–6 July, 2012. Cork: 2012, pp. 71–79.

Labans, E., Kalniņš, K. Non-Contact Measuring System ARAMIS for Sandwich Panels Research. Proceeding of the 16th Scientific Student’s Conference on Human-Environment – Technologies, Latvia, Rezekne, 25–25 April, 2012, pp. 396–405.

Labans, E., Kalniņš, K., Ozoliņš, O. Experimental and Numerical Identification of Veneers Mechanical Properties. Construction Science. Vol. 11, 2010, pp. 38–43. ISSN 1407-7329.

Results of the thesis presented in the following conferences:

Labans E., Kalnins K., Zudrags K., Rudzite S. High-Performance Plywood/GF/PP Textile Composite Sandwich Panels Developed during MAPICC 3D Project. 5th International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customization. Morocco, Casablanca, 4–6 November, 2015.

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K., Rudzīte, S., Kirpluks, M., Cabulis, U. Evaluation of Plywood Sandwich Panels with Rigid PU Foam-Cores and Various Configurations of Stiffeners. 3rd International Conference on Optimization and Analysis of Structures, Estonia (OAS2015), Tartu, 23–25 August, 2015.

Labans, E., Kalnins, K., Zudrags, K. Stiffness Analysis of Sandwich Panels with Corrugated Plywood and GFRP Core Shell Structures: Theory and Application: (10th SSTA 2013), Poland, Poznan, 16–18 October, 2013.

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical versus Experimental Investigation of Wood Based Panels with Plywood and GFRP Composite Components. Civil Engineering 12: 4th International Scientific Conference, Latvia, Jelgava, 12–13 May, 2013.

Labans, E., Kalniņš, K., Zudrags, K. Stiffness Analysis of Sandwich Panels with Corrugated Plywood and GFRP Core. Shell Structures: Theory and Application: 10th International Conference (10th SSTA 2013), Poland, Gdansk, 16–18 October, 2013.

Labans, E., Kalniņš, K., Bikovs, A. Simulation of Mechanical and Thermal Properties for Sandwich Panels with Cellular Wood Cores. The Eighth International Conference on Engineering Computational Technology, Croatia, Dubrovnik, 4–7 September, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Optimal Design Practice for Plywood Sandwich Panels. Proceedings of the 9th ASMO UK / ISSMO Conference on Engineering Design Optimization, Ireland, Cork, 5–6 July, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Modelling and Experimental Validation of Dendrolight Cellular Wood Material. The 8th Meeting “Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)”, Lithuania, Kaunas, 13–14 September, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Non-Contact Measuring System ARAMIS for Sandwich Panels Research. 16th International Scientific Students Conference on Human-Environment – Technologies, Latvia, Rezekne, 25–25 April, 2012.

Labans, E., Kalniņš, K. Numerical Versus Experimental Investigation of Plywood Sandwich Panels with Corrugated Core. Civil Engineering 11: 3rd International Scientific Conference: Proceedings, Latvia, Jelgava, 12–13 May, 2011.

E. Labans, K. Kalniņš, Optimum Design Guidelines for Plywood Sandwich Panels, OAS2011 – Optimization and Analysis of Structures, Tartu, Estonia, 25–27 August, 2011.

E. Labans, K. Kalniņš, Elaboration of Design Guidelines for All-Plywood Sandwich Panels, IAWS, Stockholm, Sweden, 31 August–2 September, 2011.

E. Labans, K. Kalniņš. Numerical and Experimental Investigation of Plywood Sandwich Panels, RTU 52nd International Scientific Conference, 13 October, 2011, Riga.

E. Labans, K. Kalniņš, K. Zudrags. Testing and Simulation of Plywood Sandwich Panels with Corrugated Core. Wood Science and Engineering, 6th meeting, Tallinn, Estonia, 21–22 October, 2010.

Labans, E., Kalnins, K., Ozolins, O. Experimental and Numerical Identification of Veneers Mechanical Properties. RTU 51st International Scientific Conference. Latvia, Riga, 12 October, 2010.

Overview of the Doctoral Thesis

The first chapter provides literature review for the definition of a scope and tasks of the current research. The second chapter gives more insight into coupon scale tests in order to acquire material properties for further design of sandwich components. Methodology for optimisation of lightweight plywood sandwich panels (based on numerical modelling and experimental validation) is described in the third chapter. The fourth chapter provides a detailed description on technological development of novel sandwich panel type with corrugated thermoplastic composite core and plywood surfaces. Advantages of non-contact measurement system in evaluation and validation of wood-based sandwich panels are explained in the fifth chapter. The next chapter focuses on optimal design of lightweight sandwich panels with integrated heat insulation properties. It is followed by Pareto optimality analysis for assessment of impact of the natural PU foam on stiffness and thermal conductivity. In addition, a comparison of vibration damping properties such as loss factor and damping ratio for panels with various core types is outlined in the seventh chapter. The final chapter deals with impact resistance characterisation of reference wood-based sheet specimens and sandwich panels with stiffener and corrugated core. Overall conclusions and a list of references conclude the present Doctoral Thesis.

Chapter 1

The present chapter provides literature review on physical, mechanical, heat insulation, vibration and impact damping properties of plywood and wood-based sandwich panels.

It is generally known that plywood manufacturing is one of the most efficient ways of wood processing with small amount of surplus and relatively low energy consumption. Various wood species could be utilized in plywood production. However, silver birch (*Betula Pendula*), growing in the northern regions of the globe, provides one of the highest mechanical performance characteristics [1].

Some scientific efforts are made toward improving plywood characteristics without changing a traditional structure. Pre-pressure of every plywood layer provides better densification and consequently improved mechanical properties and lower adhesive intake [2], [3]. Thermal treatment of the plywood significantly improves biological resistance at the same time lowering its strength [4]. Altering chemical content of traditionally employed phenol-phormaldehyde adhesive it is possible to avoid dangerous fumes, unfortunately increasing the price of bounding adhesive [5].

There have been a relatively sparse number of publications on wood-based sandwich panels. Research and development of new sandwich panels (with all-wood components) are mainly focused on effective consumption of wood processing surplus, such as branches and strands [7], rapid assembly of housing units [8], design of facade panels with low density wood fibre core [9], [10].

Commercially available wood-based sandwich panels mainly dominate in low performance applications in furniture and movable partition walls [11]; however, some products are designed for covering long spans with lightweight sandwich panels [12].

Research on multifunctionality of the sandwich panels in general ponders focuses on the optimisation of stiffness and heat insulation performance [13], [14]. At present, the methods of calculating thermal conductivity of the sandwich panels are under development. Assembling of several material types in sandwich structures provides a better effect on vibration damping compared to single material [16]. Impact resistance in sandwich panel case is usually lower

than solid material with the same thickness; however, low density core could improve blast absorption [16].

Taking into account a large number of variables influencing sandwich panels behaviour, optimisation is generally accepted as one of the most reliable methods of reaching desired performance indicators. It has been proved that within various approaches of sandwich panel design in particular cases with several response criteria, a Pareto optimality frontier is one of the most representative methods [17].

Chapter 2

Reliable input data are a crucial requirement for further numerical modelling of sandwich panels. In the present research, it was especially important to estimate reliable mechanical properties of a single plywood veneer. Due to veneer processing under the pressure and bonding adhesive influence, mechanical properties of veneer are significantly different from the same properties of solid wood specimens. Tension tests of strand properties are performed by analogy of fibre-reinforced with 300 mm long specimens with end-tabs according to EN 527-4 (Figure 1). For validation purposes, the acquired values have been employed in simplified bone-shaped plywood tension specimen. By varying between minimum and maximum values in a numerical model, the scatter of perspective results was evaluated as displayed in Figure 2.

