



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Māris Šinka**

**DABĪGO ŠĶIEDRU ENERGOEFEKTĪVI  
BIOKOMPOZĪTI AR PAZEMINĀTU IETEKMI  
UZ VIDU UN TO PIELIETOJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

**ENERGY-EFFICIENT NATURAL FIBER  
BIOCOMPOSITES WITH REDUCED ENVIRONMENTAL  
IMPACT AND THEIR APPLICATIONS**

Summary of the Doctoral Thesis



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte

Materiālu un konstrukciju institūts

**RIGA TECHNICAL UNIVERSITY**

Faculty of Civil Engineering

Institute of Materials and Structures

**Māris Šinka**

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorants  
Doctoral Student of the Study Programme “Construction”

**DABĪGO ŠĶIEDRU ENERGOEFEKTĪVI  
BIOKOMPOZĪTI AR PAZEMINĀTU IETEKMI  
UZ VIDI UN TO PIELIETOJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

**ENERGY-EFFICIENT NATURAL FIBER  
BIOCOMPOSITES WITH REDUCED  
ENVIRONMENTAL IMPACT AND THEIR  
APPLICATIONS**

Summary of the Doctoral Thesis

Zinātniskais vadītājs / Scientific supervisor

*Dr. sc. ing.*

GENĀDIJS ŠAHMENKO

RTU Izdevniecība / RTU Press

Rīga 2018

Šinka M. Dabīgo šķiedru energoefektīvi biokompozīti ar pazeminātu ietekmi uz vidi un to pielietojums. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 92 lpp.

Sinka M. Energy-efficient natural fiber biocomposites with reduced environmental impact and their applications. Summary of the Doctoral Thesis. Riga: RTU Press, 2018. 92 p.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-06" 2018. gada 29. jūnija lēmumu, protokols Nr. 5-2018.

Published in accordance with the decision of the Promotional Council "RTU P-06" of 29 June 2018, Minutes No. 5-2018.

Promocijas darbs izstrādāts, pateicoties autora līdzdalībai šādos projektos:

- VPP projekts "Inovātivi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam (IMATEH)" (RTU ID 1847);
- ERAF projekts Nr. 1.1.1.1/16/A/007 "Jauna koncepcija ilgtspējīgas, zema energopatēriņa ēku būvniecībai" (RTU ID 2590);
- ERAF projekts Nr. 1.1.1.1/16/A/192 "Viedo risinājumu gandrīz nulles enerģijas ēkām izstrāde, optimizācija un ilgtspējas izpēte reāla klimata apstākļos" (RTU ID 2593).

Research was developed within the framework of the following projects:

- National Research Programme "Inovative Materials and Smart Technologies for Environmental Safety (IMATEH)" (RTU ID 1847);
- ERAF project No. 1.1.1.1/16/A/007 "A New Concept for Sustainable and Nearly Zero-Energy Buildings" (RTU ID 2590);
- ERAF project No. 1.1.1.1/16/A/192 "Development, optimization and sustainability evaluation of smart solutions for nearly zero energy buildings in real climate conditions" (RTU ID 2593).



Studiju un zinātnes  
administrācija



Izglītības un zinātnes ministrija



ISBN 978-9934-22-156-9 (print)

ISBN 978-9934-22-157-6 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 2. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 340. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors *Dr. sc. ing.* Juris Smirnovs, Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc. profesors, vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Sigitas Vejelis,

Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Pētniece *Dr. sc. ing.* Paulien Strandberg-de Druijn,

Lundas Universitāte, Zviedrija

## APSTIPRINĀJUMS

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.

Māris Šinka ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 74 attēli, 33 tabulas, astoņi pielikumi, kopā 121 lappuse. Literatūras sarakstā ir 163 nosaukumi.

# **DOCTORAL THESIS PROPOSED TO RIGA TECHNICAL UNIVERSITY FOR THE PROMOTION TO THE SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF ENGINEERING SCIENCES**

To be granted the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences, the present Doctoral Thesis has been submitted for the defence at the open meeting of RTU Promotion Council on November 2, 2018 at the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, 6A Kipsalas Street, Room 340.

## **OFFICIAL REVIEWERS:**

Professor Dr. sc. ing. Juris Smirnovs,

Riga Technical University

Assoc. Professor, Chief Research Fellow Dr. sc. ing. Sigitas Vėjelis,

Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania;

Researcher Dr. sc. ing. Paulien Strandberg-de Bruijn,

Lund University, Sweden.

## **DECLARATION OF ACADEMIC INTEGRITY**

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. I confirm that this Doctoral Thesis had not been submitted to any other university for the promotion to a scientific degree.

Maris Sinka ..... (signature)

Date: .....

The Doctoral Thesis has been written in Latvian. It consists of Introduction; 5 chapters; Conclusion; 74 figures; 33 tables; 8 appendices; the total number of pages is 121. The Bibliography contains 163 titles.

## Saturs/Content

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	7
Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne.....	7
Darba mērķis .....	8
Darba uzdevumi .....	8
Pētījuma zinātniskā novitāte.....	8
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums.....	9
Pētīšanas metodika .....	10
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas .....	10
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes .....	10
Promocijas darba sastāvs un apjoms .....	11
Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs un publikāciju saraksts..	11
Patentu saraksts .....	13
1. LITERATŪRAS APSKATS .....	14
2. DABĪGO ŠĶIEDRU BOKOMPOZĪTU IZPĒTES METODES .....	16
3. PĒTĪJUMOS IZMANTOTO IZEJMATERIĀLU APRAKSTS .....	18
4. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA.....	19
4.1.    Dabīgo šķiedru biokompozītiem piemērotu saistvielu izstrāde .....	19
4.1.2.    Magnija bāzes saistvielas .....	20
4.2.    Dabīgo šķiedru biokompozītu mehāniskās un siltumtehniskās īpašības.....	22
4.3.    Biokompozītu ugunsizturība .....	25
4.4.    Biokompozītu mikrobioloģiskās noturības testu rezultāti.....	27
4.5.    Lauka testi siltumvadītspējas un mitruma migrācijas noteikšanai .....	30
5. DABĪGO ŠĶIEDRU BOKOMPOZĪTU DZĪVES CIKLA ANALĪZE .....	34
5.1.    Mērķa un apjoma noteikšana.....	34
5.1.1.    DCA metode biokompozītiem .....	34
5.2.    Inventarizācijas analīze .....	36
5.3.    Rezultātu analīze un interpretācija .....	36
5.3.1.    Funkcionālo vienību salīdzinājums.....	36
5.3.2.    Alternatīvu materiālu salīdzinājums .....	40
SECINĀJUMI .....	42

GENERAL PRESENTATION OF THE THESIS .....	44
Importance of the topic and problem statement .....	44
The goal of research .....	45
The tasks of research .....	45
Scientific novelty of the research .....	46
The practical significance of the doctoral thesis .....	46
Research methodology .....	47
Range of research and scope of applications for the obtained results .....	48
The arguments put forward for defense of the thesis .....	48
Structure and length of the doctoral thesis .....	49
Approbation of the obtained research results in international conferences and list of publications .....	49
List of patents .....	51
1. LITERATURE REVIEW .....	52
2. RESEARCH METHODS FOR NATURAL FIBERS.....	54
3. DESCRIPTION OF RAW MATERIALS USED IN RESEARCH.....	56
4. EXPERIMENTAL PART.....	58
4.1. Development of binders suitable for natural fiber biocomposites .....	58
4.1.1. Lime-based binders .....	58
4.1.2. Magnesium-based binders .....	59
4.2. Mechanical and thermal properties of natural fiber biocomposites .....	61
4.3. Fire resistance of biocomposites .....	64
4.4. Results of microbiological stability tests for biocomposites.....	66
4.5. Field tests to determine the thermal conductivity and moisture migration .....	69
5. LIFE CYCLE ANALYSIS OF NATURAL FIBER BIOCOMPOSITES.....	73
5.1. Defining of the target and scope .....	73
5.1.1. LCA method for biocomposites.....	73
5.2. Inventory analysis .....	75
5.3. Analysis and interpretation of results .....	75
5.3.1. Functional unit comparison.....	75
5.3.2. Comparison of alternative materials .....	79
CONCLUSIONS .....	82
LITERATŪRAS SARAKSTS / LIST OF REFERENCES.....	84

# DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Pēdējos gados pasaules politiskie līderi ir parakstījuši vairākas vienošanās, apņēmoties ierobežot CO<sub>2</sub> izmešu daudzumu, piemēram, Parīzes Klimata līgumu, ko Eiropas Savienība (ES) ratificēja 2016. gadā. Lai īstenotu šo apņemšanos, ES ir definējusi vairākus politiskus mērķus vides jomā – pieņemta Direktīva 2010/31/ES, kuras mērķis ir līdz 2020. gadam par 20 % samazināt CO<sub>2</sub> izmešu apjomu [1], kā arī ir izstrādātas Klimata un enerģētikas politikas vadlīnijas 2030. gadam ar mērķi līdz 2030. gadam par 40 % samazināt siltumnīcas gāzu apjomu un paaugstināt energoefektivitāti par 27 % [2].

Viena no lielākajiem CO<sub>2</sub> izmešus radošajām nozarēm ir ēku būvniecības nozare [3], [4], galvenokārt saistībā ar enerģiju, kas tiek izmantota nepietiekami izolētu ēku apkurei, ventilācijai un gaisa kondicionēšanai (apkure, ventilācija un kondicionēšana – AVK), kā arī būvmateriālu ražošanai [5], [6]. Turklāt, lai arī siltumnīcas efekta gāzu (SEG) izmeši šobrīd ir visvairāk pieminētais ietekmes uz vidi faktors (pieaug vienprātība par nepieciešamību to samazināt), ir arī citi ietekmes uz vidi faktori, ko būtu jāņem vērā, izstrādājot un ieviešot jaunus būvmateriālus būvniecības sektorā [7], [8], piemēram, okeāna un jūras paskābināšanās [9], [10], eitrofikācija [11] un toksicitāte [12], [13]. Iemesls tam ir būvmateriālu ražošanas būtiskā ietekme uz vidi, kas saistīta ar milzīgu dabisko iegu patēriņu [14] – aptuveni 3000 Mt/gadā, kas ir vairāk nekā jebkurā citā rūpniecības nozarē [15], kā arī ar augstu energoresursu un kurināmā patēriņu. Lai samazinātu šo faktoru negatīvo ietekmi, ir nepieciešams mainīt mājokļu būvniecības tradīcijas, palielinot īpatsvaru būvmateriāliem ar labām siltumtehnikām īpašībām (lai samazinātu enerģijas patēriņu mājāsaimniecību AVK vajadzībām), izmantot būvmateriālu ražošanai atjaunojamus dabas resursus vai daudz lietderīgāk izmantot neatjaunojamus dabas resursus, būvmateriālu ražošanu organizēt ar zemāku energoietilpību, samazināt ietekmi uz vidi būvmateriālu ražošanas procesā u. tml. [16], [17].

Būvmateriālu grupa ar zemu ietekmi uz vidi ir dabīgo šķiedru biokompozīti. Šie materiāli ir veidoti no sevišķi porainām dabīgām pildvielām ar nelielu minerālās saistvielas daudzumu, tie ir pašnesoši un nodrošina zemu siltumvadītspēju, līdz pat 0,05 W/m·K. Zemo ietekmi uz vidi nodrošina bioloģiskas izcelsmes pildvielas, kuru audzēšanā patērēts neliels enerģijas daudzums un kas fotosintēzes ceļā ieslēgušas sevī oglekļa dioksīdu, kā arī nelielais minerālās saistvielas patēriņš.

Viens no izplatītākajiem šīs grupas materiāliem ir kaļķa-kaņepju biokompozīts (KKB), kas sastāv no kaņepju ražošanas rezultātā radītiem blakusproduktiem – kaņepju spaļiem (bioloģiskas izcelsmes pildviela) un hidrauliskā kaļķa (saistviela). Augšanas procesā kaņepes fotosintēzes ceļā ir uzņēmušas CO<sub>2</sub> [18], un kaļķis, cietējot karbonizācijas ceļā, ir ieslēdzis sevī CO<sub>2</sub>, kā rezultātā rodas oglekļa ziņā neitrāls vai pat negatīvs galaprodukts, uzkrājot no 6,67 līdz 136,65 kg CO<sub>2</sub> ekv./m<sup>3</sup> [19]–[22]. Materiālam ir arī labas siltumizolācijas īpašības – no 0,05 līdz 0,12 W/m·K [23], zecila mitruma uzņemšana [24], [25] un akustiskas īpašības [26], turklāt tā ietekme uz vidi ir neliela, salīdzinot ar tradicionāli izmantotiem būvmateriāliem [19].

Kaļķa-kaņepju biokompozītā lietotā saistviela (hidrauliskais kaļķis) ir ar salīdzinoši nelielu mehānisko stiprību, bet izmantoto kaņepju pildvielu īpatsvars ir samērā liels. Turklāt KKB materiālos novērojama kaļķu saistvielas saistīšanās un cietēšanas aizkavēšanās, kas izskaidrojama ar kaņepju spaļos esošajiem dabiskajiem cukuriem (bioloģiski palēninātāji), kuru ietekmē samazinās arī sacietējušās javas mehāniskās īpašības [27]. Tā rezultātā KKB būvniecībā var tikt izmantoti tikai kā pašnesoši siltumizolācijas materiāli ar iestrādi uz vietas būvlaukumā [28].



Viens no materiāliem, ko var izmantot, lai aizvietotu kaļķi kaļķa-kaņepju biokompozītos un palielinātu to mehāniskās īpašības, ir saistvielas uz magnija bāzes. Šīs saistvielas parasti izmanto savienojumā ar dažādām bioloģiskas izcelsmes pildvielām, tādām kā koks [29]–[31], rapša kāti [32], koka skaidas [33], kaņepes [34] un arī citi lauksaimniecības blakusprodukti [35]. Magnija saistvielu priekšrocība pretēji kalcija saistvielām ir to ievērojami labāka savietojamība ar organiskās izcelsmes pildvielām [29]. Tas saistīts ar to, ka kaļķu saistvielas cietēšanas procesā rada sārmainu vidi, kurā lignīns un citi organiski savienojumi atdalās no bioloģiskas izcelsmes materiāliem, tādējādi palēninot cementa vai kaļķa sacietēšanu [36].

Dabīgo šķiedru biokompozītiem no ekonomiskā un ekoloģiskā viedokļa ir augsts potenciāls aizstāt tradicionālos būvmateriālus, tomēr ir nepieciešams veikt pētījumus un izstrādāt uzlabotus biokompozītus, kas atbilst galvenajām būvmateriālu pamatprasībām – mehāniskajām, fizikālajām un ilgmūžības īpašībām. Lai pierādītu šo materiālu ilgtspēju un priekšrocības, nepieciešams veikt pētījumus reālos klimatiskos apstākļos, kā arī aprēķināt šo materiālu ietekmi uz vidi un salīdzināt to ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.

## **Darba mērķis**

Izstrādāt dabīgo šķiedru biokompozītus ar uzlabotām mehāniskajām, fizikālajām un ilgmūžības īpašībām, aprēķināt to ietekmi uz vidi, izstrādājot metodi šo materiālu dzīves cikla analīzei un salīdzināšanai ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.

## **Darba uzdevumi**

Lai sasniegtu pētījuma mērķi, ir izvirzīti šādi uzdevumi:

1. Izstrādāt biokompozītiem piemērotas saistvielas uz kaļķa un magnija bāzes, izmantojot atkritumproduktus kā aktīvās mikropiedevas, lai minimizētu saistvielas ietekmi uz vidi.
2. Izpētīt dažādu faktoru (pildvielu īpašību, saistvielu veida, u.c.) ietekmi uz biokompozīta mehāniskajām un fizikālajām īpašībām.
3. Noteikt biokompozītu bionoturības un ugunsreakcijas īpašības atkarībā no izmantotajām saistvielām.
4. Izstrādāt mērsistēmu, lai veiktu pētījumus par biokompozīta hidrotermiskajām īpašībām reālos ekspluatācijas apstākļos; izmantojot izstrādāto sistēmu vienlaikus noteikt mitruma un temperatūras sadalījumu sienas šķērsgriezumā, kā arī tā siltumtehnikās īpašības.
5. Izstrādāt metodi, kas izmanto eksperimentālos biokompozītu datus, lai varētu novērtēt dabīgo šķiedru biokompozīta ietekmi uz vidi (arī CO<sub>2</sub> emisiju), kā arī salīdzināt iegūtos datus ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.

## **Pētījuma zinātniskā novitāte**

- Izstrādāta un iegūta dabīgo šķiedru kompozītiem piemērota kaļķa bāzes saistviela, kurā stiprības uzlabošanai kaļķis daļēji aizstāts ar metakaolīnu saturošiem atkritumproduktiem, tādējādi samazinot saistvielas ietekmi uz vidi. Pierādīts, ka ar metakaolīna atkritumproduktiem iespējams panākt stiprības ziņā līdzīgu saistvielu kā ar tradicionāli lietoto hidrauliskā kaļķa saistvielu – ar vismaz 10 MPa spiedes stiprību.

- Izveidoti jauna tipa zema blīvuma dabīgo šķiedru biokompozīti, izmantojot ātri cietējošās magnijā bāzes saistvielas, kas var nodrošināt atbilstošu stiprību pie zema blīvuma un siltumvadītspējas – ap 200 kg/m<sup>3</sup> un 0,062 W/m·K. Biokompozītiem ir zema ugunsreakcija – B klase saskaņā ar LVS EN 13501 – un līdzvērtīgi augsta bionoturība kā tradicionāli lietotiem būvmateriāliem, kas satur bioloģiskas izcelsmes pildvielas.
- Pirmo reizi dabīgo šķiedru biokompozītiem pētīta darbība lauka apstākļos, izmantojot speciāli izstrādātu mērsistēmu, kas sastāv no temperatūras, relatīvā mitruma un siltuma plūsmas sensoriem. Proti, vienlaikus tiek mērīts mitruma un temperatūras sadalījums sienas biezumā, kā arī sienas siltumpretestība. Izmantota īpaši izstrādāta metode U vērtību aprēķinam dinamisku siltuma plūsmu gadījumos. Valsts pētījumu programmas ietvaros izstrādātas “Datu apkopošanas sistēmas izstrādes vadlīnijas”, kurās aprakstīta izvēlēta datu uzkrāšanas sistēma, tās uzbūves un komponentu izvēles kritēriji un nostādnes, sistēmas darbības principi, kā arī mērījumu metodoloģija.
- Dzīves cikla analīze – izstrādāta metode dabīgo šķiedru biokompozītu dzīves cikla aprēķināšanai un to salīdzināšanai ar tradicionāli lietotajiem materiāliem, par atskaites punktiem izmantojot spiedes stiprību un siltumvadītspēju. Metode ļauj izmantot eksperimentālos datus aprēķina veikšanai, kā arī salīdzināt materiālu ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.

## Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Izstrādāts Latvijas patents P-17-77 “Bio-šķiedru un magnija oksihlorīda cementa daudzslāņu celtniecības panelis un tā izgatavošanas paņēmieni”. Izgudrojums attiecas uz būvniecības materiālu izgatavošanas jomu, tas var tikt izmantots, lai izgatavotu dažādus izstrādājumus ar paaugstinātām siltumizolācijas īpašībām. Tiek piedāvāts videi draudzīgs, porains materiāls, kas veidots no biošķiedru saturošiem lauksaimniecības blakusproduktiem (kaņepju vai linu spaļi, rapšu, bambusa, niedru u. c. stiebi) un magneziālajām saistvielām. Minerālam ir augstvērtīgas siltumizolācijas īpašības, mitruma buferspēja un augsta ugunsizturība.

Izstrādāts Latvijas patents P-17-86 “Magnija fosfāta cementa un bioloģiskās izcelsmes pildvielu ātrās cietēšanas celtniecības bloks un tā izgatavošanas paņēmieni”. Izgudrojums var tikt izmantots, lai ražotu ātri cietējošus celtniecības blokus, izmantojot vietējas izcelsmes pildvielas. Tiek piedāvāts paņēmieni ekonomiski izdevīgu celtniecības bloku izgatavošanai, izmantojot šķiedru saturošas vietējas izcelsmes bioloģiskas pildvielas un magnija fosfāta cementu. Tas nodrošina ātru bloku sacietēšanu un pietiekamu stiprību mazstāvu būvniecībai.

Valsts pētījumu programmas ietvaros izstrādāta metode “Ekoloģisko kompozītmateriālu ražošana no šķiedraugiem un vietējām minerālām saistvielām”. Šī metode izstrādāta esošiem un topošiem CO<sub>2</sub> neitrālā kaļķa-kaņepju biokompozīta ražotājiem, jo ietver vairāku tehnoloģisko faktoru un sastāvdaļu ietekmi uz būvmateriāla ekspluatācijas īpašībām.