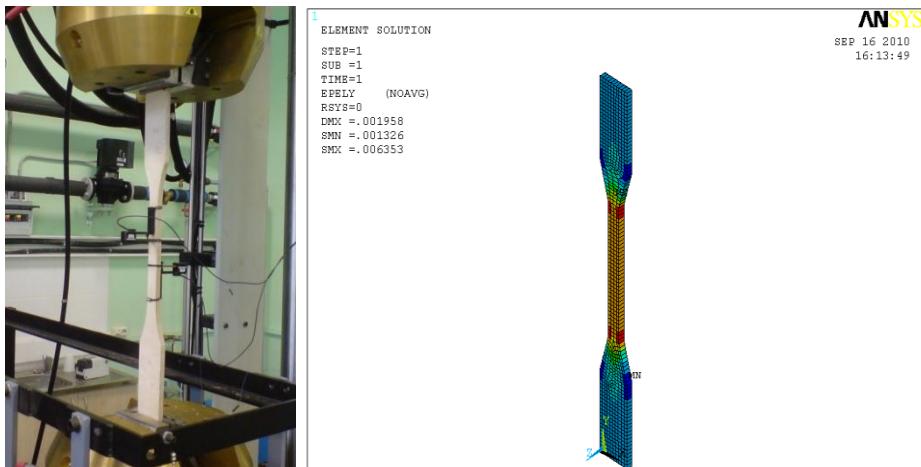


Figure 1. Bone-shaped plywood specimen and FEM model.

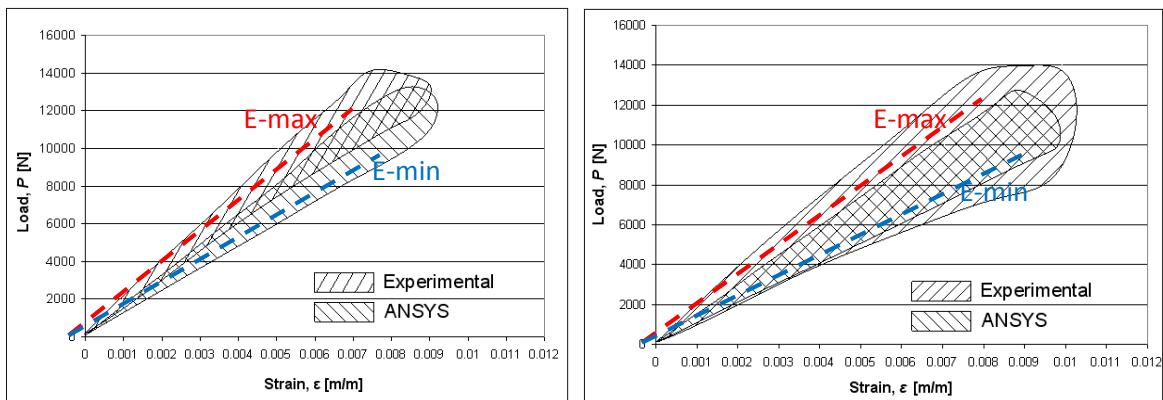


Figure 2. Estimation (upper/lower bounds) of veneer mechanical properties.

Mechanical properties of the thermoplastic composite specimens are acquired according to EN 527-4 standard. In addition to clip-on extensometer, non-contact video-gauge system IMETRUM was applied to measure transverse strain and Poisson's ratio.

Polyurethane foam mechanical properties were evaluated by cylindrical specimens until 80 % of compression ratio. Thermal conductivity for various foam densities were measured by LINSEIS HFM 300 test equipment. In both cases, modulus of elasticity and thermal conductivity have linear correlation with foam density as shown in Figure 3.

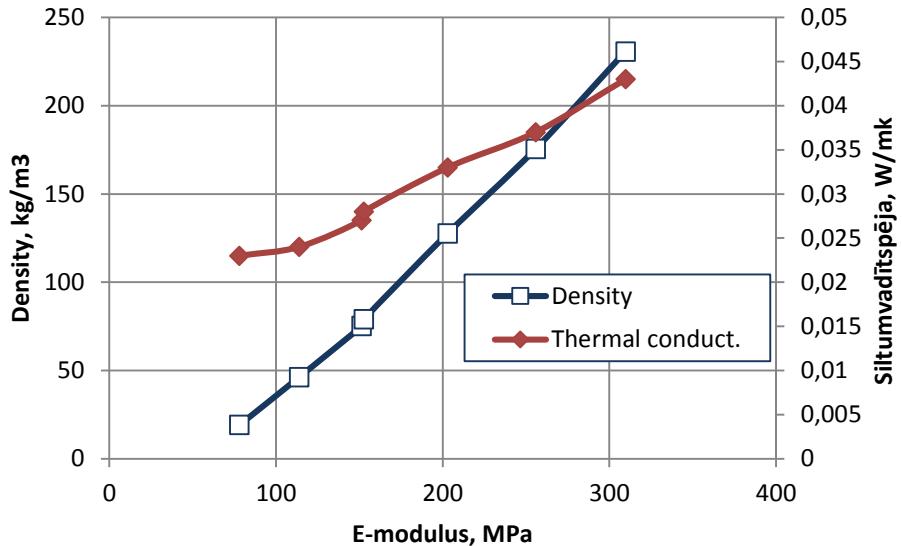


Figure 3. Relation between density, E-modulus, thermal conductivity for PU foam.

Chapter 3

Summary of numerical analysis, experimental validation and parametrical optimisation are given in the present chapter for sandwich panels with rib-stiffened and corrugated core.

The optimisation conducted in the present research is based on the approximation of mechanical response values acquired numerically from ANSYS commercial computer code. Initial geometry of the parametrical model is evaluated employing 4-node SHELL181 elements. Geometrical tolerance and virtual loading conditions are kept as close as possible to the original test environment at the same time making some assumptions for the computer analysis. For this reason, curved sandwich panel core shape was simplified to straight elements. It significantly reduced calculation time without noticeable effect on the output results. Panel skins and core walls were made out of layered material taking into account stiffness effect due to material orientation in the layer of every single ply in cross-section. Optimal mesh step of 10 mm was set and thickness of outer layers was reduced to take into account plywood surface grinding (on average 30 %).

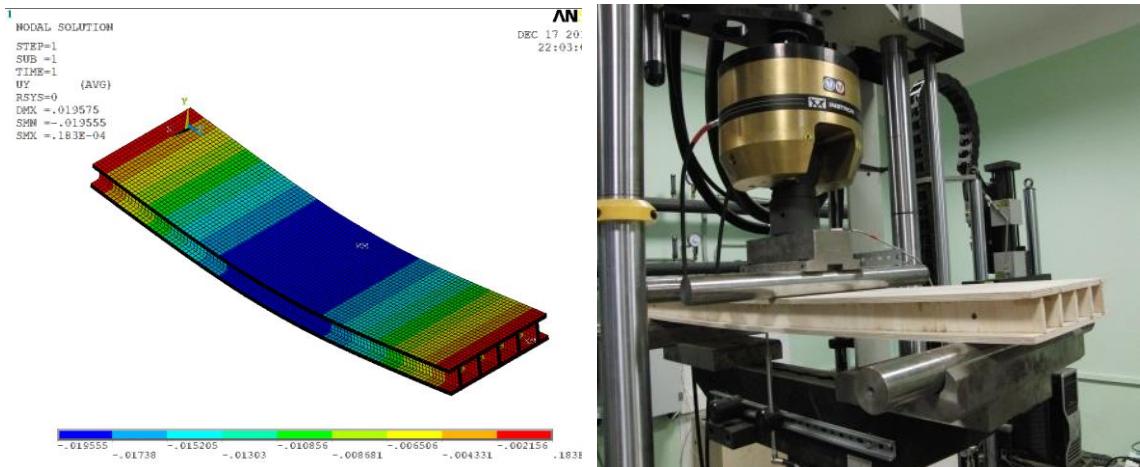


Figure 4. Numerical model and experimental validation of the panel.

As an output of numerical analysis, the deflection at the panel mid-span, strains at various locations on outer skins and the total volume of the structure were extracted.

Initial prototypes with rib stiffened and corrugated core were made with the aim of model validation by experimental tests in 4-point bending according to EN-789. Deflections in the mid-span and corresponding strains were compared with a numerical model. Good engineering correlation between experimental and numerical results was acquired, confirming that a numerical model could be successfully employed in further optimisation tasks.

Certain optimisation steps were done to improve the initial design of sandwich panel prototypes and to identify the sandwich panel design with equivalent performance as several conventional plywood boards. Acquired optimisation output was validated by prototyping sandwich panels with equivalent performance as 30, 40 and 50 mm solid plywood. Acquired results showed that the proposed methodology was suitable for design of weight efficient sandwich panels with equivalent bending behaviour as traditional plywood at the same time it was at least 45 % lighter. Example of bending tests for 40 mm plywood and akin performance of sandwich panels is given in Figure 5.

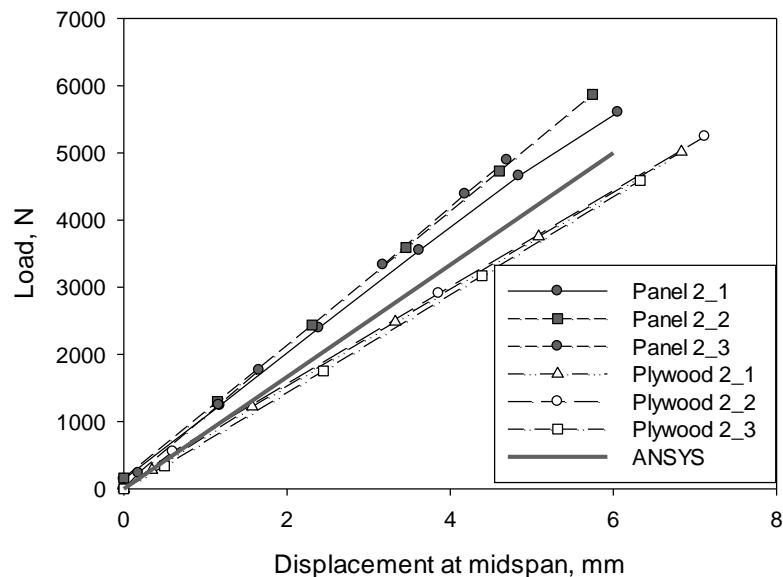


Figure 5. Load deflection curves for 40 mm plywood and equivalent sandwich panels.

The overall efficiency of plywood sandwich panels was demonstrated by formulating Pareto optimisation problem where maximisation of relative stiffness ΔS was done simultaneously by minimising the relative volume ΔV of the panel. Relative stiffness was acquired numerically by subdividing conventional plywood board and sandwich panel deflection, under the same loading and boundary conditions. Relative volume was acquired by dividing sandwich panel and plywood panel total volume. Between two types of core design panels the vertical stiffeners showed higher relative stiffness values compared to corrugated core thermoplastic sandwich panels as shown in Figure 6.

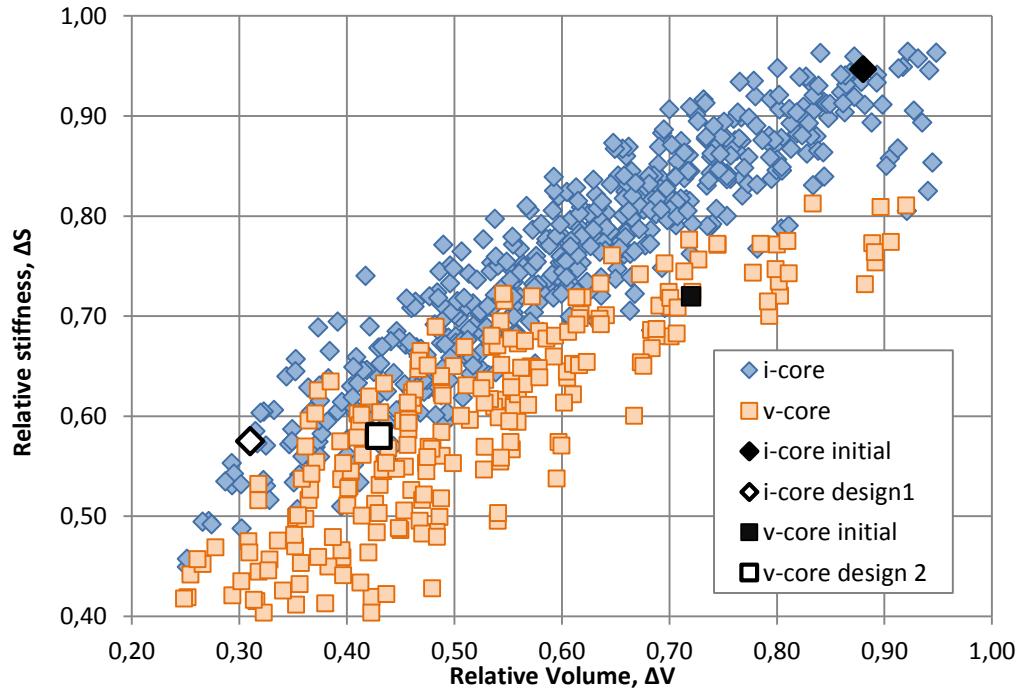


Figure 6. Pareto set for sandwich panels with vertical stiffener (i-core) and corrugated core (v-core).

In order to validate the suitability of rib-stiffened sandwich panels for application in load bearing decking structures, a set of all-plywood sandwich panels was designed and prototyped. Dimensions of the panel corresponded to one section of the scaffolding decking structure of the commonly used Plettac SL70 system (14). Standard 3m long panels were produced and tested with uniformly distributed load. It was confirmed that sandwich panels corresponded to stiffness requirements stated in EN 12811. Obtained weight of the scaffold panel was significantly lower than wood or aluminium decks.

Chapter 4

For further improvement of load/weight ratio of all-plywood sandwich panels, it was proposed to introduce corrugated glass-fibre based composite core. Initial trials involved sandwich core made of glass fibre thermoset composite (in Figure 7) made in several manufacturing steps.



Figure 7. Initial panels with thermoset glass fibre core.

Numerical and experimental results showed that composite material core could provide superior results compared to previous panel types. Pareto optimality plot in Figure 8 shows that it is possible to reach the plywood stiffness with equivalent thickness sandwich panel by saving of at least 20 % of the weight.