Valsts pētījumu programmas ietvaros izstrādāti “Priekšlikumi LBN 002-01 papildināšanai par dabīgo šķiedru kompozītu būvmateriālu siltumtehnikām īpašībām”, lai mazinātu šķēršļus dabīgo šķiedru kompozītmateriālu pielietošanai būvprojektos. LBN 002 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika" nosaka ēku ārējo norobežojošo konstrukciju būvelementu siltumtehnikās projektēšanas kārtību jaunbūvējamām, pārbūvējamām un atjaunojamām apkurināmām ēkām, taču tajā nepieciešams iekļaut informāciju arī par dabīgo šķiedru biokompozītiem materiāliem. Šāda papildināšana ļaus daudz plašāk pielietot šo vietējās izcelsmes būvmateriālu, jo gan projektētājiem,

gan potenciālajiem pasūtītājiem būs daudz plašāka informācija un nebūs šķēršļu šādu materiālu pilnvērtīgi integrēt būvprojektā. Saskaņā ar analizēto un apkopoto informāciju doti priekšlikumi par normatīva papildināšanu ar dabīgo šķiedru materiāla siltumtehnikajām īpašībām.

## Pētīšanas metodika

Dabīgo šķiedru biokompozītu mehānisko īpašību testi tika veikti ar *Zwick Z100* universālo testēšanas mašīnu, spiedes stiprībai līdz 10 % relatīvajām deformācijām (saskaņā ar LVS EN 826), lieces stiprības – līdz sabrukumam. Materiālu siltumvadītspēja noteikta, izmantojot *LaserComp* siltumplūsmas mērītāju *FOX600*, pēc standarta LVS EN 12667 vadlīnijām.

Lai noteiktu materiālu klasifikāciju pēc to reakcijas uz uguni, lietoti šādi standartam LVS EN 13501-1 atbilstoši testi:

- LVS EN ISO 11925-2:2011 Ugunsreakcijas testi. Tiešās liesmas saskarsmei pakļauto produktu aizdegtiesspēja. 2. daļa: Atsevišķa liesmas avota tests (ISO 11925-2:2010);
- LVS EN 13823+A1:2015 Būvizstrādājumu testēšana pēc to reakcijas uz uguni. Būvizstrādājumi, izņemot grīdas segumus, kas pakļauti atsevišķa degoša priekšmeta siltuma ietekmei.

Mikrobioloģiskās stabilitātes jeb bionoturības testi veikti, mākslīgi inokulējot biokompozītu paraugus ar sēņu suspensiju, inkubāciju veicot 75 % un 99 % RH apstākļos, novēcot paraugus klimata kamerā, apstrādājot ar dažādiem aizsardzības līdzekļiem un veicot vizuālo novērtēšanu. Sēņu ģintis tika noteiktas pēc mikroskopiskām un makroskopiskām metodēm.

Biokompozītu dzīves cikla analīze (DCA) veikta atbilstoši ISO 14040/44 vadlīnijām. Aprēķinam tika izmantota *Sima Pro 8 PhD* DCA aprēķina programma kopā ar *Ecoinvent 3.0* datubāzi, analīzei izmantotas *CML 2 baseline* un *GSP 100* metodes.

## Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas

Promocijas darbā pētījumi tika veikti ar zema blīvuma dabīgo šķiedru biokompozītiem, kas izgatavoti no minerālām saistvielām – uz kaļķa vai magnija bāzes – un augsti porainām dabīgas izcelsmes šķiedrainām pildvielām, galvenokārt, kaņepju spaļiem. Pētāmā biokompozīta blīvums bija no 200 līdz 500 kg/m<sup>3</sup>, spiedes stiprība – līdz 1 MPa, siltumvadītspēja bija robežās no 0,057 līdz 0,110 W/m·K.

Biokompozītiem tika izmantotas kaļķa bāzes saistvielas ar spiedes stiprību vismaz 10 MPa, metakaolīna atkritumu produktu lietošanas daudzums no 10 % līdz 60 % no saistvielas masas.

Dzīves cikla analīzes veikšanai izmantota problēmorientēta analīzes metode *CML2*. Globālās sasilšanas koeficients rēķināts 100 gadu periodam. Ietekmes uz vidi sadalījums veikts pēc ekonomiskā sadalījuma principa.

Iegūtais biokompozīts pielietojams būvmateriālu ražošanas nozarē kā zema blīvuma, porains, pašnesošs siltumizolācijas un norobežojošo konstrukciju materiāls.

## Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Izmantojot atkritumproduktus kā pucolāna piedevas kaļķa bāzes saistvielām, iespējams izgatavot saistvielas, kas nodrošina dabīgo šķiedru biokompozītiem nepieciešamo stiprību – vismaz 5 MPa, taču vienlaikus pazemina materiāla kopējo ietekmi uz vidi, it īpaši attiecībā uz CO<sub>2</sub> emisijām.

- Izgatavojot dabīgo šķiedru biokompozītus ar magnija bāzes saistvielām, var iegūt strauji cietējošus materiālus ar uzlabotām mehāniskajām un siltumtehnikajām īpašībām ( $\lambda$  līdz 0,057 W/m·K), pārsniedzot tradicionāli lietoto kaņepju-kaļķu materiālu rādītājus, kā arī nodrošinot B klases ugunsizturību un augstu bionoturību.
- Ar izstrādāto mērierīci iespējams vienlaikus noteikt mitruma un temperatūras sadalījumu sienas šķēsgriezumā, kā arī izmērīt siltuma plūsmu. Iegūtie dati izmantojami U teorētisko un faktisko vērtību salīdzināšanai un mitruma migrācijas noteikšanai.
- Izstrādātā metode dzīves cikla aprēķināšanai ļauj izmantot eksperimentāli iegūtos biokompozītu siltumvadītspējas un stiprības rezultātus, lai izveidotu modeli funkcionālo vienību dabīgo šķiedru biokompozīta ietekmes uz vidi novērtēšanai un salīdzināšanai ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.
- Ar kaļķa-metakaolīna vai magnija oksihlorīda saistvielām ir iespējams izgatavot dabīgo šķiedru biokompozītus ar negatīvām CO<sub>2</sub> emisijām, kā arī ar citām ietekmes uz vidi kategorijām, kas ir 2 – 4 reizes zemākas nekā tradicionāli lietotiem būvmateriāliem.

## Promocijas darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbā ir anotācija, ievads, piecas galvenās nodaļas, kas sadalītas apakšnodaļās, secinājumi, literatūras saraksts un astoņi pielikumi.

Darba apjoms ir 121 lappuses, tajā iekļauti 74 attēli, 33 tabulas, 163 literatūras avoti un astoņi pielikumi.

- Pirmajā nodaļā dota esošo dabīgo šķiedru materiālu īpašību apkopojums un analīze, to galvenie trūkumi.
- Otrajā nodaļā aprakstīti izmantotie materiāli un pētīšanas metodes.
- Trešajā nodaļā izstrādāti uzlaboti saistvielu maisījumi uz kaļķa bāzes, kā arī jauna veida saistvielu maisījumi uz magnija bāzes.
- Ceturtajā nodaļā veikta dabīgo šķiedru biokompozītu izstrāde, izmantojot uzlaboto saistvielu, veikta dabīgo šķiedru biokompozītu īpašību noteikšana un analīze.
- Piektajā nodaļā veikta dabīgo šķiedru biokompozītu dzīves cikla aprēķina metodikas izstrāde un analīze.

## Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs un publikāciju saraksts

1. Sinka M., Sahmenko G., Bajare D., Korjakins A., Van den Heede P., De Belie N. Comparative life cycle assessment of magnesium binders as an alternative for hemp concrete *Resources, Conservation & Recycling, Elsevier publishing*, vol. 133C, pp. 288–299, 2018.
2. Sinka M., Korjakins A., Bajare D., Zimele Z., Sahmenko G. Bio-based construction panels for low carbon development. *Energy Procedia* 147, 220–226. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.0633>. 2018.

3. Sinka M., Bajare D., Gendelis S., Jakovics A. In-situ measurements of hemp-lime insulation materials for energy efficiency improvement *Energy Procedia*, 147, 242–248. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.088> 2018.
4. Namsone E., Korjakins A., Šahmenko G., Šinka M. The Environmental Impacts of Foamed Concrete Production and Exploitation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 251, 20.–29. lpp. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Pieejams: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012029.
5. Obuka V., Sinka M., Nikolajeva V., Kostjukova S., Lazdina L., Klavins M. Sapropele and Lime as Binders for Development of Composite Materials. 25th European Biomass Conference and Exhibition.
6. Šinka M., Šahmenko G., Korjakins A., Bajāre D. Lime-Hemp Concrete (LHC) Enhancement Using Magnesium Based Binders. No: *Proceedings of the 2nd International Conference on Bio-Based Building Materials*, Francija, Clermont-Ferrand, 21.-23. jūnijs, 2017. Paris: RILEM Publications S.A.R.L., 2017, 238.–245. lpp. e-ISBN 978-2-35158-192-6.
7. Obuka V., Šinka M. Sapropeļa-kaļķa saistvielas izmantošanas potenciāls kaņepju betona kompozītmateriālos. No: *Konferences "Kūdra un sapropelis – ražošanas, zinātnes un vides sinerģija resursu efektīvas izmantošanas kontekstā" rakstu krājums*, Latvija, Rīga, 31.-31. janvāris, 2017. Rīga: Latvijas Universitāte, 2017, 101.–103. lpp. ISBN 978-9934-18-207-5.
8. Obuka V., Lazdiņa L., Šinka M., Nikolajeva V., Kostjukova S. Sapropeļa kā saistvielas un kaņepju, koksnes šķiedras, koksnes vates kompozītmateriālu mikrobioloģiskā noturība. No: *Konferences "Kūdra un sapropelis – ražošanas, zinātnes un vides sinerģija resursu efektīvas izmantošanas kontekstā" rakstu krājums*, Latvija, Rīga, 31.-31. janvāris, 2017. Rīga: Latvijas Universitāte, 2017, 89.–91. lpp. ISBN 978-9934-18-207-5.
9. Vaganov V., Kireev A., Avdeev S., Šahmenko G., Šinka M. Prospects for Effective Use of Dolomite in Concrete Compositions. *Construction Science*. Nr. 19, 2016, 27.–32. lpp. ISSN 1407-7329. e-ISSN 2255-8551. Pieejams: doi:10.1515/cons-2016-0008.
10. Sinka M., Sahmenko G., Korjakins A., Radiņa L., Bajare D. Hemp Thermal Insulation Concrete with Alternative Binders, Analysis of Their Thermal and Mechanical Properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol.96, Iss.1, 1.-10.lpp. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. (SCOPUS Data base).
11. Obuka V., Sinka M., Klavins M., Stankevica K., Korjakins A. Sapropele as a Binder: Properties and Application Possibilities for Composite Materials. No: *Proceedings of 2nd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies"*, Latvija, Rīga, 30. Sep–2. Okt., 2015. Riga: 2015, 1.–10.lpp. (SCOPUS Data base), 30. Sep–2. Okt., 2015. Riga: 2015, 1.–10. lpp. (SCOPUS Data base).
12. Sinka M., Radina L., Sahmenko G., Korjakins A., Bajare D., Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies, *Proceedings of the 1st International Conference on Bio-based Building Materials*, France, Clermont-ferrand, 22–24. June, 2015. ISBN PRO 99: 978-2-35158-154-4.
13. Pleiksnis S., Sinka M., Sahmenko G., Experimental justification for sapropel and hemp shoves use as a thermal insulation in Latvia, 5th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Latvia, Rezekne, 18.–20. June, 2015 (SCOPUS Data base).

14. Sinka M., Sahmenko G., Korjakins A., Mechanical Properties of Pre-Compressed Hemp-Lime Concrete, Proceedings of the 4th international conference "Advanced Construction 2014", Kaunas, Lithuania, 9.–10. October, 2014. Kaunas: 2014, 97. p. ISSN 2029-1213.
15. Sinka M., Sahmenko G., Korjakins A., Thermal insulation materials from hemp with different binders, Riga Technical University 55th International Scientific Conference, Section "Construction Science", Digest, Latvia, Riga, 18. October, 2014. Riga: RTU, 2014, 12. p. ISBN 978-9934-10-614-9.
16. Sinka M., Sahmenko G., Korjakins A., Upeniece L., Artificial hydraulic lime binder and its impact on properties of hemp-lime compositions, International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”, Latvia, Riga, 8. November, 2013. Riga: RTU, 2013, 47. p. ISBN 978-9934-10-485-5.
17. Sinka M., Sahmenko G., Sustainable Thermal Insulation Biocomposites from locally available Hemp and Lime , 4th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources": Proceedings, Vol.1., Latvia, Rezekne, 20.–22. June, 2013. Rezekne: RA, 2013, 73.–77.p. ISSN 1691-5402, (SCOPUS Data base).
18. Sinka M., Sahmenko G., Hydraulic lime from locally available raw materials, 54th student scientific and technical conference: Proceedings, Vol. 1., Latvia, Riga, 2013. Riga: RTU, 2013, 298.lpp. ISBN 978-9934-10-509-8.
19. Sinka M., Korjakins A., Sahmenko G., The use of hemp shives with hydraulic lime binder in insulation materials, 13th International Scientific Conference "Sustainable business under changing economic conditions": Latvia, Riga, 30. March, 2012. 305.–312.p. ISSN 1691-6069.

#### **Patentu saraksts**

1. Sinka M., Bajare D., Sahmenko G., Korjakins A., Siskins A. Bio-šķiedru un magnija oksihlorīda cementa daudzslāņu celtniecības panelis un tā izgatavošanas paņēmieni, Latvijas patents, P-17-77, tiks publicēts 20.06.2019.
2. Sinka M., Bajare D., Sahmenko G., Korjakins A., Siskins A. Magnija fosfāta cementa un bioloģiskās izcelsmes pildvielu ātrās cietēšanas celtniecības bloks un tā izgatavošanas paņēmieni, Latvijas patents, P-17-86, tiks publicēts 20.06.2019.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

Dabīgo šķiedru siltumizolācijas biokompozīti ir materiāli ar plašu izmantošanas potenciālu un atbilstību mūsdienu prasībām – zemu ietekmi uz vidi un augstu energoefektivitāti. Tie izgatavoti no organiskas izcelsmes šķiedru pildvielām, piemēram, kaņepju [37]–[39] vai linu spaļiem [25], [40], rapšu [32], [41] vai salmu stiebriem [16], [42], niedrēm u. c., un minerālām saistvielām – kaļķa, hidrauliskā kaļķa, cementa u. c. Viens no visvairāk izplatītajiem dabīgo šķiedru biokompozītu grupas materiāliem ir kaļķa-kaņepju biokompozīts (KKB). Šī kompozītmateriāla ražošanai izmanto kaņepju stiebra iekšējo daļu – kaņepju spaļus, kas ir kaņepju šķiedru ražošanas blakusprodukts, – kā pildvielu un hidraulisko kaļķi kā saistvielu [43]. Dabīgo šķiedru biokompozītu galvenokārt izmanto kā pašnesošu sienu siltumizolācijas materiālu, kas iestrādāts nesošā koka rāmī.

Francijā šāda veida materiāls būvniecībā tiek izmantots jau kopš 20. gadsimta 80. gadu beigām [44], un šobrīd tas ir kļuvis populārs arī citās Eiropas valstīs, piemēram, Lielbritānijā, Īrijā un Polijā [45]. Dabīgo šķiedru biokompozītu īpašības ir atbilstošas ES Regulai N305/2011 [46], kurā noteiktas septiņas pamatprasības būvdarbiem un būvmateriāliem. Tālāk sniegts materiāla vērtējums šīs regulas kontekstā:

- Mehāniskā stiprība un stabilitāte – tas lietojams kā pašnesošs izolācijas materiāls, nav nepieciešami papildu materiāla slāņi, un apmetumu var uzklāt tieši uz virsmas. Tam piemīt daudz lielāka mehāniskā pretestība, salīdzinot ar tradicionāli lietotajiem siltumizolācijas materiāliem [47].
- Uguns izturība – pretēji citiem dabīgo šķiedru izolācijas materiāliem, kas ietilpst ugunsreakcijas E klasē [48], minerālā saistviela var nodrošināt ugunsizturību, kas atbilst B klasei (EN 13501-1) [49].
- Higiēna, veselība un vide – dabīgo šķiedru biokompozīti nesatur gaistošus organiskus savienojumus (GOS) vai citas kaitīgas vielas. Tiem ir paaugstināta mitruma buferspēja, kas uzlabo iekštelpu gaisa kvalitāti, novēršot sēņu un pelējuma augšanu, kas var izraisīt alerģiskas slimības [50], [51].
- Materiāliem ir samazināta ietekme uz vidi, jo biopildvielā ir ieslēgts liels CO<sub>2</sub> daudzums, kā arī to ražošana patērē mazāk enerģijas nekā ekvivalenti būvmateriāli [19].
- Drošība – dabīgo šķiedru biokompozīti netiek izmantoti kā slodzi nesoši materiāli, tāpēc šī pamatprasība netiek vērtēta.
- Skaņas izolācija – materiāliem ir poraina struktūra ar salīdzinoši augstu blīvumu, tādējādi dabīgo šķiedru biokompozīti absorbē un atstaro skaņu, nodrošinot labāku skaņas izolāciju, salīdzinot ar vienāda biezuma tradicionālo siltumizolācijas materiālu [26].
- Enerģijas ekonomija un siltumizolācija – dabīgo šķiedru biokompozītiem ir relatīvi labas siltumizolācijas īpašības –  $\lambda$  zem 0,06 (W/m · K), kas padara tos līdzvērtīgus citiem izolācijas materiāliem [49], [52].
- Dabas resursu ilgtspējīga izmantošana – vairāki pētnieki ir pierādījuši, ka viss dabīgo šķiedru biokompozītu ražošanas process piesaista vairāk CO<sub>2</sub> nekā tiek

izmests atmosfērā, jo kaņepes augšanas procesā uzņem oglekļa dioksīdu un arī kaļķis karbonizējoties piesaista CO<sub>2</sub>. Noglabātā oglekļa dioksīda daudzums ir no 6,67 kg līdz 136,65 kg CO<sub>2</sub> ekv./m<sup>3</sup> [19]–[22].

Kaļķa-kaņepju biokompozītu trūkums ir to relatīvi zemā mehāniskā izturība, kas nosaka to pielietojumu – tie tiek izmantoti tikai kā pašnesoši siltumizolācijas materiāli, galvenokārt mazstāvu ēkām [28]. Kā negatīvu īpašību var minēt arī to, ka lignīns, cukuri un citi bioloģiski savienojumi, kas izdalās no pildvielas, īpaši sārmainajā saistvielas vidē, aizkavē hidraulisko kaļķu saistīšanos, kas samazina biokompozītu agrīno stiprību [27, 36].

Magnija saistvielu potenciālu var izmantot, lai aizvietotu kaļķus dabīgo šķiedru biokompozītā un palielinātu to stiprību. Šīs saistvielas parasti tiek izmantotas kombinācijā ar dažādām bioloģiskas izcelsmes pildvielām, piemēram, koku [29]–[31], rapšu kātu [32], koksnes masu [33], kaņepēm [34], kā arī citiem lauksaimniecības produktu atkritummateriāliem [35]. Salīdzinot ar kalcija bāzes saistvielām, magnija saistvielu priekšrocība ir to ievērojami labāka saderība ar organiskajām pildvielām [29].

Promocijas darbā tika meklētas atbilstošākās magnija un kalcija bāzes saistvielas, kas kopā ar bioloģiskas izcelsmes pildvielām spētu veidot mūsdienu prasībām atbilstošus dabīgo šķiedru biokompozītus ar uzlabotām mehāniskajām, fizikālajām un ilgmūžības īpašībām. Lai pierādītu šo materiālu ilgtspēju un priekšrocības, tika veikti pētījumi reālos klimatiskos apstākļos, kā arī aprēķināta šo materiālu ietekme uz vidi un salīdzināta ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.



## 2. DABĪGO ŠĶIEDRU BIODKOMPOZĪTU IZPĒTES METODES

Dabīgo šķiedru biokompozītu mehānisko īpašību testi tika veikti ar *Zwick Z100* universālo testēšanas mašīnu. Spiediens tika piemērots ar ātrumu 10 mm/min, reģistrējot spēka-deformācijas diagrammu procesa laikā. Tests spiedes stiprības noteikšanai tika veikts līdz 10 % relatīvajām deformācijām (saskaņā ar LVS EN 826), lieces stiprības – līdz sabrukumam. Saistvielu mehāniskās īpašības tika testētas saskaņā ar LVS EN 459, izgatavojot un izmantojot 160 mm × 40 mm × 40 mm izmēra prizmu paraugus.