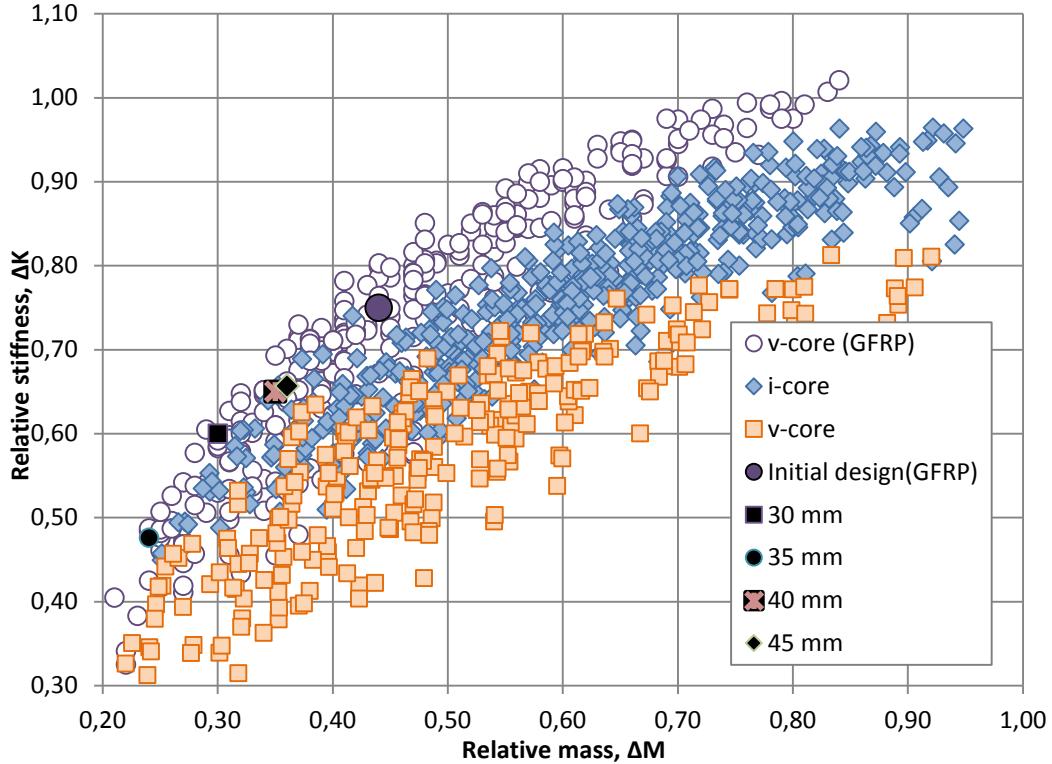


Figure 8. Pareto optimality between relative stiffness and mass.

In succeeding research stage technological processes of prototyping sandwich panels with thermoplastic glass fibre composite core were developed. One shot-manufacturing approach as required by MAPICC 3D project was realised. Example of sandwich panel with thermoplastic composite core is given in Figure 9.

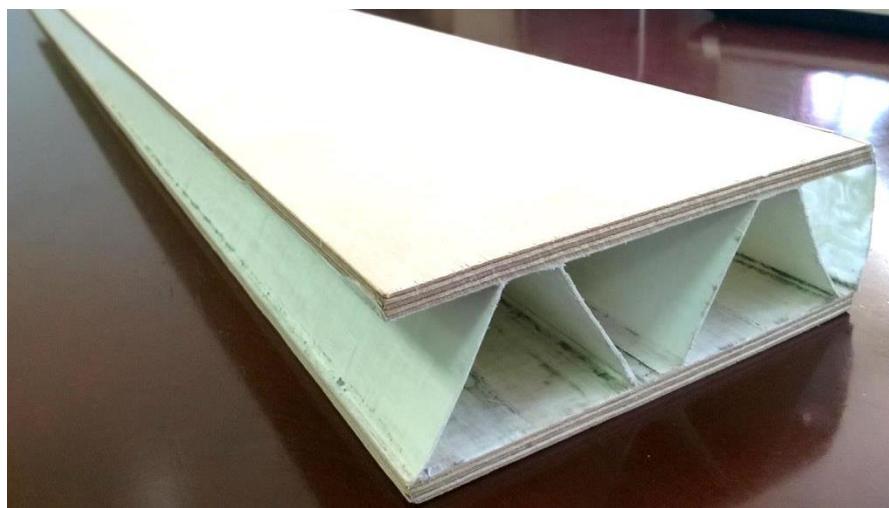


Figure 9. Initial double-section thermoplastic/plywood sandwich panel.

Chapter 5

Validation of numerical model performance is one of the crucial tasks to achieve a reliable tool for further design and optimisation of sandwich structures. Usually macro scale mechanical behaviour is determined by attaching strain-gauges or LVDT based displacement measurement devices. However, it is limited to a full field picture of displacements and strains on specimen structure. Much broader information about displacement and strain fields on the specimen outer surface could be achieved by non-contact measurement systems such as ARAMIS or IMETRUM. In the present chapter, potentials of non-contact displacement and strain measurements are demonstrated on the example of sandwich panel sophisticated configuration cellular wood core as shown in Figures 10 and 11.

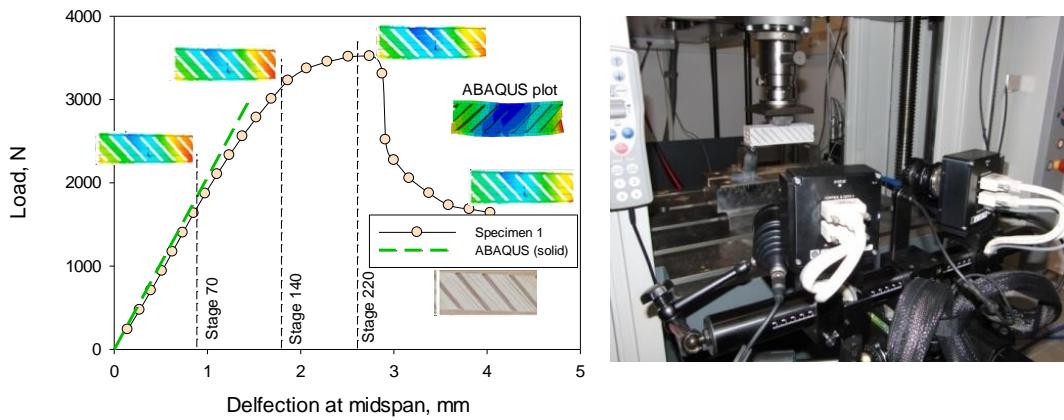


Figure 10. Displacement plots for a sandwich specimen with longitudinal core orientation and ARAMIS test set-up.

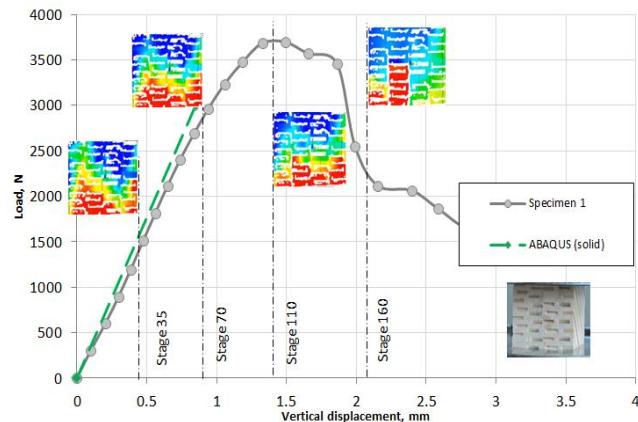


Figure 11. Displacement plots for compression specimens.

Chapter 6

Investigation on thermal behaviour of the sandwich panels with additional PU foam filler is summarised in Chapter 6. Acquired results mostly represent achievements in the IMATEH project. PU foam (made of partially renewable components) was filled in the sandwich panel with vertical stiffeners in order to improve heat insulation properties. It provides several benefits: air movement is trapped inside pores providing advantages for heat insulation properties; secondly, foam serves as bounding adhesive, thus making the manufacturing process

faster. Finally, foam filler improves mechanical properties of the whole sandwich panel — especially the shear strength and rigidity.

Foam mixing and filling tasks were made on dedicated equipment in cooperation with the Latvian State Institute of Wood Chemistry. The main challenge was to provide sufficient flatwise pressure in order to prevent face movement during chemical reaction of the foam. Achieved results showed that foam could be successfully applied as a binder for faces and stiffeners as shown in Figure 12.



Figure 12. Cross-section of rib-stiffened sandwich panel with and without foam core.

In addition, 2D thermal model was created applying ANSYS software and PLANE55 elements. Steady state analysis was employed where loads were applied as the temperature gradient on lower and upper. As a result of the thermal simulation — the sum of heat flow magnitudes from the base nodes was extracted and thermal conductivity was calculated by Fourier's law. Considering a linear relation between thermal conductivity, density and Young's elasticity it is possible to use these properties as continuous variables in optimisation tasks.

In the present research, a sequential space filling design of numerical experiments based on Latin Hypercube with Means Square error criterion was evaluated by in-house EdaOpt software. All responses were approximated employing Adaptive Basis Function Construction (ABFC) approach. Further it was used to determine combinations of variables providing the same mechanical performance as plywood boards.

The overall efficiency of plywood sandwich panels was demonstrated by formulating 3D Pareto optimisation problem where maximisation of relative stiffness ΔS was done simultaneously by minimising the relative mass ΔM and relative thermal conductivity ΔK of the panel in Figure 13.

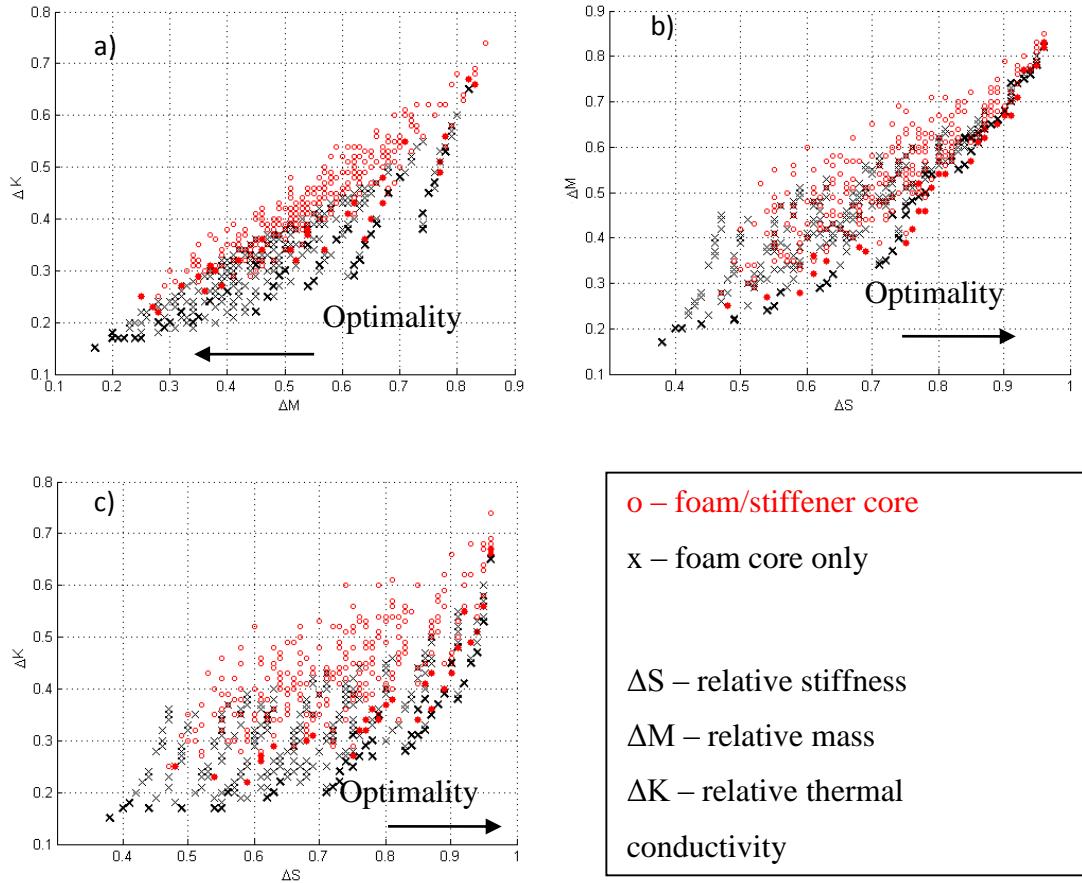


Figure 13. Graphic representation of Pareto optimality between each of two responses.

From graphs shown in Figure 13, it is seen that both core types have a similar stiffness/mass ratio. Most of the marked points (points on the Pareto front) in Figure 13.b have matching positions. However, sandwich panels with foam core have better relative thermal conductivity and stiffness and the mass ratio (Figure 13.b, 13.c). Pareto front of sandwich panels without stiffeners is significantly closer to an optimality point.

Chapter 7

The main approach to investigate the sandwich panel vibration damping properties under the dynamic load conditions is to extract the eigenfrequencies of the specimens with different core types. Mainly POLYTECH PSV400 equipment was employed for this purpose. A test set-up for a modal analysis is shown in Figure 14. Specimen is attached to a rigid frame with lightweight wires to achieve free-free boundary conditions. Motion excitation was induced by non-contact loudspeaker behind the panel. Sound waves with increasing frequency were generated by a modal amplifier. Full-field mobile scanning head made non-contact acceleration measurements on specimen surface at all frequencies. Data processor and software tools summarised measurement from a grid of measurement points and produced plots of frequency response graphs and visual plots of the mode shapes.

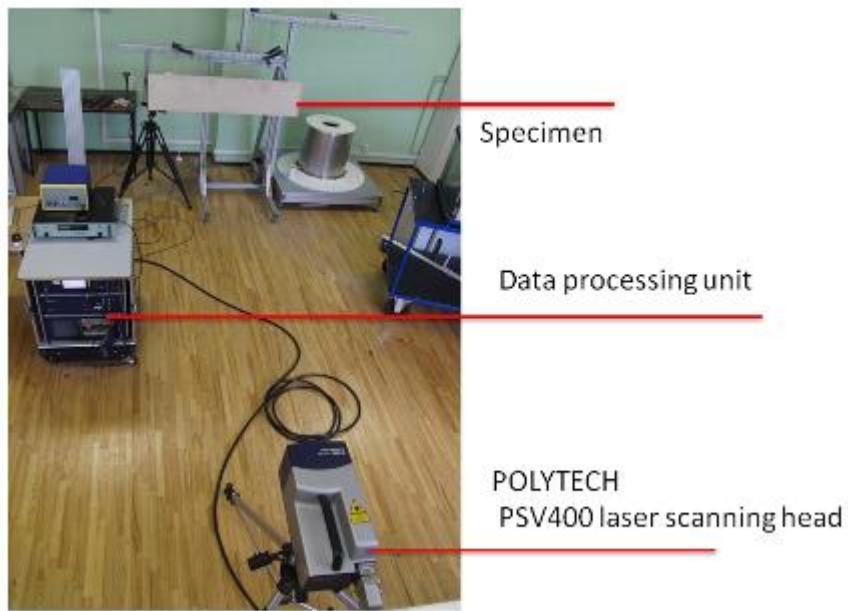


Figure 14. Modal analysis test set-up.