Materiālu siltumvadītspēja tika noteikta, izmantojot *LaserComp* siltumplūsmas mērītāju *FOX600*, kas kalibrēts pēc *NIST* sistēmas. Paraugi tika testēti, sekojot standarta LVS EN 12667 vadlīnijām. Temperatūras uzstādījumi  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , augšējā plāksne  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , apakšējā –  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Promocijas darbā, lai noteiktu dabīgo šķiedru biokompozītu klasifikāciju pēc to reakcijas uz uguni, atbilstoši standartam LVS EN 13501 “Būvkonstrukciju un būvelementu klasifikācija pēc to reakcijas uz uguni” tika lietoti šādi testi:

- LVS EN ISO 11925-2:2011 Ugunsreakcijas testi. Tiešās liesmas saskarsmei pakļauto produktu aizdegtiesspēja. 2. daļa: Atsevišķa liesmas avota tests (ISO 11925-2:2010);
- LVS EN 13823+A1:2015 Būvizstrādājumu testēšana pēc to reakcijas uz uguni. Būvizstrādājumi, izņemot grīdas segumus, kas pakļauti atsevišķa degoša priekšmeta siltuma ietekmei.

Papildus materiālu reakcija uz uguni tika noteikta pēc LVS ISO 5660-1:2015 “Ugunsreakcijas testi. Koniskā kalorimetra metode”, klasificējot materiālus ar *Nordtest* projekta 1526-01 metodoloģiju [124].

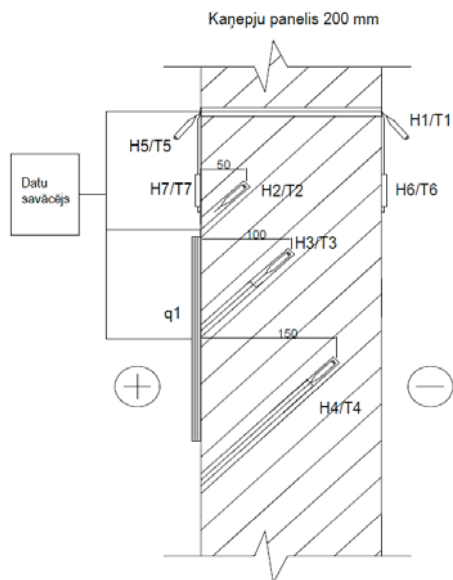
Mikrobioloģiskās stabilitātes testi tika veikti trīs posmos, materiālu paraugus mākslīgi inokulējot ar sešām dažādām sēnēm, inkubāciju veicot 75 % un 99 % RH apstākļos, novēdinot paraugus klimata kamerā un apstrādājot ar dažādiem aizsardzības līdzekļiem. Visos trīs posmos tika veikta vizuālā novērtēšana, izmantojot klasifikāciju pēc šādas skalas [125]:

2.1. tabula

Sēņu koloniju pieauguma ekspertvērtējuma skala

Vizuālais novērtējums	Raksturojums	Krāsa skalā
0	mikroskopiski nav konstatēts sēņu pieaugums	
1	mikroskopiski ir konstatēts sēņu pieaugums	
2	mikroskopiski ir konstatēts sēņu pieaugums, kas aptver visu parauga virsmu	
3	makroskopiski konstatēts sēņu pieaugums (redzams ar neapbruņotu aci)	
4	makroskopisks pieaugums, kas aptver > 80 % no materiāla virsmas	

Promocijas darbā tika izstrādāta sistēma, lai varētu noteikt dažādu konstrukciju siltuma caurlaidību reālos apstākļos, kā arī mitruma migrāciju. Sistēmas darbības pamatā ir mērījumi no temperatūras sensoriem uz virsmām (H6 un H7 2.2. att.) un no siltuma plūsmas sensora (q1 2.2. att.), mitruma migrācijas mērījumiem izmanto dažādos sienas biežumos izvietotus relatīvā mitruma sensorus.



2.2. att. Siltuma plūsmas un virsmas temperatūras sensoru principiālais izvietojums.

Datu apstrādei promocijas darbā izmantota LU VTPMM (Vides un tehnoloģiju procesu matemātiskās modelēšanas) laboratorijā izstrādāta U vērtības aprēķina metodika, kas pieļauj izmantot eksperimentālos datus no īsā laika periodā veiktiem mērījumiem [126]. Metodes pamatā ir viendimensionāls siltuma caurlaidības koeficienta aprēķins, izmantojot siltuma plūsmas blīvumu uz siltākās virsmas un virsmu temperatūras starpību [127]. Metode ir integrēta un izmantota ar programmu *DataProc* [46].

Promocijas darba mērķis ir izmantot DCA, lai novērtētu dabīgo šķiedru biokompozītu ietekmi uz vidi. Veicot biokompozītu dzīves cikla analīzi (DCA), atbilstoši ISO 14040/44 vadlīnijām, tika veikti šādi pētījumu posmi:

1. Mērķa un apjoma noteikšana.
2. Inventarizācijas analīze.
3. Ietekmes novērtējums.
4. Rezultātu interpretācija.

Aprēķins tika veikts, izmantojot *Sima Pro 8* DCA aprēķina programmu kopā ar *Ecoinvent 3.0* [144] datubāzi. Rezultātu analīzei tika izmantota *CML 2 baseline* metode [145]. Analizējot rezultātus, katrs ražošanas cikla posms tika apskatīts atsevišķi, lai varētu novērtēt tā atsevišķo sadaļu ietekmi. Tika noteikts radīto emisiju nodarītais kaitējums videi, izmantojot atbilstošus ekvivalences koeficientus atlasītajiem savienojumiem vairākās ietekmes kategorijās – globālās sasilšanas potenciāls, paskābināšanās potenciāls, eutrofikācijas potenciāls, troposfēras ozona un fotoķīmiskā smoga veidošanās potenciāls, stratosfēras ozona noārdīšanās potenciāls un ekotoksicitātes potenciāli.

### 3. PĒTĪJUMOS IZMANTOTO IZEJMATERIĀLU APRAKSTS

Promocijas darbā tika izmantoti astoņi dažādi kaņepju spaļu veidi no lielākajiem Latvijas kaņepju šķiedru pārstrādātājiem, kas atšķiras ar granulometrisko sastāvu, šķiedras daudzumu, putekļainību u. c. īpašībām, kas galvenokārt atkarīgas no pārstrādes veida. Izvēlētie pārstrādātāji ir z/s “Rudeņi” no Jelgavas novada (RM, RL un RS spaļi), SIA “Zalers” kaņepju un linu pārstrādes uzņēmums no Krāslavas novada (ZM un ZL spaļi), z/s “Lieplejas”, Salacgrīvas novadā (LM un LS spaļi) un SIA „Latgales lauksaimniecības zinātnes centrs”, Viļānu novadā (EE spaļi). RM, ZM, LM – mazie kaņepju spaļi, kuru frakcija 0,63 mm–10 mm ir vismaz 80 %, RL, ZL, LL – lieli kaņepju spaļi, kuru frakcijas > 10 mm pārsniedz 15 %. RS – kaņepju spaļi ar šķiedru, tās daudzums pārsniedz 6 %. EE – eksperimentālie spaļi, vienu sezonu tilināti uz lauka (šķiedras atdalīšana no koksnes), putekļi < 1 %.

Darbā tika izmantotas divas gaisā cietējošu kaļķu saistvielas, to ķīmiskie sastāvi redzami 3.1. tab.: veldzēti baltkaļķi CL90 S, (“Lhoist Bukowa”, Polija), neveldzētie dolomītkaļķi DL 60 (“Saulkalne”, Latvija).

3.1. tabula

Izmantoto kaļķa saistvielu sastāvi un galvenās īpašības

	CL90 S	DL 60 Q
CaO + MgO	≥ 90 %	≥ 60 %
MgO	≤ 5 %	≤ 30 %
CO <sub>2</sub>	≤ 4 %	≤ 21 %
SO <sub>3</sub>	≤ 2 %	≤ 2 %
Aktīvais kaļķis	≥ 80 %	≥ 60 %
<b>Daļiņu izmēri</b>		
Masas atlikums uz 0,2 mm sieta	≤ 2 %	≤ 1,5 %
Masas atlikums uz 0,09 mm sieta	≤ 7 %	≤ 15 %

Darbā izmantotais metakaolīns ir atkritumprodukts no putustikla granulu ražošanas (“Stiklaporas”, Lietuva). Kaolīna māli, izmantoti kā pretsalīpes piedeva, tiek kalcinēti apdedzināšanas krāsnī 800 °C–850 °C temperatūrā 40–50 minūtes [128].

Promocijas darbā tika izmantoti divu veidu atkritumprodukti, kas iegūti fluorescēto lampu pārstrādes procesā: svīnu saturošs Pb stils un borsilikātu stikls (“Lampu demerkurizācijas centrs”, Latvija) [131].

Darbā izmantoti divu veida magnija oksīdi. Magnija oksihlorīda cementa izgatavošanai izmantots kaustiskais magnija oksīds CCM RKMH-F, kas apdedzināts 800 °C temperatūrā, (“RHI AG Ltd”, Austrija), MgO daudzums vismaz 73 % (MgO A.). Magnija fosfāta cementu izgatavošanai izmantots pārdedzināts magnija oksīds M-76, apdedzināts 1700 °C temperatūrā, (“Integra Ltd”, Slovākija), MgO daudzums vismaz 85 % (MgO S).

Magnija fosfāta cementu izgatavošanai izmantoti divu veidu šķīstoši skābie fosfāti – kālija un amonija fosfāti. Izmantotais monokālija fosfāts (MKP) ir minerālmēslojums 0-52-35 (N-P-K attiecība) ar P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> daudzumu vismaz 52,1 % (“Praton S. A.”). Izmantotais monoamonija fosfāts, ir minerālmēsli 12-61-0 (“Haifa Ltd.”). Magnija oksihlorīda cementa izgatavošanai nepieciešams MgCl<sub>2</sub> cietinātājs – magnija hlorīda heksahidrāts MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O ar MgCl<sub>2</sub> daudzumu 47 % (Vācija).

## 4. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

### 4.1. Dabīgo šķiedru biokompozītiem piemērotu saistvielu izstrāde

#### 4.1.1. Kaļķa bāzes saistvielas

Promocijas darba gaitā izstrādātā kaļķu bāzes hidrauliskā saistviela tika izgatavota, gaisā cietējošu kaļķu saistvielu 10 %–70 % apmērā aizstājot ar hidrauliskām piedevām – metakaolīnu (MK), svinu saturošu lampu stiklu (PG) un borsilikāta lampu stiklu (BG) (4.1. tab.). Ūdens/saistvielas attiecība (Ū/S) visiem paraugiem bija konstanta – 2:3. Pildvielas un hidrauliskās saistvielas attiecība visiem paraugiem bija 2:1.

4.1. tabula

Kalcija kaļķu sastāvi un mehāniskās stiprības testu rezultāti

Maisījuma sastāvs	Izejviela (masas vienības daļa)				Kaļķa/pucolāna attiecība, %	Tilpummasa, kg/m <sup>3</sup>	Spiedes pretestība $F_c$ , MPa	Lieces pretestība $F_m$ , MPa
	CL90	MK	PG	BG				
CL-0	1	–	–	–	0%	1590	1,18	0,12
CL-MK-1	0,9	0,1	–	–	10%	1623	4,55	1,05
CL-MK-2	0,8	0,2	–	–	20%	1668	7,87	1,21
CL-MK-3	0,7	0,3	–	–	30%	1712	11,55	1,56
CL-MK-4	0,6	0,4	–	–	40%	1698	12,3	1,49
CL-MK-5	0,5	0,5	–	–	50%	1657	12,15	1,2
CL-MK-6	0,4	0,6	–	–	60%	1645	8,54	1
CL-MK-7	0,3	0,7	–	–	70%	1622	4,45	0,8
CL-PG-1	0,9	–	0,1	–	10%	1856	4,05	1,25
CL-PG-2	0,8	–	0,2	–	20%	1901	5,04	1,22
CL-PG-3	0,7	–	0,3	–	30%	1921	5,21	1,08
CL-PG-4	0,6	–	0,4	–	40%	1903	4,32	0,95
CL-PG-5	0,5	–	0,5	–	50%	1867	4,17	0,87
CL-BG-1	0,9	–	–	0,1	10%	1825	3,89	1,28
CL-BG-2	0,8	–	–	0,2	20%	1887	5,02	1,33
CL-BG-3	0,7	–	–	0,3	30%	1905	4,87	1,42
CL-BG-4	0,6	–	–	0,4	40%	1845	4,63	1,25
CL-BG-5	0,5	–	–	0,5	50%	1893	2,87	0,77

Pēc trīs dienu cietēšanas veidņos paraugi tika atveidoti un turpmāk uzglabāti laboratorijas apstākļos 20 °C–23 °C. References sastāvs (CL-0), kas izgatavots no gaisā cietējošiem kaļķiem bez hidrauliskām piedevām, pēc izgatavošanas tika cietināts laboratorijas apstākļos, kur relatīvā gaisa mitrums ir 40 %–50 %. Pārējie paraugi tika cietināti paaugstināta mitruma apstākļos – 95 % – 99 % RH. Šādi hidraulisko kaļķu cietēšanas apstākļi atbilstoši publicētajiem pētījumiem ir uzskatāmi par optimāliem [95].

References parauga (CL-0) spiedes stiprība pēc 28 dienu cietēšanas sasniedza 1,18 MPa (4.1. tab.). Aizstājot kaļķa saistvielu ar metakaolīna hidraulisko piedevu apjomā no 10 %–40 %, paraugu spiedes stiprība pēc 28 dienu cietēšanas atbilstoši palielinājās no 4,6 MPa līdz 12,3 MPa. Palielinot metakaolīna daudzumu līdz 50 %, tā nedaudz samazinājās līdz 12,1 MPa, savukārt, palielinot metakaolīna īpatsvaru līdz 70 %, spiedes stiprība būtiski samazinās – līdz 4,5 MPa pēc 28 dienu cietēšanas. (4.1. tab.).

Lieces stiprība kaļķa saistvielai, bez pievienotām hidrauliskām piedevām ir zema – tikai 0,12 MPa. Pievienojot 10 % metakaolīna piedevu, tā būtiski pieauga – līdz 1,05 MPa. Proporcioniāli palielinot piedevu līdz 30 %, stiprība pieauga līdz 1,56 MPa. Palielinot izmantotā metakaolīna daudzumu no 40 %–70 %, lieces stiprība samazinājās līdz 0,80 MPa.

Optimālais metakaolīna daudzums, lai iegūtu hidraulisku saistvielu no kalcija kaļķiem ar maksimāli augstām mehāniskajām īpašībām, kas atbilst NHL5, bija 40 % – šāda attiecība tika izvēlēta tālākiem biokompozītu pētījumiem.

Aizstājot kalcija kaļķa saistvielu ar malta svinu saturoša stikla hidraulisko piedevu 10 %– 50 % apjomā, paraugu spiedes stiprība pēc 28 dienu cietēšanas bija robežās no 4,05 MPa līdz 5,21 MPa, visaugstāko stiprību sasniedzot pie 30 % stikla daudzuma. Lieces stiprībai svārstoties no 0,87 MPa līdz 1,25 MPa, visaugstākā stiprība pie 10 % stikla piedevas (4.1. tab.). Optimālais piedevas daudzums ir 20 %–30 %.

Borsilikātu stikla hidrauliskās piedevas izmantošana vislielāko spiedes stiprību dod pie 20 % – 5,02 MPa, lieces stiprību pie 30 % – 1,42 MPa. Pievienojot 50 % piedevas, stiprība strauji samazinājās līdz 2,87 MPa spiedē un 0,77 MPa liecē (4.1. tab.).

#### 4.1.2. Magnija bāzes saistvielas

Magnija oksihlorīda cementa (MOC) izgatavots no kaustiskā MgO A (skat. 3. nodaļu) un magnija hlorīda heksahidrāta. Magnija oksihlorīda cementa izgatavošanai tika izmantots vienāds MgO daudzums (4.2. tab.), savukārt MgCl<sub>2</sub> šķīdums tika pievienots 0,50–0,93 no MgO daudzuma. MgCl<sub>2</sub> šķīdums ar blīvumu 1,2 g/cm<sup>3</sup> tika iegūts, sajaucot magnija hlorīda heksahidrātu ar ūdeni masas attiecībās 1:1.

4.2. tabula

Magnija oksihlorīda sastāvi un mehāniskās stiprības testu rezultāti

Sastāvs	Izejviela (masas vienības daļa)		MgCl <sub>2</sub> /MgO	Ū/S	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	Spiedes pretestība F <sub>c</sub> , MPa	Lieces pretestība F <sub>m</sub> , MPa
	MgO, g	MgCl <sub>2</sub> šķ. 1:1					
OX-1	1	0,93	0,47	0,32	2100,0	29,40	5,88
OX-2	1	0,83	0,42	0,29	2050,0	39,20	7,84
OX-3	1	0,75	0,38	0,27	2015,7	50,40	10,08
OX-4	1	0,68	0,34	0,25	2070,6	60,90	8,84
OX-5	1	0,60	0,30	0,23	2092,3	48,19	9,64
OX-6	1	0,50	0,25	0,20	2142,3	50,46	9,02
OX-7	1	0,50	0,25	0,33	2047,7	24,57	4,40
OX-8	1	0,60	0,30	0,29	2039,5	22,81	3,83
OX-9	1	0,60	0,30	0,36	1999,1	18,29	3,21
OX-10	1	0,50	0,25	0,47	2055,9	18,75	4,62

Pildvielas un magnija oksihlorīda cementa attiecība tiek izmantota nemainīga (2:1) visu sastāvu izgatavošanai. Ūdens/saistvielas attiecība mainīga, sk. 4.2. tab. Pēc ievietošanas veidņos magnija oksihlorīda paraugi netiek nosegti. Pēc divu dienu cietēšanas tie tiek atveidnoti un turēti pie temperatūras 20 °C–23 °C un relatīvā gaisa mitruma 40 %–50 %. Testēšana notiek pēc 28 dienu cietēšanas.

Spiedes stiprība palielinās no 50,5 MPa līdz 60,9 MPa, Ū/S attiecībai palielinoties no 0,20 līdz 0,25. Ū/S attiecībai palielinoties līdz 0,29, stiprība samazinās līdz 39,2 MPa. Pie Ū/S 0,47 spiedes stiprība ir 18,8 MPa (4.2. tab.). Līdzīgu tendenci uzrāda arī lieces stiprība,

palielinoties līdz 10,1 MPa pie  $\bar{U}/S$  0,27, stiprībai samazinoties līdz 3,2 MPa pie tālākas  $\bar{U}/S$  attiecības pieauguma.

Spiedes stiprības pieaugums novērojams, MgO/MgCl<sub>2</sub> attiecībai samazinoties līdz 0,34, sasniedzot 60,9 MPa, pie tālāka attiecības samazinājuma arī spiedes stiprība samazinās (4.2. tab.). Par optimālu  $\bar{U}/S$  tālākiem biokompozītu pētījumiem pieņemta attiecība 0,25, MgO/MgCl<sub>2</sub> attiecība – 0,34.

Magnija fosfāta cements (MPC) tiek izgatavots no pārdedzināta MgO S un cietinātāja – kālija fosfāta vai amonija fosfāta (sk. 3. nodaļu). Magnija fosfāta cementa sastāvu pārbaudēs tika izmantota dažāda cietinātāja/MgO attiecība 0,6–1,0 un ūdens/saistvielas attiecība 0,3–0,39 (4.3. tab.). Visu sastāvu izgatavošanai tikai izmantota nemainīga pildvielas un magnija fosfāta cementa attiecība (2:1). Paraugu izgatavošana un cietināšana bija analoga magnija oksihlorīda cementa izgatavošanai.

Salīdzinot magnija fosfāta cementu, kas iegūts no amonija vai kālija fosfāta, var redzēt, ka kālija fosfāta cements kopumā uzrāda par 5 %–41 % augstāku spiedes stiprību un par 6 %–13 % augstāku blīvumu (4.3. tab.). Amonija fosfāta cementiem cietējot, izdalās amonija gāze [106], [107], kas tiek ieslēgta porās cietēšanas laikā, tādējādi samazinot materiāla blīvumu un stiprību. Augstākā spiedes stiprība kālija fosfāta cementam bija ar cietinātāja/saistvielas attiecību 0,80, amonija fosfāta cementam – ar 0,6. Sastāvs KM-3 tika izvēlēts turpmākajiem biokompozītu pētījumiem.