Typical frequency response graph for sandwich panels with 170 mm width and 5-layer surface and 1 mm core wall is shown in Figure 15. Four initial eigenfrequencies and magnitudes of response are shown for the verification of a set of samples. For comparison, one panel with a significant consolidation failure was added to the graph and had a clearly distinctive false response pattern. Compared to other panels, response values were several times lower and shifted to the right side for failed specimen. Mode shapes for successfully consolidated specimens had a symmetrical pattern; therefore, a reference for quality control could be evaluated.

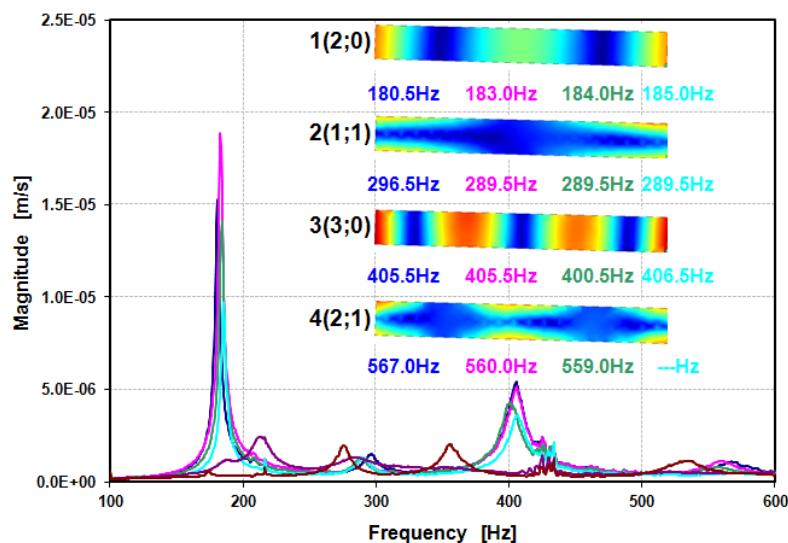


Figure 15. Frequency response curves and mode shapes for sandwich panels of 170 mm width.

Apart from quality control, one advantage of modal analysis set up is the determination of modal damping factor (loss factor) according to ASTM E756 [4]. General trend in Figure 16 shows only a small increase in a loss factor comparing plywood boards and sandwich panels especially for the N1 graph. However, a more significant tendency is the decrease in a loss factor for sandwich panels with foam filler, comparing panels with and without foam core. Most obvious reason for this trend is increased stiffness added by foams. Acquired results also possess high scatter of experimental values which could be reduced by increasing number of tested panels.

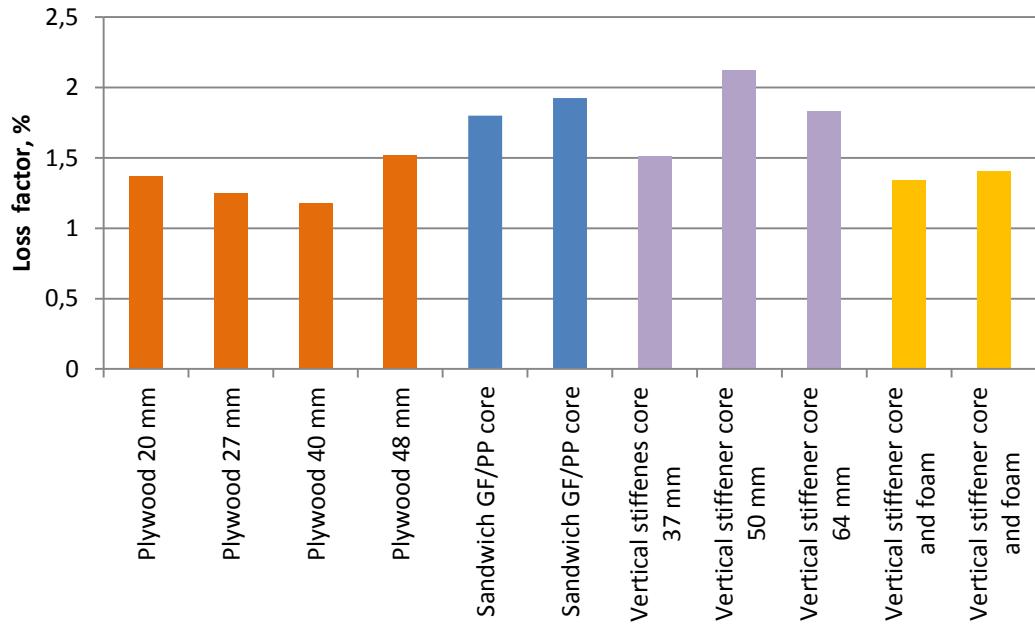


Figure 16. Loss factor for natural-frequency N_1 .

Chapter 8

In order to evaluate dynamic load resistance of plywood sandwich panels with different core types was tested to drop test tower INSTRON Dynatup 9250HV. The test setup is outlined in Figure 17. The equipment is applicable for impact damage tests of plastics, composites and various other materials, with the possibility to investigate material energy absorption and damage propagation characteristics. The system allows changing drop weight and height reaching impact speed up to 20 m/s. Max impact energy is 1600 Joules.