4.3. tabula

Magnija fosfāta cementa sastāvi un mehāniskās stiprības testu rezultāti

Sastāvs	Izejviela (masas vienības daļa)				Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	Spiedes pretestība $F_c$ , MPa	Lieces pretestība $F_m$ , MPa
	MgO	KPO	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O			
KM-1	1	0,8	–	0,60	2046,9	47,9	7,0
KM-2	1	0,8	–	0,70	1996,1	40,7	5,3
KM-3	1	0,8	–	0,50	2082,0	52,1	8,9
KM-4	1	0,9	–	0,57	2066,4	50,6	7,7
KM-5	1	1,0	–	0,60	2074,2	50,6	7,9
KM-6	1	0,7	–	0,51	2081,6	47,3	6,8
KM-7	1	0,6	–	0,48	2109,4	44,3	7,0
KM-8	1	0,5	–	0,45	2069,8	42,1	6,4
AM-1	1	–	0,8	0,60	1929,7	29,6	7,7
AM-2	1	–	0,8	0,70	1816,4	26,1	6,4
AM-3	1	–	0,8	0,50	1867,2	39,6	9,5
AM-4	1	–	0,9	0,57	1829,5	36,7	8,3
AM-5	1	–	1,0	0,60	1820,3	30,1	6,6
AM-6	1	–	0,7	0,51	1830,4	44,3	9,3
AM-7	1	–	0,6	0,48	1835,9	44,9	9,3
AM-8	1	–	0,5	0,45	1803,0	40,0	8,4

## 4.2. Dabīgo šķiedru biokompozītu mehāniskās un siltumtehniskās īpašības

Saistviela magnija oksihlorīda biokompozītiem (MOC) tika izgatavota, pamatojoties uz 4.1. nodaļas rezultātiem,  $MgCl_2/MgO$  attiecību pieņemot 0,34,  $MgCl_2$  šķīdums 1:1 ar ūdeni. Paraugi tika izgatavoti ar dažādu  $MgO$  daudzumu, kas ir robežās no 0,5 līdz 1,5 attiecībā pret spaļu daudzumu.

Paraugu izgatavošanas metodoloģija – kaņepju spaļi tika sajaukti ar daļu no receptūrai nepieciešamā ūdens daudzuma, tika pievienota iepriekš sausi sajaukta saistviela un tad pievienots magnija hlorīda sāls šķīdums vai ūdens. Pēc divām dienām paraugi tiek atveidoti un 28 dienas izturēti laboratorijas apstākļos  $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  un  $40\% \pm 10\% \text{ RH}$ .

4.4. tabula

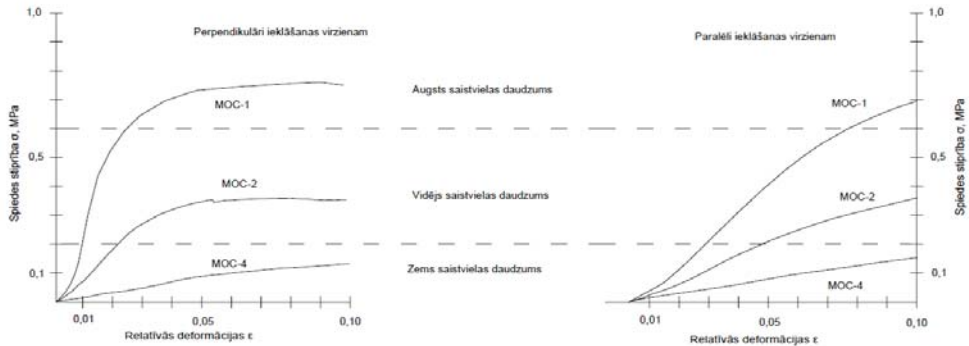
MOC biokompozītu sastāvi un testēšanas rezultāti

Sastāvs	Izejviela (masas vienības daļa)				P/S	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	Spiedes stiprība 10 %, MPa	Spiedes stiprība perp., MPa	Lieces stiprība, MPa	Spiedes stiprība graužoši, MPa
	Kaņepju spaļi	Ūdens spaļiem	MgO	$MgCl_2$ , šķīdums (1:1)						
MOC-1	1,00	1,25	1,50	1,00	0,50	416,18	0,71	0,74	0,35	0,53
MOC-2	1,00	1,25	1,05	0,70	0,71	357,14	0,37	0,36	0,16	0,30
MOC-3	1,00	1,25	0,75	0,50	1,00	252,79	0,20	0,06	0,05	0,13
MOC-4	1,00	1,25	0,50	0,33	1,50	214,34	0,16	0,14	0,02	–

Magnija oksihlorīda biokompozītu spiedes pretestība apkopota 4.4. tab. 4.1. att. attēlotas spiedes stiprības/deformāciju diagrammas paralēli un perpendikulāri iekļāšanas virzienam.

No šīm diagrammām var secināt, ka biokompozītus var iedalīt trīs grupās atkarībā no saistvielas daudzuma:

1. Zema saistvielas satura MOC biokompozīti (P/S 1,50) – mehāniskās īpašības ir līdzīgas savstarpēji nesaistītu pildvielu (spaļu) stiprībai, liela deformējamība pie zemas pieliktās slodzes, jo saistviela atrodas tikai uz spaļu virsmām, spaļus savstarpēji sasaistot, bet neveidojot stingru saistvielas struktūru.
2. Vidējas stiprības saistvielas satura MOC biokompozīti (P/S 0,71) – deformācijas nepieaug tikai un vienīgi lineāri, bet ir novērojama arī elastīgo deformāciju pāreja plastiskajās deformācijās. Tas izskaidrojams ar faktu, ka pildvielas pārklātas ar vairākām saistvielas kārtām.
3. Augstas stiprības saistvielas satura MOC biokompozīti (P/S 0,50) – pildvielas ir iegremdētas saistvielā, pildviela veido stingru režģi, kura sabrukums ir izteikti novērojams spiedē perpendikulāri iekļāšanas virzienam.



4.1. att. Raksturīgās spiedes līknes MOC materiāliem paralēli un perpendikulāri iekļāšanas virzienam.

Palielinot pildvielas/saistvielas attiecību no 0,50 līdz 0,71, MOC blīvums samazinājās par 14 %, mehāniskā stiprība par 48 % (4.4. tab.). Palielinot pildvielas/saistvielas attiecību no 0,71 līdz 1,50, MOC blīvums samazinājās par 40 %, mehāniskā stiprība par 56 %. Kopumā stiprība ir atkarīga no P/S attiecības, taču šī attiecība nav proporcionāla (4.1. att.). Magnija fosfāta un hidrauliskā kaļķa biokompozītu mehāniskās īpašības redzamas 4.5. tabulā.

Paraugi siltumvadītspējas testiem tika izgatavoti analogi aprakstītajām vadlīnijām ar izmēriem 350 mm × 350 mm × (80 – 100) mm. Pēc atveidošanas paraugi tika izturēti laboratorijas apstākļos 20 °C ± 2 °C un 40 % ± 10 % RH līdz masas stabilizācijai. Tika izmantotas analogas paraugu receptūras kā 4.1. nodaļā, tādējādi vienlaikus bija iespējams salīdzināt paraugu blīvumu ar siltumvadītspēju un mehānisko stiprību (4.5. tab.).

4.5. tabula

Biokompozītu mehāniskās un fizikālās īpašības

Saistvielu grupa	Sastāvs	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	Siltumvadītspēja, W/m·K	Spiedes stiprība, MPa
MPC	MPC-1	414,86	0,087	0,823
	MPC-2	359,25	0,078	0,409
	MPC-3	249,81	0,062	0,157
	MPC-4	211,16	0,057	0,098
MOC	MOC-1	416,18	0,092	0,709
	MOC-2	357,14	0,081	0,367
	MOC-3	252,79	0,072	0,200
	MOC-4	214,34	0,063	0,155
FHL	FHL-1	488,63	0,103	0,435
	FHL-2	352,54	0,079	0,111
	FHL-3	265,81	0,064	0,071
	FHL-4	223,35	0,062	0,062

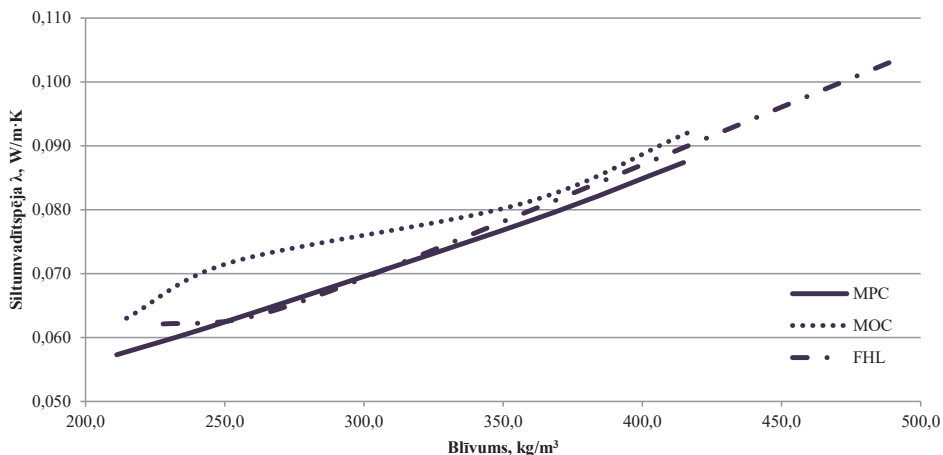
Apskatot iegūtos rezultātus grafiski (4.2. att.), var secināt, ka izvēlētajā blīvuma intervālā no 250 kg/m<sup>3</sup> līdz 450 kg/m<sup>3</sup> blīvuma/siltumvadītspējas attiecība ir lineāra. Tas sakrīt ar citu autoru pētījumiem, piemēram, apskatīto *Cerezo* pētījumu [26], kur blīvuma intervālā no



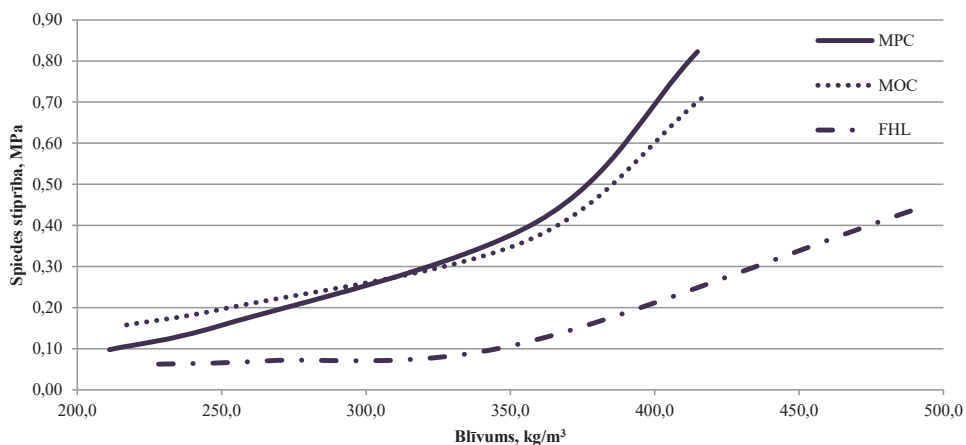
300 kg/m<sup>3</sup> līdz 520 kg/m<sup>3</sup> šī attiecība bija lineāra, arī lineārās tendences līknes vienādojums atšķiras tikai par 0,0029 (4.5. att.):

$$y = 0,0002x + 0,0194, \text{ Cerezo pētījuma lineārās tendences līknes vienādojums;}$$

$y = 0,0002x + 0,0230$ , promocijas darbā veiktā pētījuma lineārās tendences līknes vienādojums (4.4. att.).

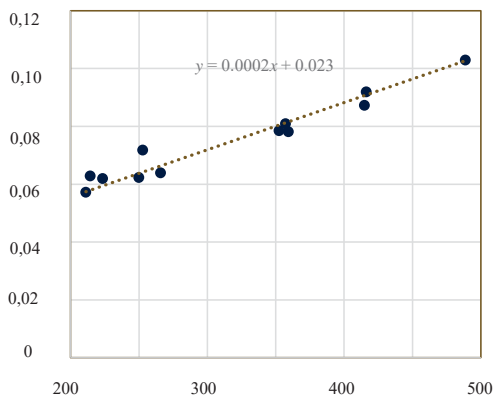


4.2. att. Siltumvadītspējas/blīvuma korelācija.

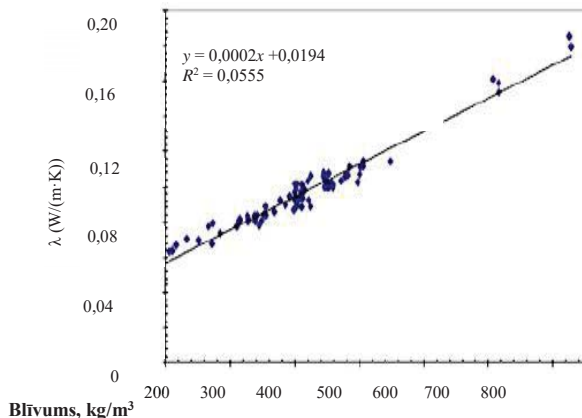


4.3. att. Blīvuma/spiedes stiprības korelācija.

Tādējādi var secināt, ka iegūto dabīgo šķiedru biokompozītu siltumvadītspēja pie noteikta blīvuma visām saistvielām ir atbilstoša un līdzīga. MOC un MPC saistvielu biokompozīti bija ar līdzvērtīgi augstu stiprību, tādējādi to spiedes stiprības un blīvuma attiecība pie 350 kg/m<sup>3</sup> bija ap 0,4 MPa, FHL stiprība pie līdzvērtīga blīvuma bija ap 0,1 MPa (4.3. att.).



4.4. att. Siltumvadītspējas/blīvuma korelācija un lineārās tendences vienādojums.

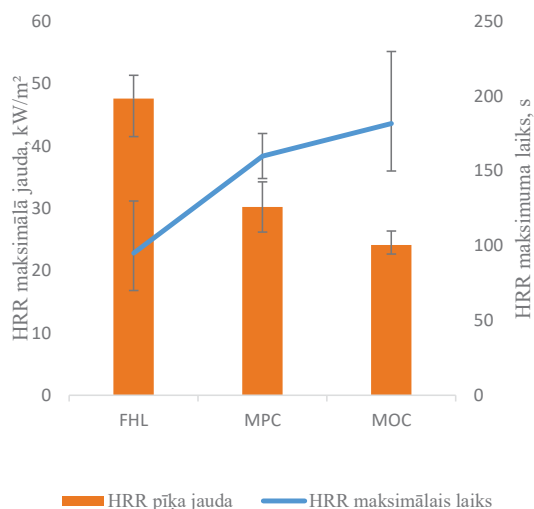


4.5. att. Siltumvadītspējas/blīvuma korelācija un lineārās tendences vienādojums no *Cerezo* pētījuma [26].

### 4.3. Biokompozītu ugunsizturība

Lai noteiktu materiālu ugunsreakciju un varētu tos savstarpēji salīdzināt, tika veikti vairāki testi. Pirmajā testu sērijā tika veikti mazā mēroga testi atbilstoši LVS EN ISO 11925 un LVS ISO 5660-1. Testēti paraugi no visiem trīs izvēlētajiem biokompozītu veidiem MOC-1, MPC-2 un FHL-2 sastāviem. Vispirms tika veikts tests pēc LVS EN ISO 11925-2 “2. daļa: Atsevišķa liesmas avota tests”, pēc tā visi materiāli klasificējami kā B klase (saskaņā ar LVS EN 13501), jo neviens no trim sastāviem neuzrādīja aizdegšanos (4.7. att.), 150 mm liesmas ceļa garums netika sasniegts, netika arī novēroti dūmi vai liesmojoši pilieni. Tāpēc tika veikti papildu testi pēc LVS ISO 5660-1, lai materiālus var salīdzināt savstarpēji un ar citiem materiāliem.

Saskaņā ar standartu izgatavoti paraugi ar izmēriem 100 mm × 100 mm, biezums – līdz 80 mm. Testēšana tika veikta koniskajā kalorimetrā ar siltuma starojumu 50 kW/m<sup>2</sup>. Veicot testu, tika noteikts biokompozītu aizdegšanās laiks, maksimālās degšanas jaudas sasniegšanas laiks un siltuma izdalīšanās maksimālā jauda (4.6. att.). Aizdegšanās laiks reģistrēts tikai FHL sastāvam pie 61 s, pārējiem paraugiem aizdegšanās nav konstatēta. HRR – siltuma izdalīšanās maksimuma laiks FHL paraugiem bija 95 s, magnija paraugiem bija par 45 % – 50 % ilgāks. Arī maksimālā jauda FHL paraugiem bija lielāka – 47,61 kW/m<sup>2</sup>, MPC – 30,23 kW/m<sup>2</sup>, MOC – 24,12 kW/m<sup>2</sup>.



4.6. att. Maksimālā siltuma jauda un laiks atkarībā no biokompozīta saistvielas.

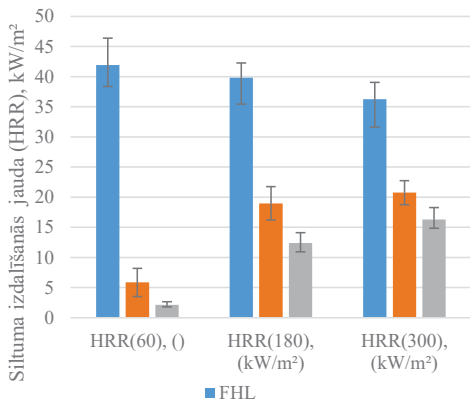


4.7. att. MOC testēšana pēc LVS EN ISO 11925-2.

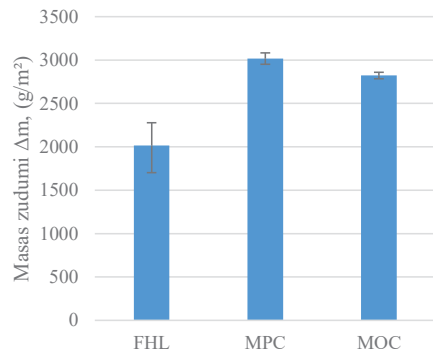
Lai raksturotu degšanas dinamiku, 4.8 att. attēlota momentānā degšanas jauda – 60 s, 180 s un 300 s kopš testa sākuma. Grafikā ir redzams, ka FHL paraugiem degšanas jauda ar laiku samazinājās, kas ir līdzīgi koksnes paraugiem [133], toties abiem magnija sastāviem jauda ar laiku pieauga.

Masas zudumi siltuma starojuma ietekmē redzami 4.9. att. Vismazākie masas zudumi tika reģistrēti FHL – 2015 g/m<sup>2</sup>, lielāki MOC – 2822 g/m<sup>2</sup>, bet vislielākie MPC – 3017 g/m<sup>2</sup>. Šādi rezultāti ir pretēji gaidītajiem, jo no nomērītās degšanas jaudas un laika FHL uzrādīja visintensīvāko degšanu, taču šajā testā – vismazākos masas zudumus.

Rezultāti skaidrojami ar saistvielu atšķirīgo ķīmisko uzbūvi. MOC un MPC biokompozītu saistvielās ir liels ķīmiski saistītā ūdens daudzums, kas pie noteiktām temperatūrām tiek atbrīvots (MPC no 120 °C līdz 200 °C [134], MOC ap 600 °C [98]), tādējādi samazinot siltuma izdalīšanās jaudu un palielinot jaudas maksimālo sasniegšanas laiku. MOC cietinātājs MgCl<sub>2</sub> arī atsevišķi tiek izmantots kā liesmu slāpētājs [133], tādējādi ķīmiski nesaistītais MgCl<sub>2</sub> attiecīgi samazina siltuma izdalīšanās jaudu. Masas zudumi (4.9. att.) tieši norāda uz šo magnija saistvielu sadalīšanos – lai arī tie izdalīja par 45 % – 50 % mazāku siltuma jaudu, to masas zudumi bija par 40 % – 50 % lielāki.



4.8. att. Siltuma izdalīšanās jauda atkarībā no biokompozīta saistvielas.



4.9. att. Masas zudums atkarībā no biokompozīta saistvielas

## 4.4. Biokompozītu mikrobioloģiskās noturības testu rezultāti

### 4.4.1. Pirmā testu sērija

Pirmajā testu sērijā veiktas mikrobioloģiskās noturības pārbaudes divu veidu sastāviem – MOC-2 un FHL-2 (sastāvs aprakstīts 4.2. nodaļā). Mākslīgā inokulācija veikta ar divu veidu sēnēm (*Cladosporium herbarum* un *Alternaria alternata*), katrai paraugu grupai ar vienu no sēņu veidiem, kā arī kontroles grupas paraugi bez mākslīgas sēņu inokulācijas (K). Papildus pusei no paraugiem tika veikta mākslīga novecināšana klimata kamerā 30 sasalšanas-atkušanas ciklus un UV staru ietekmē (CH).

Paraugiem, kuriem tika veikta mākslīga novecināšana, novērojami nedaudz sliktāki rezultāti – MOC-CH un FHL-CH uzrāda apauguma intensitāti 2, taču pārējie paraugi neuzrāda atšķirīgu apauguma intensitāti. Tāpēc secināms, ka pakļaušana sasalšanas-atkušanas cikliem un UV starojumam ievērojami nepasliktina MOC un FHL bionoturību.

Salīdzinot pirmās testu sērijas paraugus ar analogos apstākļos turētiem būvmateriāliem ar zemu pH līmeni ( $\text{pH} < 6$ ), ir redzams, ka būvmateriāli ar zemu pH līmeni sasniedza apaugumu robežas no 3,5 līdz pat maksimumam 5, tādējādi norādot uz FHL un MOC sastāvu aizsardzību pret bioloģisko iedarbību.

### 4.4.2. Otrā testu sērija

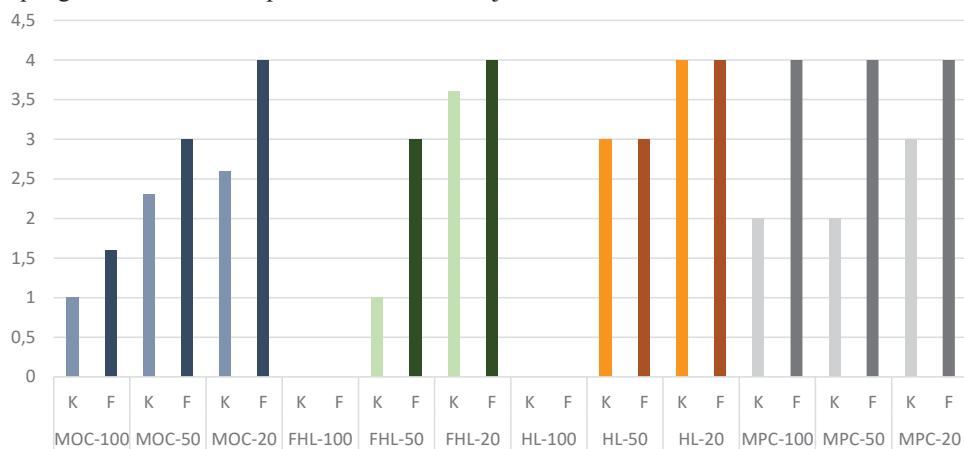
Otrajā testu sērijā tika veiktas mikrobioloģiskās noturības pārbaudes piecu veidu materiāliem – MOC-2, FHL-2 un MPC-3 (sastāvs aprakstīts 4.2. nodaļā), kā arī magnija karbonāta biokompozītam, kas izgatavots analogi MOC-2, bet bez pievienota  $\text{MgCl}_2$  cietinātāja, kā arī references materiālam – kokšķiedru vatei. Mākslīgā inokulācija tika veikta ar sešu veidu sēņu suspensiju, katram materiālam noturība tika noteikta inokulētiem paraugiem un kontroles paraugiem. Otrajā testu sērijā analizējamie paraugi tika izturēti divos mitruma režīmos: RH 75 % un 99 %. Kompozītmateriālu vizuālais apaugums tika novērtēts pēc četru mēnešu inkubācijas.

Pie 99 % RH MPC uzrādīja apauguma līmeni 4, koksnes vate – apauguma līmeni 3, abiem konstatēts makroskopisks sēņu pieaugums, pārējie paraugi uzrādīja apauguma līmeni 1 jeb mikroskopiski konstatētu sēņu pieaugumu. Koksnes vates vājā bionoturība skaidrojama ar zemo pH līmeni – 4,28. Magnija fosfāta cementam ir augsts pH – 10,45, bet zema bionoturība, kas skaidrojama ar izmantoto saistvielas cietinātāju – kālija fosfātu. Kālija fosfāts var tikt izmantots arī kā koncentrēti minerālmēsli [135], [136], tādējādi neizšķīdusī cietinātāja daļa kalpo par barības vielām sēņu augšanai.

#### 4.4.3. Trešā testu sērija

Trešajā testu sērijā tika veiktas mikrobioloģiskās noturības pārbaudes astoņu veidu materiāliem – MOC-2, FHL-2 un MPC-3 (atbilstoši aprakstam 4.2. nodaļā), kā arī hidrauliskā kaļķa saistvielas biokompozītam, kaņepju un linu spaļiem un references materiāliem – kokšķiedru vatei un fibrolītam. Visiem biokompozītiem tika pārbaudītas trīs dažādas saistvielu koncentrācijas – 100 %, 50 % un 20 %.

Mākslīgā inokulācija tika veikta ar sešu veidu sēņu suspensiju, katram materiālam noturība tika noteikta inokulētiem paraugiem (apzīmējums F) un kontroles paraugiem (apzīmējums K). Trešajā testu sērijā analizējamie paraugi tika izturēti 99 % RH. Kompozītmateriālu vizuālais apaugums tika novērtēts pēc 45 dienu inkubācijas.



4.10 att. Trešās testu sērijas apauguma intensitāte atkarībā no saistvielas.

Analizējot kompozītu bionoturības izmaiņu atkarībā no saistvielas koncentrācijas (4.10. att.), var secināt, ka, samazinoties minerālās saistvielas daudzumam, arī bionoturība samazinās. MOC, FHL un HL biokompozītiem pie 100 % koncentrācijas apauguma vērtējums ir 0–1,5, pie 50 % koncentrācijas 1–3, pie 20 % – 2,5–4 (4.10. att.). Šīs bionoturības samazinājums sakrīt ar pH līmeņa samazinājumu paraugos. Kaļķu bāzes saistvielu biokompozīti (FHL un HL) uzrāda augstāku bionoturību nekā MOC biokompozīti, jo pie 100 % saistvielas paraugiem nebija vērojams apaugums, turpretim MOC bija vērojams apaugums līmenī 1 – 2. Pie 50 % un 20 % paraugiem šī atšķirība pazūd. Tas skaidrojams ar pH līmeni, kas kaļķa bāzes paraugiem pie 100 % ir ap 12, bet MOC – 9,76, toties, samazinoties saistvielas daudzumam paraugos līdz 50 % un 20 %, arī atšķirība pH līmenī un bionoturību pazūd.

MPC biokompozītiem noturības samazināšanās bija mazāk izteikta, jo apaugums pie 100 % koncentrācijas bija 2–4, pie 20 % tas bija 3–4. Šāds paaugstināts MPC apaugums bija līdzīgs otrās sērijas rezultātiem un skaidrojams ar izmantotā cietinātāja – kālija fosfāta ietekmi.

Biokompozītu pildvielas – kaņepju spaļu – bionoturība bija zema, sēņu pieaugums – 3,2– 4. Kaņepju spaļiem literatūrā mēdz piedēvēt antibakteriālas īpašības [137], taču eksperimentos redzams to apaugums ar sēnēm. Ja salīdzina tos ar līdzīgas izcelsmes pildvielu – linu spaļiem, redzams, ka linu spaļi ir apauguši pilnībā, kā arī šis apaugums attīstījās daudz agrāk nekā kaņepju spaļu apaugums.

Trešajā eksperimenta etapā tika noskaidrots, ka uz izmantotajiem materiāliem visbiežāk bija sastopamas *Paecilomyces* un *Stachybotrys* ģints sēnes. Atsevišķos gadījumos tika konstatētas arī *Penicillium*, *Acremonium*, *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Trichoderma* un *Mucor*, kas liecina par to, ka substrāti satur pietiekamu mitrumu un barības vielu daudzumu sēņu attīstībai. Lielākā daļa šo sēņu barojas ar celulozi, tāpēc tās bija sastopamas uz materiāliem, kas ir uz celulozes bāzes [125], [138]. *Stachybotrys* barojas arī ar lignīnu, tāpēc tā bieži sastopama uz koksnes un tās produktiem [139], pazīstama arī kā melnais pelējums [140]. Kaņepju spaļi satur augstu lignīna un celulozes daudzumu, tāpēc šis sēnes veids bija izplatīts lielā daļā paraugu (4.11. att.). Šīs sēnes izdalītie mikotoksīni izraisa alerģiskas reakcijas, kas bieži tiek asociētas ar dažādām veselības problēmām, kas radušās neatbilstoša iekštelpu mikroklimata rezultātā [141].

Liela nozīme sēņu izplatībā būvniecības materiālos ir to pH līmenim. Uz kompozītmateriāliem ar pH līmeni 6 līdz 8 sēnes izplatās straujāk nekā uz sārmainiem materiāliem ar pH 12–13–14. Kaļķa un cementa bāzes materiāliem laika gaitā karbonizācijas process samazina šo materiālu pH vērtību līdz aptuveni 9, kas ļāva uz materiāliem sākt augt mikroorganismiem. Līdzīgas pH vērtības tika sasniegtas, samazinot saistvielas daudzumu. Dažādi pētījumi par javu karbonizāciju parāda, ka to bioloģiskā uzņēmība pazemināta pH gadījumā ir ievērojami palielināta [141], tā tika konstatēts arī veiktajā pētījumā ar saistvielas daudzuma samazināšanu.



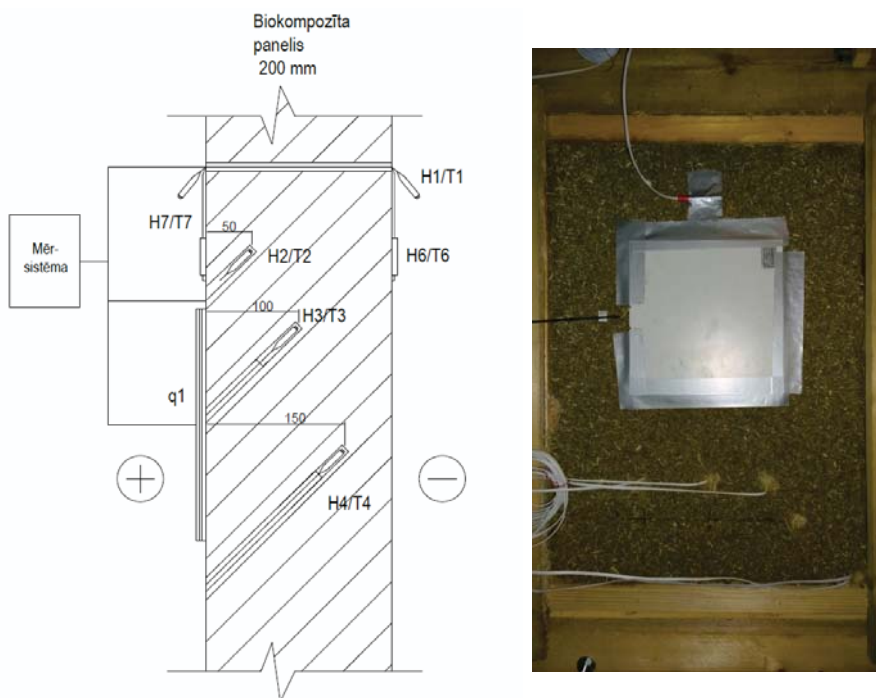
4.11. att. No kreisās – FHL-100, FHL-50, FHL-20.

## 4.5. Lauka testi siltumvadītspējas un mitruma migrācijas noteikšanai

Šajā pētījumā dabīgo šķiedru biokompozīti tika testēti lauka apstākļos, veicot mērījumus esošās ēkās, kur izmantoti šādi materiāli, lai analizētu to darbību Eiropas vidējā platuma klimatiskajā joslā. Mērījumi veikti, izmantojot īpaši izstrādātu pārvietojamu mērsistēmu ar temperatūras, mitruma un siltuma plūsmas sensoriem. Tika analizētas materiāla siltumtehniskās īpašības un salīdzinātas ar laboratorijas apstākļos iegūtajām, kā arī apskatīta mitruma migrācija biokompozītos.

Izvēlētā sistēma ir paredzēta uzstādīšanai telpās. Sistēma satur 14 miniatūrus temperatūras un mitruma sensorus, kas paredzēti izvietošanai telpās un būvkonstrukcijās un vienu siltuma plūsmas sensoru plāksnes veidā. Temperatūras un mitruma sensori ir ievietoti aizsargkorpusā ar atveri. Siltuma plūsmas sensors tiek nostiprināts uz sienas. Sistēma atrodas noslēgtā korpusā, kuram sensori tiek pieslēgti ar kabeļu palīdzību. Piekļuve mērījumu datiem ir attālināta ar mobilā modema palīdzību.

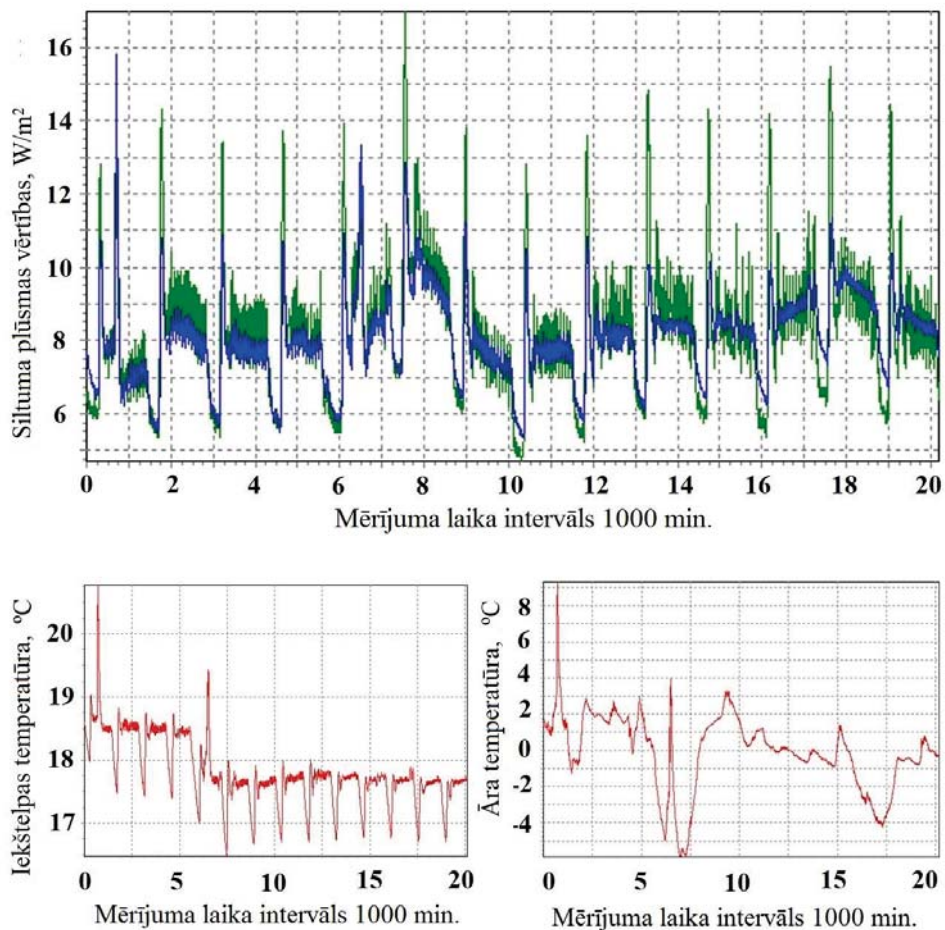
Pētījumā reālos apstākļos tika mērītas trīs dažādu veidu sienu konstrukcijas: 200 mm kaņepju-kaļķa panelis bez iekšējās un ārējās apdares (4.6. tab. A, 4.12. att.), 250 mm bieža kaņepju-kaļķa siena ar 50 mm kokšķiedru vates siltinājumu (4.6. tab. B) un 80 mm kaņepju-kaļķa bloki, kas tika izmantoti, lai no iekšpuses nosiltinātu esošu 200 mm biezu stāvbūves sienu (4.6. tab. C).



4.12. att. A tipa siena – eksperimentālais biokompozīta panelis.

No eksperimentālajiem biokompozīta lauka mērījumiem tika aprēķinātas divas dažādas  $U$  vērtības:  $U_{avg}$  un  $U_{num}$ .  $U_{avg}$  var aprēķināt noteiktam laika periodam, izmantojot iekšējās un

ārējās virsmas temperatūras datus un siltuma plūsmas rezultātus pēc kumulatīvās metodes. Biokompozītu bloku (4.6. tab. C) mērīšanai tika noteikta  $U$  vērtība sienai bez iepriekšējas izolācijas, un testi ar izolētu sienu ļauj to noteikt, pamatojoties uz siltuma pretestības pieaugumu.  $U_{theor}$  vērtības aprēķinātas no laboratorijā veiktiem mērījumiem.



4.13. att.  $U_{avg}$  un  $U_{num}$  lielumu salīdzinājums.

Tomēr, lai precīzi izmantotu kumulatīvo metodi  $U$  vērtības aprēķināšanā, nav pieļaujamas straujas temperatūras svārstības. Eksperimentālie dati norāda, ka notiek lielas temperatūras un siltuma plūsmas svārstības, kas ietekmē virsmu iekšpusē, parasti no dažādiem siltuma avotiem, piemēram, sildītājiem vai cilvēka aktivitātēm. Tā rezultātā mērījumiem ar siltuma plūsmas sensoriem iekšpusē varēja redzēt  $U_{avg}$  vērtību izmaiņas pat par 15 % vienas nedēļas laikā. Šīs svārstības ir redzamas 4.13. att., kur zaļā līnija attēlo mērītās siltuma plūsmas vērtības.



LU VTPMM laboratorijā tika izstrādāta  $U$  vērtības aprēķina metodika, kas pieļauj izmantot eksperimentālos datus no īsā laika periodā veiktiem mērījumiem [126]. Metodes pamatā ir viendimensionāls siltuma caurlaidības koeficienta aprēķins, izmantojot siltuma plūsmas blīvumu uz siltākās virsmas un virsmu temperatūras starpību [127]. Metode ir integrēta un izmantota, lietojot programmu *DataProc* [46].

Teorētisko un skaitlisko  $U$  vērtību salīdzinājums norāda, ka vislielākās atšķirības ir eksperimentālajam panelim (4.6. tab. A tips). Tas izskaidrojams ar materiāla žāvēšanas laiku, jo tas tika uzstādīts neilgi pēc ražošanas, un pēc tikai divu mēnešu žāvēšanas H4 iekšējā RH sensora rādījums nebija zemāks par 80 % RH. To var arī redzēt  $U$  vērtību variācijā par  $0,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  šo divu mēnešu žūšanas periodā.

Abu eksperimentālo  $U$  vērtību salīdzinājums rāda, ka mērījumiem, kuros siltuma plūsmas sensors atradās uz materiāla iekšējās virsmas, temperatūras un siltuma plūsmas svārstības ietekmēja  $U_{avg}$  vērtības. Piemēram, secīgā septiņu dienu mērījumu periodā, kur rezultāti var atšķirties par 15%, tomēr  $U_{num}$  aprēķins samazina šīs svārstības un ļauj saīsināt mērīšanas laiku. Mērījumiem ar siltuma plūsmas sensoru, kas atrodas vidējā slānī, starpība starp  $U_{avg}$  un  $U_{num}$  vērtībām ir tikai  $0,03 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  jeb maksimāli 6,7 %. Tādējādi redzams, ka tad, ja siltuma plūsmas sensors atrodas stabilos apstākļos, arī izmantojot kumulatīvo metodi ir iespējams panākt pietiekami precīzus rezultātus.

4.6. tabula

Eksperimentālie sienu veidi, to teorētiskās un izmērītās  $U$  vērtības

Sienas tips	A	B	C
<p>Biokompozīta panelis 200 mm</p> <p>Sienas šķēsgriezums</p>	<p>Koksķiedru izolācija 50 mm</p> <p>Biokompozīta panelis 250 mm</p> <p>Koka apšuvums</p> <p>Gaisa šķirkarta</p>	<p>Bio-kompozīta bloks 80 mm</p> <p>Koka stāvbūves siena 200 mm</p>	
Kopējais sienas konstrukcijas biezums, mm	200	300	280
Biokompozīta biezums, mm	200	250	80
$U_{theor}$ , $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	0,60	0,23	0,30
$U_{avg}$ , $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,2 (2016-feb) 0,9 (2016-apr, okt)	0,29 (2016-nov) 0,34 (pavasaris-2017-apr)	0,48 (bez biokompozīta bloka) 0,23 (ar biokompozīta bloku)
$U_{num}$ , $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,2 (2016-feb) 0,8...0,9 (2016-apr, okt)	0,28 (2016-nov) 0,29 (2017-apr)	0,45 (bez biokompozīta bloka) 0,20 (ar biokompozīta bloku)

Siltuma plūsmas un relatīvā mitruma sensoru rezultāti norāda uz nepieciešamību pēc atbilstošas biokompozītu materiāla žāvēšanas, jo ražošanas procesā tas ir saglabājis ievērojamu daudzumu ūdens. Šis liekais ūdens negatīvi ietekmē  $U$  vērtību – rezultāts ir 25 % līdz 33 % lielāks nekā žāvētajam panelim. Jāizvairās no šī mitruma ieslēgšanas starp apdares slāņiem, jo tas aizkavē žūšanu un var radīt labvēlīgus apstākļus sēņu attīstībai.