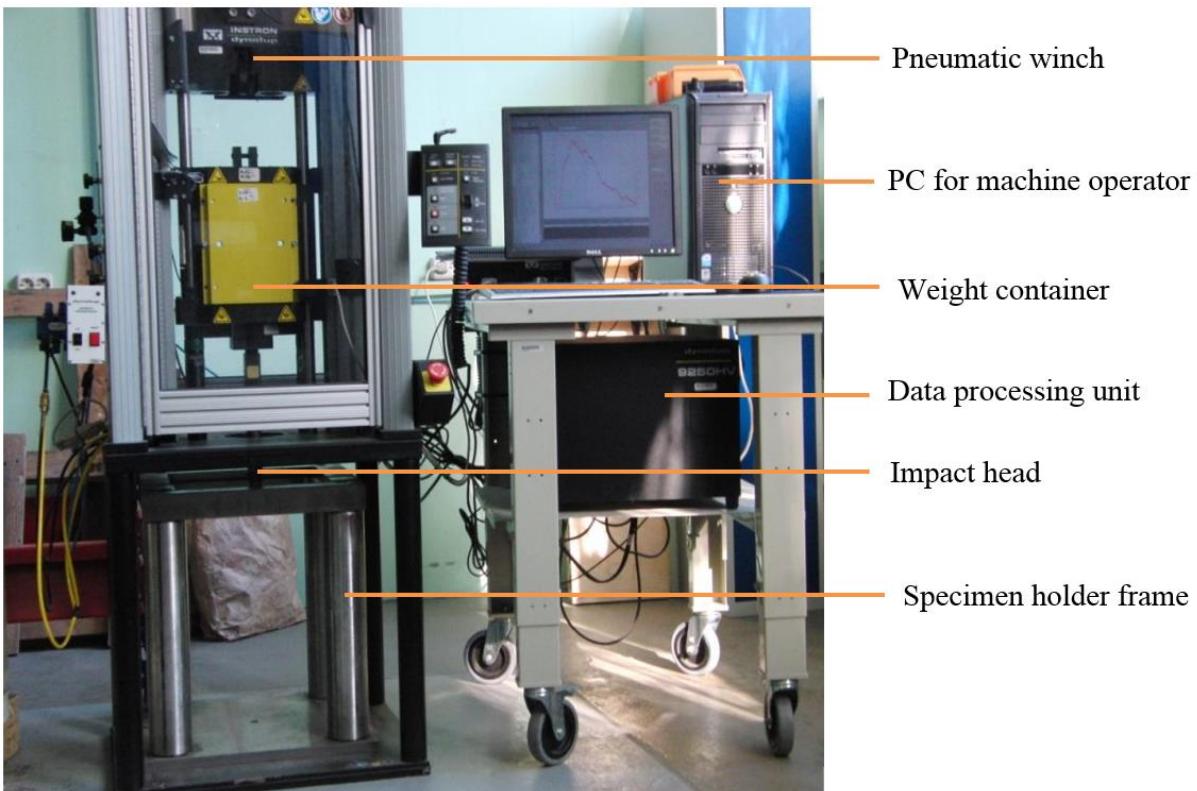


Figure 17. INSTRON Dynatup 9250HV drop tower.

Test procedure and specimen dimensions were taken from standard NF B51-327 - Plywood Dynamic Punching Test. The resistance to cracking and penetration should be determined by measuring the height of mass falling on square shaped specimen. Required specimen dimensions were 315x315 mm and punch head diameter was 25 mm. Specimen was placed inside rigid steel frame to achieve simple support on all four edges.

Cracking high corresponds to the height of mass which causes cracking of the specimen — generally on the opposite side. Perforation height corresponds to penetration of punch more than 12.5 mm inside the test piece.

Three types of test specimens were investigated: 1) solid plywood and particle boards plates, 2) plywood specimens with thin/elastic middle layer of cork or polymers, 3) high thickness sandwich panels (> 50 mm) with various core configuration. For comparative reason, cracking and penetration energy is divided by thickness.

Observing data in Figure 18, one can notice a gradual increase in cracking and penetration resistance. Cracking resistance for poplar plywood and OSB board is similar; however, penetration energy is significantly higher for poplar plywood. Particle board applied in furniture industry shows the weakest impact performance.

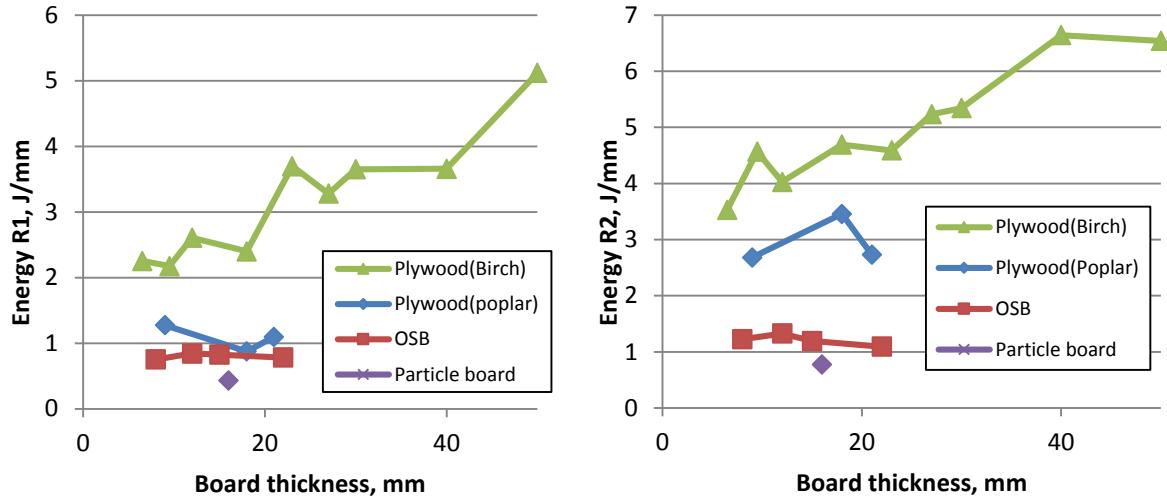


Figure 18. Impact energy of plywood, OSB and particle board specimens.

Specimens with cork core generally have about 20 % higher cracking resistance compared to other core types. Cracking resistance for all specimens is close to analogue values of similar thickness plywood; however, penetration energy is significantly higher (at least 2-fold) compared to plywood boards. Obtained results suggest that a thin-elastic middle layer reduces the stiffness of the specimen and part of the energy is absorbed due elastic bending of the specimen.

In contrast to all previous impact tests, high-thickness sandwich panels do not have cracking resistance values. Specimens reach perforation energy limit before back side fracture occurs. Impact resistance of specimen is heavily dependent on impact position. Much less energy is needed to perforate specimen skin between stiffeners compared to impact directly on stiffener. Thus, both cases were tested. The impact between stiffeners is marked with (a) and a direct hit of the stiffener with (b).

Normalised impact energy for various core types is displayed as a bar chart in Figure 19. It is clearly noticeable that difference between the impact on stiffener and between stiffeners varies at least twice. Another trend is doubled penetration energy between stiffeners for rib-stiffened sandwich-specimens with core foam filler. Panels with corrugated core have similar performance as rib-stiffened panels with foam filler. It should be pointed out that corrugated core has several advantages over all-plywood panels. Firstly, overall density is significantly lower due to 5-layer surfaces and thin core wall. The average density of panels with the corrugated core is 230 kg/m^3 compared to 325 kg/m^3 for vertical stiffeners and foam. Secondly, corrugated core has a wider contact area with specimen surface (20 mm to 9 mm) and chance to hit stiffener is higher than in the case of vertical stiffeners.

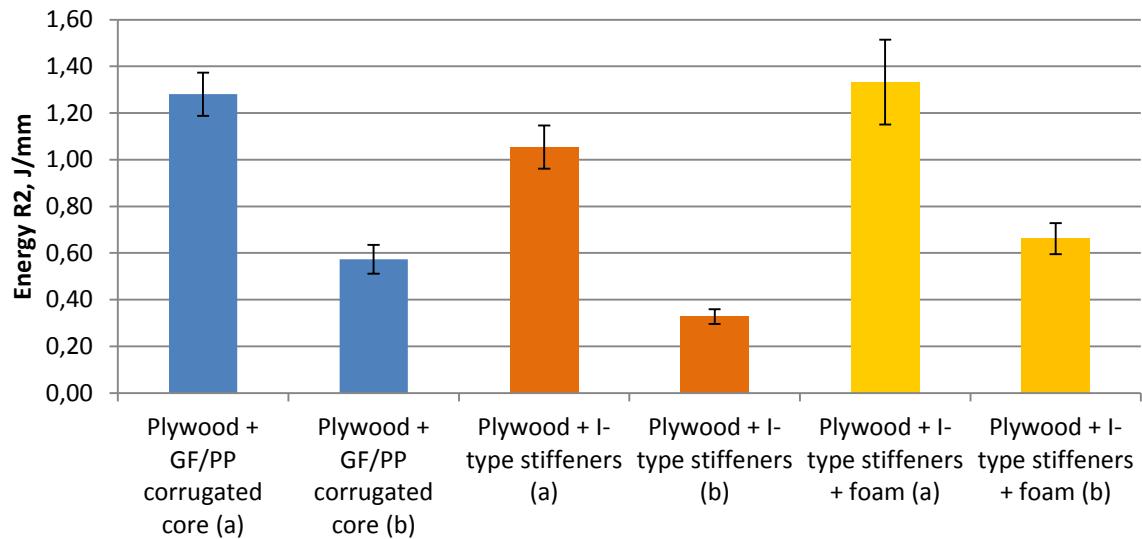


Figure 19. Penetration resistance for various thickness plywood and sandwich panels.