Apskatot temperatūras grafiku izmaiņas laikā, siltumenerces fāžu nobīdes var noteikt arī grafiski. Temperatūras sensoram T6 sasniedzot maksimumu dienas laikā, 50 mm dziļāk esošais T4 sensors maksimumu sasniedz pēc trīs stundām, T3 – pēc četrām stundām un 50 mm no iekšējās virsmas esošais T2 – pēc vidēji sešām stundām. Tātad 200 mm biokompozīta paneļa siltumenerces fāžu nobīde starp iekšējo un ārējo virsmu ir 6–8 stundas. Šāda fāžu nobīde tika iegūta, arī rēķinot  $U_{num}$  ar *DataProc*.

B sienas tipam var novērot, ka, virsmas sensoram T4 sasniedzot maksimumu, T2 sensors maksimumu sasniedz pēc 9–10 stundām, kas nozīmē, ka 250 mm biokompozīta sienu ar 50 mm kokšķiedras izolāciju siltumenerces fāžu nobīde ir 10–12 h, kas tiek uzskatīts par optimālu laiku, lai ēkās maksimāli izmantotu siltumenerci un pasīvās dzesēšanas iespējas.

Apskatot B tipa sienas mitruma sensoru datus, var novērot kaņepju augsto mitruma buferspēju. Iekštelpu relatīvais gaisa mitrums apskatītajā periodā mainījās no 23% līdz 50 %, taču 50 mm sienas dziļumā no 53%–60 %. Šī izmaiņa notiek bez fāžu nobīdes laikā. Tas norāda, ka kaņepju biokompozīta siena aktīvi regulē iekštelpu mikroklimatu, jo tikai 20 % no apskatītā laika perioda iekštelpu mitrums bija zem 40 %, kas tiek uzskatīts par robežlielumu cilvēka veselībai atbilstošam iekštelpu mikroklimatam [142].

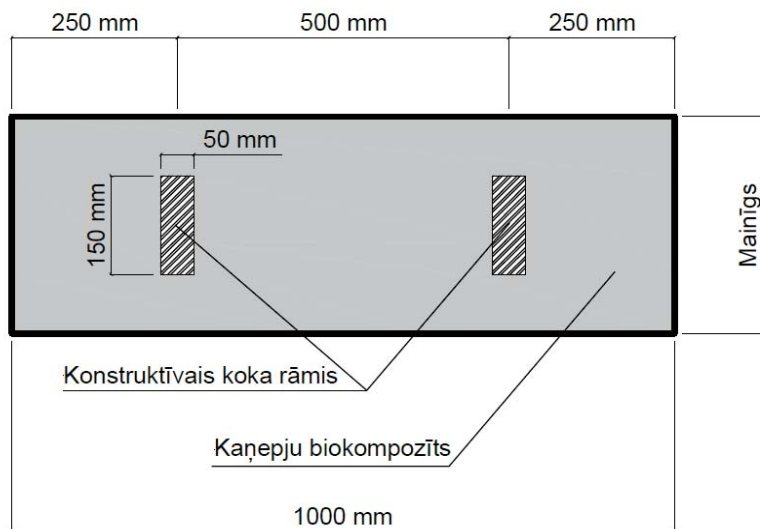
Mitruma mērījumu rezultāti norāda uz augstu mitruma caurlaidību un biokompozīta buferspēju, jo tā, reaģējot uz iekšējām un ārējām mitruma svārstībām, absorbē un desorbē ūdens tvaikus. Tas, no vienas puses, samazina materiāla siltuma pretestību, bet, no otras puses, ļauj nodrošināt augstāku iekštelpu siltuma komfortu, jo samazinās relatīvā mitruma svārstības.

## 5. DABĪGO ŠĶIEDRU BOKOMPOZĪTU DZĪVES CIKLA ANALĪZE

### 5.1. Mērķa un apjoma noteikšana

#### 5.1.1. DCA metode biokompozītiem

Lai varētu novērtēt dažādus radītos biokompozītus un salīdzināt tos ar alternatīviem materiāliem, nepieciešama vienota metode to ietekmes aprēķināšanai, kas tika izstrādāta šajā darbā.



5.1. att. Funkcionālās vienības sienas daļas griezumā.

Dabīgo šķiedru biokompozītu galvenais izmantošanas veids ir sienu izolācijas materiāli, tāpēc DCA funkcionālās vienības tika raksturotas kā  $1 \text{ m}^2$  sienas laukums, ar  $U = 0,18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , kas atbilstoši Latvijas būvnormatīvam LBN 002-15 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” ir normatīvā sienu  $U$  vērtība dzīvojamām ēkām. Sienas posmu ar mainīgu biezumu aizpilda kaņepju biokompozīts, izņemot nesošo daļu, ko veido divi  $150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  koka statņi, kas atrodas  $500 \text{ mm}$  attālumā viens no otra un ir novietoti sienas griezumā pa vidu (5.1. att.).

Biokompozītu stiprība tiek definēta ar divām robežvērtībām, ņemot vērā iepriekšējos pētījumus [147] – pirmā  $0,15 \text{ MPa}$ , kas raksturo tradicionālo kaņepju biokompozīta iestrādes metodi veidņos uz vietas objektā, otrā –  $0,5 \text{ MPa}$  raksturo lietojumu kā pašnesošam siltumizolācijas bloku materiālam.

Lai iegūtu funkcionālās vienības biezumu un pielietoto materiālu daudzumu, nepieciešams apkopot siltumvadītspējas, stiprības un blīvuma datus no eksperimentālās daļas, lai noteiktu lielumus pie konkrētām robežvērtībām. Siltumvadītspēja pie nepieciešamās stiprības noteikta eksperimentālajā fāzē, tāpēc biezums tiek precizēts, lai sasniegtu nepieciešamo normatīvo  $U$  vērtību (apkopojums 5.1. tab.).

Vislielākais materiālu patēriņš bija uz kaļķa bāzes veidotiem sastāviem (5.1. tab.), jo tiem ir zemāka stiprība un nepieciešams lielāks saistvielas daudzums, lai sasniegtu funkcionālās vienības robežvērtības. Vismazākais materiālu patēriņš noteiktās  $U$  vērtības sasniegšanai bija magnija oksihlorīda un ortofosfāta saistvielas paraugiem, jo tiem ir zema stiprības/siltumvadītspējas attiecība.

5.1. tabula

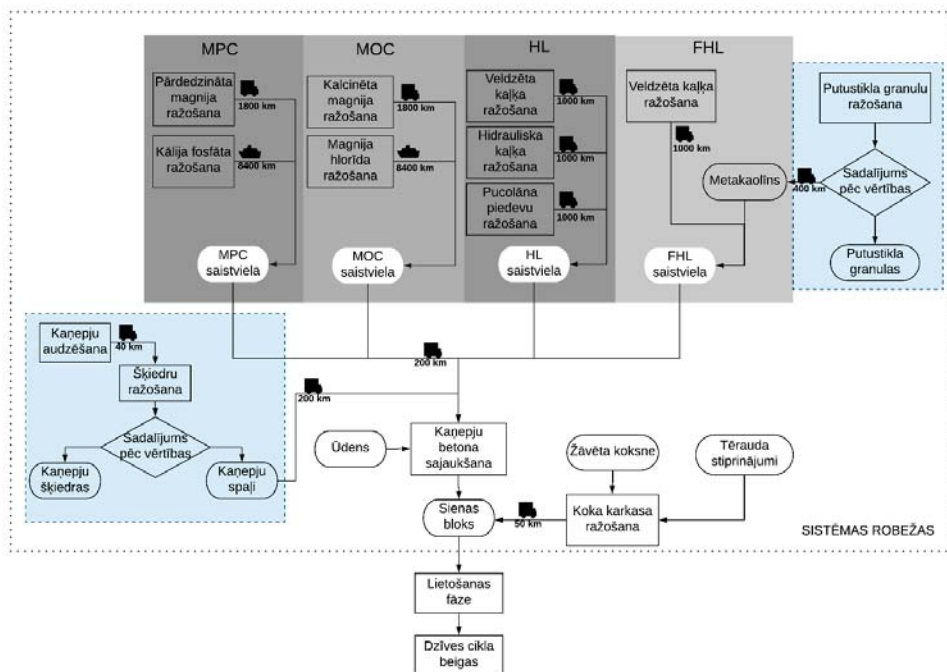
Funkcionālās vienības īpašības un izmēri

Saistv. tips	Nosauk.	Spaļi, kg	Ūdens, kg	Saistviela, kg	Spiedes stiprība, MPa	Silt. vadītsp., W/m·K	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	Biezums pie $U=0,18$ W/m <sup>2</sup> ·K,	FV pie $U=0,18$ W/m <sup>2</sup> ·K, relatīvais biezums, m
MPC	MPC(0,15)	125,6	205,2	108,5	0,15	0,062	245,2	0,344	0,344
	MPC(0,50)	125,6	268,5	239,7	0,50	0,080	371,5	0,446	0,446
MOC	MOC(0,15)	125,6	157,0	98,8	0,15	0,062	210,1	0,344	0,344
	MOC(0,50)	125,6	157,0	256,4	0,50	0,085	380,1	0,474	0,474
FHL	FHL(0,15)	125,6	286,4	258,7	0,15	0,082	368,9	0,453	0,453
	FHL(0,50)	125,6	320,3	326,5	0,50	0,108	515,9	0,600	0,600
HL	HL(0,15)	125,6	248,3	182,7	0,15	0,075	322,6	0,415	0,415
	HL(0,50)	125,6	308,0	302,0	0,50	0,097	446,6	0,541	0,541

Funkcionālā vienībā definē vienādas  $U$  vērtības, tāpēc siltumvadītspējas ziņā materiālu lietošanas fāzē nekādas atšķirības nav iegūstamas. Lai šādiem materiāliem ņemtu vērā bioloģisko CO<sub>2</sub> uzkrāšanu, nepieciešams izmantot “no-šūpuļa-līdz-vārtiem” (*cradle-to-gate*) sistēmu (5.2. att.) [148].

Konkrētajā DCA pētījumā bija nepieciešama “ietekmes piešķiršana” (*impact allocation* – tiek sadalīta ietekme uz vidi starp viena procesa vairākiem produktiem pēc masas vai ekonomiskā sadalījuma principiem) kaņepju spaļiem un metakaolīnam, jo tie abi ir atkritumprodukti, kuru primārie produkti ir ar ievērojami mazāku masu, taču veido 75 %–95 % no ieņēmumiem. Šādos gadījumos izmanto ekonomisko sadalījumu [149], kas tika lietots arī promocijas darbā.

Lai varētu salīdzināt kaņepju biokompozītu dzīves ciklu ar citiem materiāliem, ir jāveido alternatīvu materiālu funkcionālās vienības ar salīdzināmām īpašībām, tāpēc funkcionālās vienības tiek pieņemtas ar analogu  $U$  vērtību – 0,18 W/m<sup>2</sup>·K. Kā alternatīvi materiāli tiek izvēlēti 500 mm 300 kg/m<sup>3</sup> gāzbetona bloki bez papildu siltinājuma, 300 mm 375 kg/m<sup>3</sup> gāzbetona bloki ar 100 mm 120 kg/m<sup>3</sup> akmens vates izolāciju, konstruktīvais koka karkass ar 200 mm minerālvates pildījumu un ģipškartona plātņi no iekšpuses. Transportēšanas attālums visiem materiāliem tiek pieņemts 100 km.



5.2. att. Kaņepju biokompozītu dzīves cikla analīzes sistēmas robežas.

## 5.2. Inventarizācijas analīze

Dati, kas promocijas darbā izmantoti DCA veikšanai, iegūti no dažādiem avotiem. Primāri, kur iespējams, tika izmantota *Ecoinvent* datubāze. Tā bija vienīgā datubāze, kas tika izmantota, lai nodrošinātu nemainīgu datu interpretāciju. Ja dati nebija pieejami, tika izmantota līdzīgi pētījumi, kopsavilkumi, apraksti vai personīgā komunikācija. Par kaņepju audzēšanu un pārstrādi galvenie dati tiek ņemti no pētījumiem Latvijā, ko veikusi galvenokārt V. Stramkale no Latgales Lauksaimniecības zinātnes centra [150]–[152], kā arī no personīgās komunikācijas ar audzētājiem un pārstrādātājiem.

## 5.3. Rezultātu analīze un interpretācija

### 5.3.1. Funkcionālo vienību salīdzinājums

*CML 2 Baseline* analīzes metodes rezultāti abām funkcionālajām vienībām ir redzami 5.3. att. Atsevišķs ietekmes novērtējums katrai no 0,15 MPa funkcionālās vienības saistvielām redzams 5.4. att.

MPC ir augstākā ietekme gandrīz visās kategorijās (5.3. att.), izņemot ozona slāņa noārdīšanu un saldūdens ūdens ekotoksicitāti, taču arī šajās kategorijās ietekmes rādītājs ir

augsts. Tā ir arī vienīgā saistviela, kuras funkcionālajai vienībai ir pozitīva CO<sub>2</sub> emisija, visas pārējās uzrāda CO<sub>2</sub> savākšanu (negatīvu emisiju). Tādās ietekmes kategorijās kā paskābināšanās vai eitrofikācijas potenciāls MPC uzrāda 5 līdz 10 reizes augstāku ietekmi nekā pārējās saistvielas, atlikušajās kategorijās tas ir 2 līdz 3 reizes augstāks. Šie rezultāti kopā ar atsevišķo kategoriju ietekmēm (sk. 5.4. att.) ļauj secināt, ka augstāko ietekmi rada monokālīja fosfāts, tāpēc tas ir nozīmīgākais visās kategorijās, it sevišķi paskābināšanās un eitrofikācijas potenciāla veidošanā. Apskatot detalizētāk, ir redzams, ka lielāka daļa ietekmes uz vidi ir radusies no monokālīja fosfāta izejvielas fosforskābes ražošanas ar slapjo procesu.

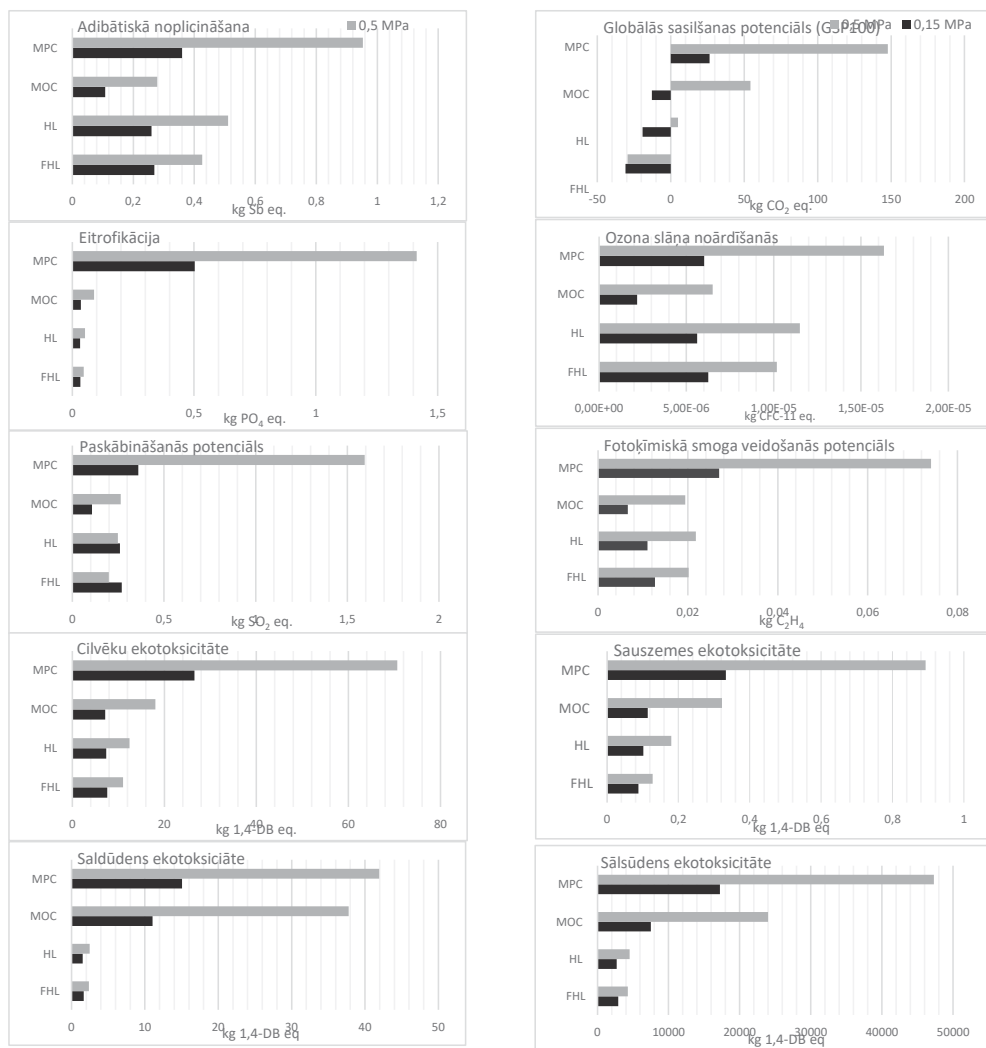
Ņemot vērā, ka biokompozītu sastāvā 30 %–50 % ir kaņepju spaļi ar mazu saistvielas daudzumu, tie rada ievērojamu ietekmi (5.4. att.), galvenā ietekme rodas no minerālmēslu un dīzeļdegvielas lietojuma. Papildus ir jāņem vērā, ka ne tikai emisijām, bet arī pie CO<sub>2</sub> uzņemšanai, kaņepju spaļu ietekme tiek piešķirta (5.1. nod.), ņemot vērā ekonomisko sadalījumu, t. i., tikai 27 % no uzņemtā CO<sub>2</sub>. Ja tiktu lietots masas sadalījums, tad 54 % no uzņemtā CO<sub>2</sub> tiktu piešķirti kaņepju spaļiem, vienlaikus radot lielāku ietekmi pārējās kategorijās. Šī atšķirība ir jāņem vērā, ja pētījuma dati tiek izmantoti apstākļos, kad ir cita šķiedras/spaļu ekonomiskā attiecība, tai mainoties, mainīsies arī kaņepju spaļu ietekme uz vidi.

Salīdzinot HL un FHL emisijas (5.3. att.), var secināt, ka lielākajā daļā kategoriju tie neatšķiras vairāk par 10 %, izņemot GSP, jo abu saistvielu pamatā ir veldzētais kaļķis. GSP 100 kategorijā FHL uzrāda par 30 % labākus rezultātus, kas saistāms ar zemajām emisijām no metakaolīna kā atkritumprodukta iegūšanas. Ja tiktu izmantots speciāli šim mērķim ražots metakaolīns vai cita pucolānu piedeva, tad FHL ietekme būtu ievērojami augstāka un tā lietojums nebūtu attaisnojams.

MOC rezultātu analīze parāda, ka, salīdzinot ar citiem biokompozītiem, lielākajā daļā ietekmes kategoriju tas uzrāda zemākus rezultātus pie 0,15 MPa stiprības, rezultātam nedaudz izlīdzinoties pie 0,5 MPa lielāka MgO daudzuma dēļ. MOC zemo ietekmi nodrošina tā augstā stiprības/blīvuma attiecība, kā arī magnija hlorīda zemā ietekme, salīdzinot ar kālija fosfātu.

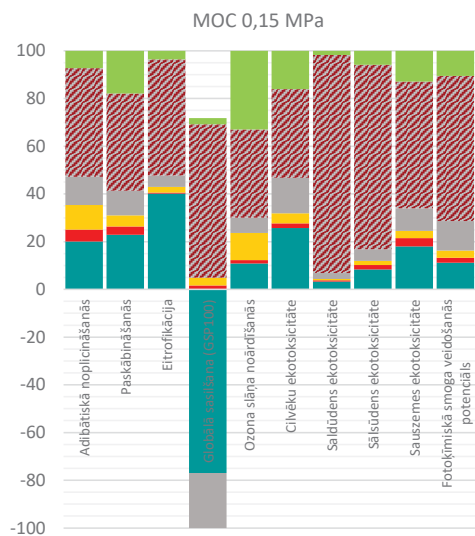
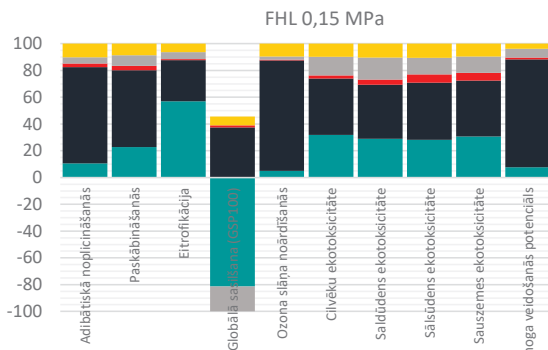
Iegūtie rezultāti (5.2. tab.) atbilst iepriekšējiem DCA pētījumiem par LHC materiāliem, kas parāda CO<sub>2</sub> uzņemšanu no 36,08 kg līdz 1,6 kg CO<sub>2</sub> ekv. / FV, jo FV starp pētījumiem ir atšķirīgs [19], [20], [22], [158]. Šajā pētījumā izmantoto kaļķu bāzes saistvielu GSP faktors ir līdzīgs rezultātiem citos pētījumos – robežās no –30,91 kg līdz 4,88 kg CO<sub>2</sub> ekv. / FV. Lielāko daļu šīs absorbcijas veic kaņepju spaļi (5.4. att.), kas sakrīt ar rezultātiem visos pārējos pētījumos (5.2. tab.). Viena no galvenajām atšķirībām no citiem pētījumiem ir pieņēmumos par kaļķa bāzes saistvielas CO<sub>2</sub> uzņemšanu. Butēns [158], Ips [20] un Preto [19] pieņem pilnīgu saistvielu karbonizāciju, tāpat kā šajā pētījumā, Arigoni [22] pieņem daļēju karbonizāciju, kas ir notikusi pēc 240 dienām, balstoties uz eksperimentāliem rezultātiem. Ja Arigoni pētījumā tiktu pieņemta pilnīga karbonizācija, tad kopējā balance būtu – 26,01 kg CO<sub>2</sub> ekv./FV, bet tika pieņemta tikai daļēja karbonizācija, kas dod bilanci 12,09 kg CO<sub>2</sub> ekv./FV. Izmantojot šādu daļēju karbonizācijas metodi, šajā pētījumā tiktu iegūti ievērojami atšķirīgi rezultāti, un tie būtu labvēlīgāki MgO saistvielas izmantošanai.

MgO saistvielas, pateicoties zemākai magnija kalcinēšanas temperatūrai [89], kā arī MgO iespējam karbonizēties, tādējādi piesaistot CO<sub>2</sub> [159], tiek uzskatītas par pārākām savā nelielajā ietekmē uz vidi, salīdzinot ar kaļķu un cementa saistvielām.

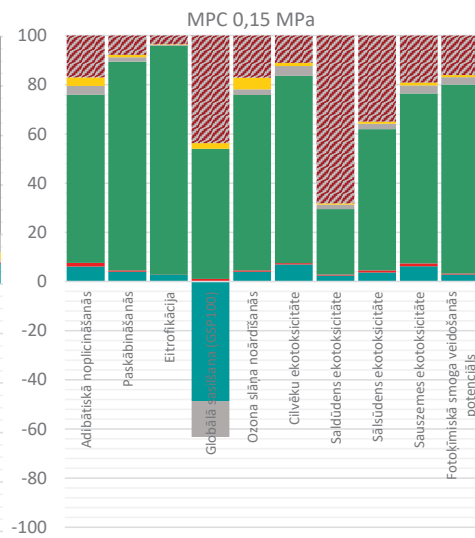
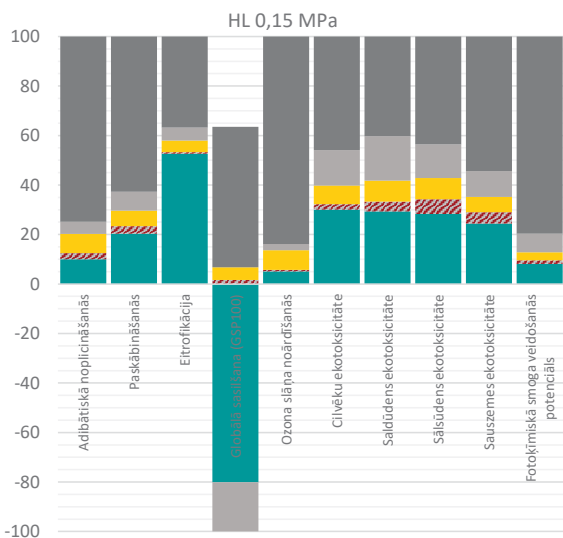


5.3. att. CML2 Baseline rezultāti katrai ietekmes kategorijai.

Tomēr daži pētījumi, kas galvenokārt bija vērsti uz MgO ražošanas DCA, ir atklājuši, ka, salīdzinot tikai pēc saistvielu masas, MgO izdala vairāk CO<sub>2</sub> nekā tas pats kaļķa vai cementa daudzums [160] [161]. Tas saistīts ar faktu, ka magnēzīta sadalīšanās rezultātā izdalās 1,10 t / t CO<sub>2</sub>, savukārt kaļķakmens sadalīšanās rezultātā tikai 0,78–0,83 t / t CO<sub>2</sub>, neraugoties uz zemākām kalcinēšanas temperatūrām [151]. Tas tieši ietekmē GSP potenciālu (5.4. att.), jo magnija saistvielas dod lielāku ieguldījumu GSP nekā kaļķu bāzes saistvielas, lai gan to var novērst, samazinot saistvielu izmantošanu MOC gadījumā.



- Kaņepju spaļi
- Elektroenerģija, vidējā sprieguma
- Transports, kravas auto>32t
- Magnija hlorīda heksahidrāts
- HL saistviela ar CO2 ieslēgšanu
- FHL saistviela ar CO2 ieslēgšanu
- Koka karkass ar CO2 ieslēgšanu
- Magnija oksīds
- Monokālija fosfāts



5.4. att. 0,15 MPa FV atsevišķo kategoriju ietekme uz vidi.



## GSP rezultātu salīdzinājums ar citiem kaņepju-kaļķa betona pētījumiem

Autori	Spaļi, kg	Ūdens, kg	Saistviela, kg	Siltumv. k., W/m <sup>2</sup> ·K	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	Biezums, m	U - vērtība, W/m <sup>2</sup> ·K	CO <sub>2</sub> uzņem., kg CO <sub>2</sub> eq/kg spaļi	GSP bilance, kg CO <sub>2</sub> eq/FU	
<i>Boutin et al.</i> [158]	24,8	37,2	54,5	0,109	330,0	0,260	0,42	2,11	-35,53	
<i>Ip and Miller</i> [20]	30,0	75,0	50,0	0,057	275,0	0,300	0,19	1,53	-36,08	
<i>Pretot et al.</i> [19]	20,4	67,0	45,0	0,086	390-460	0,240	0,36	1,70	-1,60	
<i>Arrigoni et al.</i> [22]	31,4	58,6	44,5	0,067	330,0	0,250	0,27	1,84	-12,09	
Esošā pētījuma rezultāti	MPC(0,15)	43,2	70,6	37,3	0,062	245,2	0,344	0,18	1,84	26,49
	MPC(0,50)	56,0	119,8	106,9	0,080	371,5	0,446	0,18	1,84	147,76
	MOC(0,15)	43,2	54,0	34,0	0,062	210,1	0,344	0,18	1,84	-12,68
	MOC(0,50)	59,5	74,4	121,5	0,085	380,1	0,474	0,18	1,84	54,29
	FHL(0,15)	56,9	129,7	117,2	0,082	368,9	0,453	0,18	1,84	-30,91
	FHL(0,50)	75,4	192,2	195,9	0,108	515,9	0,600	0,18	1,84	-29,33
	HL(0,15)	52,1	103,0	75,8	0,075	322,6	0,415	0,18	1,84	-19,28
	HL(0,50)	67,9	166,6	163,4	0,097	446,6	0,541	0,18	1,84	4,88

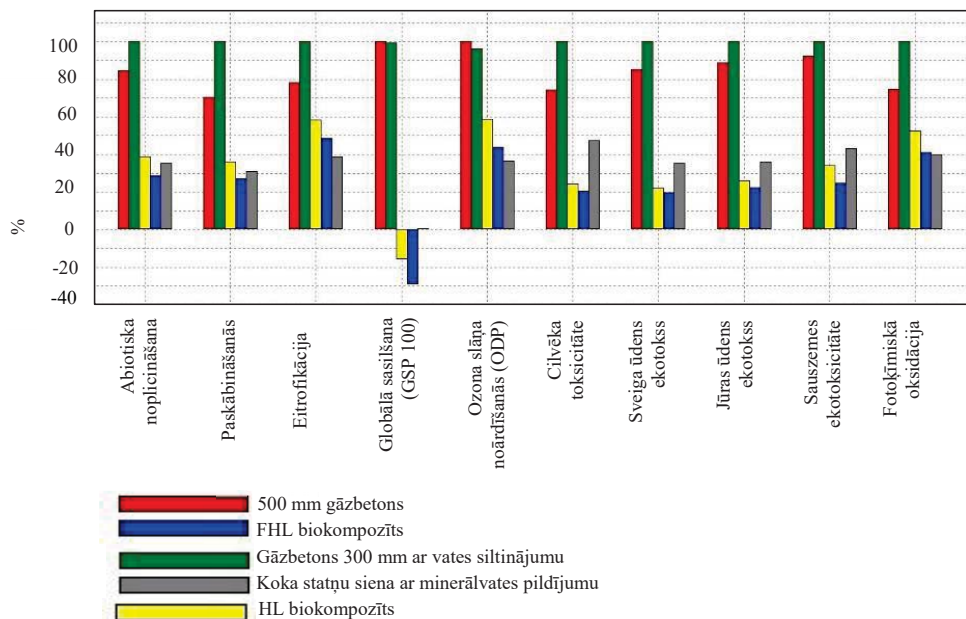
## 5.3.2. Alternatīvu materiālu salīdzinājums

Lai novērtētu kaņepju biokompozīta samazināto ietekmi uz vidi, tas tiek salīdzināts ar alternatīviem materiāliem, kuriem ir identiska siltumcaurlaidība (5.5. att.). Gāzbetona izstrādājumi ir vidēji ar 4–5 reizes augstāku ietekmi uz vidi nekā pārējie materiāli, tas skaidrojams ar lielo enerģijas daudzumu, kas ir patērēts, gan ražojot cementu (galveno gāzbetona sastāvdaļu), gan paša gāzbetona autoklāvēšanas laikā. Arī gāzbetonam izmantojamā līme ir energoietilpīga. Apskatot GSP faktoru, redzams, ka gāzbetons izdala vidēji četras reizes vairāk CO<sub>2</sub> nekā kaņepju-kaļķa funkcionālā vienība spēj absorbēt.

Papildus siltinātai gāzbetona sienai ir pat lielāki emisiju faktori nekā sienai, kas izgatavota tikai no 500 mm gāzbetona. Tas skaidrojams ar to, ka akmens vate uz vienādu masu dod lielākas emisijas nekā gāzbetons. Tas saistāms ar lielāku enerģijas patēriņu ražošanas procesā. Koka statņu siena, kas pildīta ar minerālvati, ir ar līdzīgām emisijām kā kaņepju-kaļķa materiāls (5.5. att.). Lielāko daļu (60%–70%) no visu faktoru emisijām dod tieši minerālvate. GSP faktora gadījumā koka statņa funkcionālā vienība izdala tikai 0,48 kg CO<sub>2</sub>, kas padara šo materiālu par gandrīz CO<sub>2</sub> neitrālu.

Kopumā pierādīts, ka izstrādātā metode dabīgo šķiedru materiālu dzīves cikla analīzei dod iespēju, izmantojot eksperimentāli iegūtas stiprības, fizikālās un siltumvadītspējas īpašības, aprēķināt materiālu ietekmi uz vidi un salīdzināt tos ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.

Saistvielas uz kaļķu bāzes ir parādījušas labu kopējo DCA veiktspēju, jo to ietekme uz GSP bija viszemākā, pateicoties kaļķu bāzes saistvielu karbonizācijai. Salīdzinot kaļķa bāzes saistvielas, var secināt, ka eksperimentālā saistviela uz visiem faktoriem atstāj par 12 %–28 % mazāku ietekmi kā komerciālā hidrauliskā kaļķa saistviela. GSP faktora ietekmē hidrauliskais kaļķis dod 55 % no alternatīvās saistvielas CO<sub>2</sub> uzņemtā daudzuma. Tas pierāda, ka saistvielas vai tās daļu aizstāšana ar mazāk emisiju radošiem atkritumproduktiem dod vēlamu efektu un samazina kopējo kaņepju-kaļķa emisiju apjomu visu faktoru kategorijās.



5.5. att. Alternatīvu būvmateriālu ietekme uz vidi.

Magnija saistvielas ir parādījušas dažādus rezultātus attiecībā uz DCA. MPC bija vislielākā ietekme gandrīz visās kategorijās, un, neraugoties uz tā augsto stiprības un blīvuma attiecību, ietekme uz vidi 0,5 MPa FV bija pat relatīvi augstāka. Tas ir saistīts ar tā cietinātāju – kālija fosfātu, kura ražošanas procesiem ir augsta enerģijas un resursu ietilpība.

MOC bija zemākais blīvums 0,15 MPa FV, kā rezultātā zemais materiāla patēriņš bija viens no iemesliem, kāpēc šim biokompozītam bija zemākā ietekme lielākajā daļā no kategorijām. To izraisīja arī MgCl<sub>2</sub> – MOC cietinātāja – nelielā ietekme uz vidi. Lai gan saistviela cietēšanas procesā nepiesaista CO<sub>2</sub>, tās GSP ietekme ir tikai par 6,60 kg CO<sub>2</sub> ekv. / FV lielāka nekā 0,15 MPa sienas HL saistvielai. Blīvākiem materiāliem šī atšķirība ir lielāka, jo kaņepju šķiedru daudzums paliek nemainīgs. Kopējais MOC sniegums liecina, ka tai ir vislielākais potenciāls rūpnieciskā biokompozītu ražošanas izmantošanā, jo MOC biokompozīti uzrāda vislabāko stiprības/siltumvadītspējas/ietekmes uz vidi attiecību.

Salīdzinot ar cietiem materiāliem (gāzbetonu, gāzbetonu + akmens vati, koka statņu karkasu + minerālvati), kaļķa-kaņepju biokompozīts uzrāda 2–4 reizes zemākas emisijas un ir vienīgais CO<sub>2</sub> neitrālais materiāls, kas pierāda šī materiāla augstvērtīgās ekoloģiskās īpašības.

## SECINĀJUMI

1. Pierādīts, ka, izmantojot atkritumproduktus (atkritumu metakaolīnu, maltus borsilikāta un svina saturošus lampu stiklus) kā aktīvās hidrauliskās piedevas, iespējams paaugstināt veldzētu kaļķu mehāniskās īpašības, sasniedzot spiedes stiprību vismaz 5 MPa, kas nepieciešama dabīgo šķiedru biokompozītu izstrādei. Visaugstāko spiedes stiprības pieaugumu – no 1,18 MPa uz 12,30 MPa – var iegūt, aizstājot CL90 veldzētus kaļķus ar 40 % metakaolīna piedevu.
2. Iegūtas divu veidu magnija bāzes saistvielas, kas uzrāda ievērojami augstāku mehānisko stiprību nekā kaļķa bāzes saistvielas:
  - a. magnija oksihlorīda cements – izgatavots, savienojot kaustisko magnija oksīdu un magnija hlorīda sāļu šķīdumu. Augstāko spiedes stiprību – 60,9 MPa – var iegūt izmantojot  $MgCl_2/MgO$  attiecību 0,34 un ūdens/saistvielas attiecību 0,25;
  - b. magnija fosfāta cements – izgatavots no pārdedzināta magnija oksīda un kālija ortofosfāta. Augstāko spiedes stiprību – 52,1 MPa – var iegūt, izmantojot  $KH_2PO_4/MgO$  attiecību 0,80 un ūdens/saistvielas attiecību 0,28.
3. Izstrādāti trīs dažādu saistvielu dabīgo šķiedru biokompozīti ar atšķirīgām fizikālajām un mehāniskajām īpašībām:
  - a. hidrauliskā kaļķa saistvielas ar metakaolīna piedevu biokompozīti (FHL) ar blīvumu no  $233 \text{ kg/m}^3$  līdz  $489 \text{ kg/m}^3$ , spiedes stiprību 0,06 MPa–0,44 MPa, siltumvadītspēju  $0,062 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ – $0,103 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ;
  - b. magnija oksihlorīda cementa biokompozīti (MOC) ar blīvumu no  $214 \text{ kg/m}^3$  līdz  $416 \text{ kg/m}^3$  un par vismaz 60 % augstāku stiprību nekā kaļķa saistvielu biokompozīti – no 0,16 līdz 0,71 MPa, kā arī siltumvadītspēju  $0,063 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ – $0,092 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ;
  - c. magnija fosfāta cementa biokompozīti (MPC) ar blīvumu no  $211 \text{ kg/m}^3$  līdz  $415 \text{ kg/m}^3$ , spiedes stiprību 0,10 MPa – 0,82 MPa, kā arī siltumvadītspēju  $0,057 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ – $0,087 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .
4. Pēc ugunsreakcijas magnija bāzes biokompozītus MOC un MPC var klasificēt kā B s1, d0 klasi, kaļķa bāzes biokompozīti FHL atrodas robežās starp B un C klasi. MOC uzrāda viszemāko siltuma izdalīšanās jaudu  $24,12 \text{ kW/m}^2$ , MPC par 25 % vairāk –  $30,23 \text{ kW/m}^2$ , FHL izdala  $47,61 \text{ kW/m}^2$ , toties masas zudumi magnija bāzes biokompozītiem ir lielāki nekā MOC –  $2822 \text{ g/m}^2$  un MPC –  $3017 \text{ g/m}^2$ , FHL –  $2015 \text{ g/m}^2$ . Tas saistīts ar magnija bāzes biokompozītos ķīmiski saistīto ūdeni, kas izdalās paaugstinātas temperatūras ietekmē.
5. Bionoturības testos visaugstākos rezultātus uzrādīja kaļķa bāzes saistvielas biokompozīti, pie 100 % saistvielas lietojumā neuzrādot pat mikroskopsiki nosakāmu sēņu pieaugumu. MOC biokompozītos mikroskopiski tika konstatēts sēņu pieaugums, jo tā pH līmenis ir zemāks (MOC pH 9,76, FHL pH 11,99). MPC saistvielas biokompozīti uzrādīja viszemākos rezultātus ar vairāk nekā 80 % sēņu apaugumu, kas saistīts ar izmantoto saistvielas cietinātāju – kālija ortofosfātu, kas tiek izmantots arī kā minerālmēslojums.

6. Promocijas darbā ir izstrādāta augstas precizitātes mērierīce, ar kuru iespējams vienlaikus noteikt mitruma un temperatūras sadalījumu sienas šķēsgriezumā, kā arī izmērīt siltuma plūsmu. Iegūtie dati izmantoti  $U$  teorētisko un faktisko vērtību salīdzināšanai un mitruma migrācijas noteikšanai.
7. Izstrādātā metode dzīves cikla aprēķināšanai ļauj izmantot eksperimentāli iegūtos biokompozītu siltumvadītspējas un stiprības rezultātus, lai izveidotu modeli – funkcionālo vienību dabīgo šķiedru biokompozīta ietekmes uz vidi novērtēšanai un salīdzināšanai ar tradicionāli lietotajiem būvmateriāliem.
8. Salīdzinot ietekmi uz vidi kaļķa bāzes saistvielām, var secināt, ka veldzētā kaļķa saistviela ar metakaolīnu (FHL) uz visiem faktoriem atstāj par 12 %–55 % mazāku ietekmi nekā komerciālā hidrauliskā kaļķa saistviela. No magnija bāzes saistvielu biokompozītiem, MOC atstāj ievērojami zemāku ietekmi uz vidi nekā MPC, neraugoties uz MPC augsto stiprības un blīvuma attiecību, kas saistīts ar tā cietinātāju – kālija fosfātu, kuram ir ievērojama enerģijas un resursu ietilpība.
9. Salīdzinot ar citiem materiāliem (gāzbetonu, gāzbetonu + akmens vati, koka statņu karkasu + minerālvati), izstrādātie dabīgo šķiedru biokompozīti uzrāda 2–4 reizes zemākas emisijas un ir vienīgie CO<sub>2</sub> neitrālie materiāli, kas pierāda to samazināto ietekmi uz vidi.
10. Promocijas darba gaitā izstrādāti trīs dažādu saistvielu biokompozīti un noteiktas to īpašības. Kopumā no iegūtajiem rezultātiem par biokompozītu pielietojumu izdarīti šādi secinājumi:
  - a. kaļķa bāzes biokompozīti ir ar zemu mehānisko stiprību, vidēju ugunsreakciju, augstu bionoturību un no visiem biokompozītiem tie atstāj viszemāko ietekmi uz vidi; tie pielietojami mazstāvu apbūvē, izmantojot tradicionālo iestrādi uz vietas objektā kopā ar konstruktīvo koka karkasu;
  - b. magnija fosfāta cementa biokompozīti ir ar augstu mehānisko stiprību, taču zemu bionoturību un salīdzinoši augstāku ietekmi uz vidi, pielietojami, kad nepieciešama augsta agrā stiprība;
  - c. magnija oksihlorīda biokompozītu rezultāti pierāda, ka tiem ir vislielākais potenciāls rūpnieciskā biokompozītu ražošanas izmantošanā, jo tie uzrāda vislabāko stiprības/siltumvadītspējas/ietekmes uz vidi attiecību.