Impact damage for sandwich panels with corrugated GF/PP core is shown in Figure 20. Specimen was subjected to impact damage from both sides. In all cases, surface is completely penetrated by impact head. Inside view of the panel with the corrugated core shows that the largest residual damage is visible after impact between stiffeners. On the both surfaces rupture of the thermoplastic composite layer is clearly visible. It is additional evidence of the strong bond between wood fibres and composite.

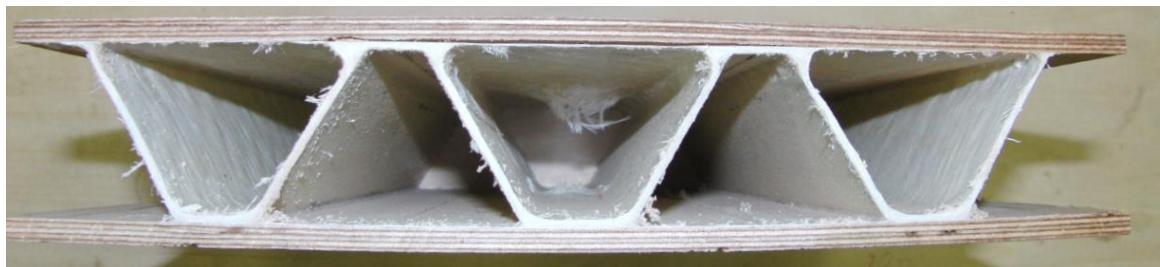


Figure 20. Inside view of the corrugated core sandwich panel.

Conclusions

Within the present Doctoral Thesis, it has been confirmed that plywood sandwich panels have enhanced multifunctional properties (such as heat and vibration insulation and impact absorption) compared to conventional plywood. In addition, these properties could be tailored with the developed design methodology. Based on the statistically credible number of performed experimental tests, numerical modelling and optimisation, a set of conclusions have been drawn:

1. Although mechanical properties of the wood veneer show significant scatter due to processing factors, the acquired properties are still applicable for accurate mechanical simulation of plywood in the range from 3 to 35 plies (full spectre of conventional plywood thicknesses).
2. The method for design of equivalent stiffness lightweight sandwich panels has been developed taking industrial plywood boards as a reference. The method is based on high fidelity numerical model, experimental validation and parametrical optimisation. Practical approbation has been done by implementing optimisation results in industrial production trials by JSC “Latvijas Finieris” where sandwich panel with vertical stiffeners has been produced to meet the requirements of scaffolding deck with 3 m length.
3. The method based on the Pareto optimality approach could be applied for evaluating the potentially most efficient sandwich panel designs from the perspective of relative stiffness, mass and thermal conductivity. It is also a valuable tool to compare core topologies. Verification confirms that the method allows designing fully stressed structures up to a failure state.
4. Novel sandwich panels with plywood faces and corrugated thermoplastic core have been prototyped for the first time in one-shot manufacturing technology. Characterisation of mechanical properties and impact resistance has been performed. Results of optimisation and experimental tests suggest that new sandwich panels have significantly better mechanical performance/weight ratio compared to single material panels with stiffener or corrugated core. It is possible to substitute solid plywood with the same thickness sandwich panels and achieve 20 % weight saving in bending load cases alone.
5. Influence of three different core types on multifunctional properties of the sandwich panels has been outlined:
 - i) Foam core filler reduces thermal conductivity to 0.05-0.07 W/(m·K) compared to 0.12 W/(m·K) for conventional plywood.
 - ii) Plywood sandwich panels have a potential to improve vibration damping. Due to lower stiffness of rib stiffened panels loss factor is increased by 30 % compared to conventional plywood.
 - iii) Impact resistance of sandwich panels depends on punch location and skin thickness. Foam core filler or skin reinforced with the layer of thermoplastic composite improves penetration energy by 40–50 % compared to plain rib-stiffened sandwich panel.

Kopsavilkuma atsauses/ References in the Summary of the Doctoral Thesis

1. Finnish Forest Industries Federation, Handbook of Finnish Plywood, Kirjapaino Markprint Oy, Lahti, Finland, 2007.
2. Bekhta, P., Hiziroglu, S. & Shepelyuk, O. Properties of Plywood Manufactured from Compressed Veneer as Building Material. Materials and Design, vol. 30, no. 4, 2009, pp. 947–953.
3. Bekhta, P., Niemz, P. & Sedliacik, J. Effect of Pre-pressing of Veneer on the Glueability and Properties of Veneer-Based Products. European Journal of Wood and Wood Products, vol. 70, no. 1–3, 2012, pp. 99–106.
4. Aro, M.D., Brashaw, B.K. & Donahue, P.K. "Mechanical and Physical Properties of Thermally Modified Plywood and Oriented Strand Board Panels. Forest Products Journal, vol. 64, no. 7–8, 2014, pp. 281–289.
5. Gangi, M., Tabarsa, T., Sepahvand, S. & Asghari, J. Reduction of Formaldehyde Emission from Plywood. Journal of Adhesion Science and Technology, vol. 27, no. 13, 2013, pp. 1407–1417.
6. Terzi, E., Kartal, S.N., White, R.H., Shinoda, K. & Imamura, Y. Fire Performance and Decay Resistance of Solid Wood and Plywood Treated with Quaternary Ammonia Compounds and Common Fire Retardants. European Journal of Wood and Wood Products, vol. 69, no. 1, 2011, pp. 41–51.
7. Hunt, J.F. 3D Engineered Fiberboard: Finite Element Analysis of a New Building Product. International ANSYS Conference. Pittsburgh, PA, 2004, pp. 24–26.
8. Aicher, S., Stritzke, C. & Klöck, W. Keel-Web Element – Novel Wood-Based Lightweight Element for Wide Spans. WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering, Proceedings, 2014.
9. Fernandez-Cabo, J.L., Majano-Majano, A., San-Salvador Ageo, L. & Ávila-Nieto, M. Development of a Novel Façade Sandwich Panel with Low-Density Wood Fibres Core and Wood-Based Panels as Faces. European Journal of Wood and Wood Products, vol. 69, no. 3, 2011, pp. 459–470.
10. Kawasaki , T., Zhang, M., Kawai, S. Manufacture and Properties of Ultra-Low-Density Fibreboard. J. Wood Sci. 44: 354–360, 1998.
11. Sandwich Panels with Cardboard Honeycomb Core for Furniture Applications. Retrieved from <http://www.hunger-moebel.de> on 7 December 2015.
12. Kerto Ripa LVL Floor Elements. Retrieved from <http://www.metsawood.com/uk/Applications/Building-and-Construction/Flooring-Solutions/Kerto-Ripa> on 7 December 2015.
13. Kawasaki, T., Zhang, M., Wang, Q., Komatsu, K., Kawai, S. Elastic Moduli and Stiffness Optimization in Four-Point Bending of Wood-Based Sandwich Panel for Use as Structural Insulated Walls and Floors. J Wood Sci 52(4): 302–310, 2006.
14. Plettac SL 70/100 Facade Scaffolding. ALTRAD plettac assco GmbH, 2004.