# GENERAL PRESENTATION OF THE THESIS

## Importance of the topic and problem statement

Over the last years, world's political leaders have signed a number of agreements with a commitment to reduce CO<sub>2</sub> emissions, one of which is the Paris Climate Treaty, ratified by the European Union (EU) in 2016. In order to fulfill this commitment the EU has defined a number of environmental policy objectives: Directive 2010/31/EU, which aims at reducing the CO<sub>2</sub> emissions [1] by 20 %; as well as the 2030 climate and energy framework aimed at reducing greenhouse gas emissions by 40 % and increasing energy efficiency by 27 % by 2030 [2].

Construction sector is among the industries generating the biggest amount of CO<sub>2</sub> emissions [3], [4], mainly due to the energy losses related to the heating, ventilation and air conditioning (HVAC) of insufficiently insulated buildings, as well as from the production of building materials [5], [6]. Even though greenhouse gas (GHG) is currently the most frequently mentioned environmental factor (there is a growing consensus on the need to reduce it), there are other environmental factors such as ocean and sea acidification [9], [10], eutrophication [11], and toxicity [12], [13], that should be taken into account when designing and implementing new building materials in the construction sector. The reason is the significant environmental impact of building materials, which is associated with the huge consumption of natural resources [14] — about 3000 M t/year, which is more than in any other industrial sector [15], as well as high energy and fuel consumption. In order to reduce the negative impact of those factors, it is necessary to change the building traditions in the housing industry by increasing the proportion of building materials with good thermal properties (to reduce the HVAC energy consumption in households), to use renewable natural resources for the production of building materials or focus on much more efficient use of non-renewable natural resources, and to organize less energy-intensive production of building materials to reduce the environmental impact in the production process of building materials [16], [17].

Natural fiber biocomposites is a group of building materials with low environmental impact. These materials are made of high porosity natural aggregates with a small amount of mineral binder, they are self-supporting and provide low thermal conductivity up to 0.05 W/m · K. Low environmental impacts are provided by bio-based aggregates, which consume small amount of energy in their cultivation and absorb carbon dioxide through photosynthesis, as well as low mineral binder consumption.

One of the most common materials in this group is hemp-lime biocomposite (*HLB*), it consists of by-products from the production of hemp — hemp shives (bio-based aggregate) and hydraulic lime (binder). In the process of growth hemp has accumulated CO<sub>2</sub> [18] through photosynthesis and lime in its turn has captured CO<sub>2</sub> in the carbonization process during curing, resulting in a carbon neutral or even negative final product, which has accumulated from 6.67 to 136.65 kg of CO<sub>2</sub> equiv. / m<sup>3</sup> [19]–[22]. The material also has good thermal insulation properties — from 0.05 to 0.12 W/m·K [23], excellent moisture absorption [24], [25] and acoustic properties [26], and its environmental impact is lower compared to conventional building materials [19].

The binder used in the hemp-lime biocomposite (*HLB*) (hydraulic lime) has relatively low mechanical strength, but the proportion of hemp aggregates used is relatively high. In addition,

delay in lime binder binding and hardening can be observed in *HLB*, which can be explained by natural sugars (organic retardants) present in hemp shives, which also reduces the mechanical properties of hardened mortar [27]. As a result, hemp-lime biocomposites can be used for the construction purposes only as self-supporting thermal insulation materials with the on-site laying in formwork [28].

A group of materials that can be used to replace lime in hemp-lime biocomposites and to increase their mechanical properties is magnesium-based binders. These binders are typically used together with various bio-based aggregates, such as wood [29]–[31], rapeseed stalks [32], wooden chips [33], and hemp [34], as well as other agricultural by-products [35]. The advantage of magnesium binders, in contrast to calcium binders, is their significantly better compatibility with bio-based aggregates [29]. This is due to the fact that the lime binder during the curing process creates an alkaline environment, where lignin and other organic compounds are separated from bio-based aggregates, thus slowing down the hardening of cement or lime [36].

Natural fiber biocomposites have a high potential to replace conventional building materials from both economic and ecological point of view; however, it is necessary to conduct research and develop improved biocomposites meeting the main requirements for building materials with regard to their mechanical, physical and durability properties. In order to prove the sustainability and benefits of these materials, it is necessary to conduct research in real climatic conditions and to calculate the environmental impact of these materials and compare these results with those of the conventional building materials.

## **The goal of research**

To develop natural fiber biocomposites with improved mechanical, physical and durability properties, to calculate their environmental impact by developing a method for the life cycle analysis of these materials and for comparing them with conventional building materials.

## **The tasks of research**

The following tasks were defined in order to reach the goal of the research:

1. To develop lime- and magnesium-based binders for biocomposites using waste products as active microadditives to minimize the environmental impact of the binder.
2. To study the influence of various factors (aggregate properties, type of binder, etc.) on the mechanical and physical properties of biocomposites.
3. To determine the biopersistence and reaction to fire properties of biocomposites depending on the binders used.
4. To develop a measuring system for research on biocomposite hygrothermal properties under real-life conditions and to determine simultaneously the distribution of humidity and temperature in the cross-section of the wall, as well as its thermal properties by using the developed system.
5. To develop a method, where the experimental biocomposite data is used for assessing the environmental impact of natural fiber biocomposites (including CO<sub>2</sub> emissions), as well as to compare the obtained data with those of the conventional building materials.

## Scientific novelty of the research

- A lime-based binder, which is suitable for natural fiber composites, has been developed and obtained. In this binder, lime is partially replaced with metakaolin-containing waste products to improve its strength, thereby reducing the environmental impact of the binder. It has been proved that with metakaolin-containing waste products it is possible to obtain a binder whose strength is similar with the conventional hydraulic lime binder. Namely, compressive strength is at least 10 MPa.
- A new type of low-density natural fiber biocomposites have been developed using fast-curing magnesium-based binders that can provide adequate strength at low density and thermal conductivity — around  $200 \text{ kg/m}^3$  and  $0.062 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Biocomposites have a low flame spread rating (B according to LVS EN 13501) and as high biological stability as that of conventional building materials containing bio-based aggregates.
- Natural fiber biocomposites have been studied in field conditions using a specially designed measuring system consisting of temperature, relative humidity and heat flow sensors, simultaneously measuring the distribution of humidity and temperature in the wall thickness, as well as thermal resistance of the wall. A specially developed method for calculating U values for dynamic heat flows has been applied. "Data Collection System Development Guidelines" have been developed in the framework of the National Research Program describing the selected data accumulation system, its design and component selection criteria as well as framework, operating principles of the system, and measurement methodology.
- Life Cycle Analysis — a method for calculating the life cycle of natural fiber biocomposites and comparing them with conventional materials, using compressive strength and thermal conductivity as reference points, has been developed. The method allows using experimental data for calculation, as well as comparing the material with conventional building materials.

## The practical significance of the doctoral thesis

Latvian patent P-17-77 "Multi-layered building block from bio-fibers and magnesium oxychloride cement and a method for its production" has been developed. The invention relates to the field of construction material production it can be used to manufacture various products with improved thermal insulation properties. Environmentally friendly porous material made from agricultural by-products consisting bio-fiber (hemp or flax shives, rapeseed, bamboo, reed, etc. stalks) and magnesia binders is offered. It has optimum thermal insulation properties, humidity buffering capacity and high fire resistance.

Latvian Patent P-17-86 "Accelerated curing building block from magnesium phosphate cement and bio-based aggregates and its production method" has been developed. The invention can be used to produce accelerated curing building blocks using local aggregates. A method for the production of economically advantageous building blocks using local bio-based aggregates

consisting fiber and magnesium phosphate cement is offered. It ensures accelerated curing of the blocks and sufficient strength for low-rise buildings.

The method "The production of organic composite materials from agro-based fiber and local mineral binders" has been developed in the framework of the National Research Program. This method was developed for the existing and potential producers of CO<sub>2</sub> neutral lime-hemp biocomposite, as it involves the impact of several technological factors and components on the performance of building materials.

"Proposals for updates in the LBN 002-01 regarding thermal and technical properties of natural fiber composite building materials" have been developed in the framework of the National Research Program to reduce barriers for the use of natural fiber composite materials in construction projects. LBN 002 "Thermotechnics of the envelope structures of buildings" defines thermal engineering design of building elements for building envelopes in newly built, repairable and renewable buildings with heating systems, but it is also necessary to include information on natural fiber biocomposites. This additional information will allow a much wider use of this building material of local origin, since both designers and potential customers will have much more information and it will be possible to completely integrate such material into a construction project. In accordance with the analyzed and summarized information, proposals for updating the building code with the thermo-mechanical properties of natural fiber material have been prepared.

## **Research methodology**

Tests of mechanical properties of the natural fiber biocomposites were performed on a Zwick Z100 universal testing machine, with up to 10 % relative deformations for the compressive strength (according to LVS EN 826) and until collapse for the bending strength. The thermal conductivity of the materials was determined using the LaserComp heat meter FOX600 according to the guidelines of Standard LVS EN 12667.

In order to determine the classification of materials according to their reaction to fire, the following tests were done according to the Standard LVS EN 13501-1:

- LVS EN ISO 11925-2: 2011 Reaction to fire tests. Ignitability of products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single flame source test (ISO 11925-2: 2010).
- LVS EN 13823 + A1: 2015 Reaction to fire tests for building products. Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item.

The tests of microbiological stability or bio-persistence were performed by artificially inoculating biocomposite specimens with fungal spore suspension, incubating in 75 % and 99 % RH conditions, then aging specimens in a climatic chamber, treating them with various protective agents, and performing visual assessment.

The genus of fungi, were determined by microscopic and macroscopic methods.

Life Cycle Analysis (LCA) of biocomposite was performed according to the ISO 14040/44 guidelines. Sima Pro 8 PhD LCA calculation program was used for performing calculations together with the Ecoinvent 3.0 database; the CML 2 baseline and the 100 GWP methods were used for analysis.



## **Range of research and scope of applications for the obtained results**

Research for the purposes of the Doctoral Thesis was conducted on low-density natural fiber biocomposites made from lime-based or magnesium-based mineral binders and highly porous natural fibrous aggregates, mainly hemp shives. The density of the studied biocomposite was 200 to 500 kg/m<sup>3</sup>, compressive strength — up to 1 MPa, thermal conductivity — between 0.057 and 0.110 W/m·K.

Lime-based binders used for biocomposites had a compressive strength of at least 10 MPa, and the proportion of the metakaolin-containing waste products used ranged from 10 % to 60 % of the binder mass.

The life cycle analysis was based on the problem-oriented analysis method CML2 the global warming coefficient was calculated over a period of 100 years. The environmental impact was allocated according to the principle of economic distribution.

The obtained biocomposite can be used in the building material production industry as a low-density, porous, self-supporting thermal insulation material and a material for the envelope structures of buildings.

## **The arguments put forward for the defense of the Thesis**

- By using waste products as pozzolanic additives for lime-based binders it is possible to produce binders that ensure the required strength of natural fiber biocomposites of at least 5 MPa at the same time decreasing the overall environmental impact of the material, in particular its CO<sub>2</sub> emissions.
- By producing natural fiber biocomposites with magnesium-based binders it is possible to obtain quick setting materials with improved mechanical and thermal properties ( $\lambda$  to 0.057 W/m·K), which exceed the respective indicators of conventional lime-hemp materials, as well as ensure class B fire resistance and high biological stability.
- With the developed measurement device, it is possible to determine the distribution of humidity and temperature in the cross section of the wall, and also to measure the heat flow simultaneously. The obtained data can be used to compare the theoretical and actual values of U and to determine the moisture migration.
- The developed method for the life cycle calculation allows the use of experimentally obtained results regarding thermal conductivity and strength of biocomposites to create a model for assessing the environmental impact of functional units of natural fiber biocomposites and comparing it with those of the conventional building materials.
- Lime-metakaolin or magnesium oxychloride binders enable the production of natural fiber biocomposites with negative CO<sub>2</sub> emissions, as well as with other categories of environmental impact, which are 2 to 4 times lower than those of the conventional building materials.

## Structure and length of the Doctoral Thesis

The Doctoral Thesis consists of the following parts: annotation, introduction, five main sections divided into subsections, conclusions, list of references, and eight appendices.

The Doctoral Thesis is 121 pages long and contains 75 images, 33 tables, 163 reference sources and 8 annexes.

- The first section gives an overview and analysis of the properties of existing natural fiber materials and main issues of their wider use.
- The second section describes the materials used and research methods.
- The third section focuses on the developed improved lime-based binder mixtures as well as new types of magnesium-based binder mixtures.
- The fourth section is devoted to the development of natural fiber biocomposites using the improved binder as well as the determination and analysis of properties of the natural fiber biocomposites.
- The fifth section is devoted to the development and analysis of the methodology for calculating the life cycle of natural fiber biocomposites.

### Approbation of the obtained research results at international conferences and list of publications

1. Sinka, M., Sahmenko, G., Bajare, D., Korjakins, A., Van den Heede, P., De Belie, N. Comparative life cycle assessment of magnesium binders as an alternative for hemp concrete. *Resources, Conservation & Recycling, Elsevier publishing*, Vol. 133C, pp. 288–299, 2018.
2. Sinka, M., Korjakins, A., Bajare, D., Zimele, Z., Sahmenko, G. Bio-based construction panels for low carbon development. *Energy Procedia*, Vol. 147, 220–226, 2018.
3. Sinka, M., Bajare, D., Gendelis, S., Jakovics, A. In-situ measurements of hemp-lime insulation materials for energy efficiency improvement. *Energy Procedia*, Vol. 147, 242–248, 2018.
4. Namsone, E., Korjakins, A., Šahmenko, G., Šinka, M. The Environmental Impacts of Foamed Concrete Production and Exploitation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 251, pp. 20–29, ISSN 1757-8981, e-ISSN 1757-899X, doi:10.1088/1757-899X/251/1/012029.
5. Obuka, V., Sinka, M., Nikolajeva, V., Kostjukova, S., Lazdina, L., Klavins, M. Sapropeľ and Lime as Binders for Development of Composite Materials. 25th European Biomass Conference and Exhibition, 12th to 15th June 2017, Stockholm, Sweden.
6. Šinka, M., Šahmenko, G., Korjakins, A., Bajare, D. Lime-Hemp Concrete (LHC) Enhancement Using Magnesium Based Binders. *Proceedings of the 2nd International Conference on Bio-Based Building Materials*, France, Clermont-Ferrand, 21–23 June 2017, Paris: RILEM Publications S.A.R.L., 2017, 238–245, e-ISBN 978-2-35158-192-6.
7. Obuka, V., Šinka, M. Sapropeľa-kaļķa saistvielas izmantošanas potenciāls kaņepju betona kompozītmateriālos. *Konferences "Kūdra un sapropelis – ražošanas, zinātnes un vides sinerģija resursu efektīvas izmantošanas kontekstā" rakstu krājums*, Rīga, Latvia, January 31, 2017. Rīga: University of Latvia 2017, pp. 101–103. ISBN 978-9934-18-207-5.

8. Obuka, V., Lazdiņa, L., Šinka, M., Nikolajeva, V., Kostjukova, S. Sapropeļa kā saistvielas un kaņepju, koksnes šķiedras, koksnes vates kompozītmateriālu mikrobioloģiskā noturība. *Konferences "Kūdra un sapropelis – ražošanas, zinātnes un vides sinerģija resursu efektīvas izmantošanas kontekstā" rakstu krājums*, Rīga, Latvia, January 31, 2017. Rīga: University of Latvia, 2017, pp. 89–91. ISBN 978-9934-18-207-5.
9. Vaganov, V., Kireev, A., Avdeev, S., Šahmenko, G., Šinka, M. Prospects for Effective Use of Dolomite in Concrete Compositions. *Construction Science*. No.19, 2016, 27–32, ISSN 1407-7329, e-ISSN 2255-8551, doi:10.1515/cons-2016-0008.
10. Sinka, M., Sahmenko, G., Korjamins, A., Radīņa, L., Bajare, D. Hemp Thermal Insulation Concrete with Alternative Binders, Analysis of Their Thermal and Mechanical Properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 96 (1), 1–10, ISSN 1757-8981, e-ISSN 1757-899X, (SCOPUS Data Base).
11. Obuka, V., Sinka, M., Klavins, M., Stankevica, K., Korjamins, A. Sapropeļ as a Binder: Properties and Application Possibilities for Composite Materials. *Proceedings of 2nd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies"*, Latvia, Rīga, 30 September – 2 October 2015, Rīga: 2015, 1–10, (SCOPUS).
12. Sinka, M., Radina, L., Sahmenko, G., Korjamins, A., Bajare, D. Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies. *Proceedings of the 1st International Conference on Bio-based Building Materials*. France, Clermont-ferrand, 22–24 June 2015, ISBN PRO 99: 978-2-35158-154-4.
13. Pleiksnis, S., Sinka, M., Sahmenko, G. Experimental justification for sapropel and hemp shives use as a thermal insulation in Latvia. *5th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*, Latvia, Rezekne, 18–20 June 2015 (SCOPUS)
14. Sinka, M., Sahmenko, G., Korjamins, A. Mechanical Properties of Pre-Compressed Hemp-Lime Concrete. *Proceedings of the 4th international conference "Advanced Construction 2014"*, Kaunas, Lithuania, 9–10 October 2014. Kaunas: 2014, ISSN 2029-1213.
15. Sinka, M., Sahmenko, G., Korjamins, A. Thermal insulation materials from hemp with different binders. *Rīga Technical University 55th International Scientific Conference*, Section "Construction Science", Digest, Latvia, Rīga, 18 October 2014. Rīga: RTU, 2014, ISBN 978-9934-10-614-9.
16. Sinka, M., Sahmenko, G., Korjamins, A., Upeniece, L. Artificial hydraulic lime binder and its impact on properties of hemp-lime compositions. *International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies"*, Latvia, Rīga, 8 November 2013. Rīga: RTU, 2013, ISBN 978-9934-10-485-5.
17. Sinka, M., Sahmenko, G., Sustainable Thermal Insulation Biocomposites from locally available Hemp and Lime. *4th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*. Proceedings, Vol.1, Latvia, Rezekne, 20–22 June 2013, Rezekne: RA, 2013, 73–77, ISSN 1691-5402, (SCOPUS).
18. Sinka, M., Sahmenko, G. Hydraulic lime from locally available raw materials. *54th student scientific and technical conference*. Proceedings, Vol. 1, Latvia, Rīga, 2013. Rīga: RTU, 2013, ISBN 978-9934-10-509-8.
19. Sinka, M., Korjamins, A., Sahmenko, G. The use of hemp shives with hydraulic lime binder in insulation materials. *13th International Scientific Conference "Sustainable*

*business under changing economic conditions"*. Latvia, Riga, 30 March 2012, 305–312, ISSN 1691-6069.

### **List of Patents**

1. Sinka, M., Bajare, D., Sahmenko, G., Korjakins, A., Siskins, A. Bio-fiber and magnesium oxychloride cement multi-layer construction panel manufacture method, Latvian patent, P-17-77, will be published 20.06.2019.
2. Sinka, M., Bajare, D., Sahmenko, G., Korjakins, A., Siskins, A. Magnesium phosphate cement and bio-based filler fast-curing construction block and its method of manufacture, Latvian patent, P-17-86, will be published 20.06.2019.

# 1. LITERATURE REVIEW

Natural fiber biocomposites for thermal insulation purposes are materials with a wide range of potential application and they comply with the modern requirements – low environmental impact and high energy efficiency. They are made from organic fiber aggregates, such as hemp [37]–[39] or flax shives [25], [40], rapeseed stalks [32], [41] or straw [16], [42], reeds, etc., and mineral binders – lime, hydraulic lime, cement, etc. One of the most commonly used natural fiber biocomposite materials is the hemp-lime biocomposite (HLB). This composite material is made from the internal part of hemp straw – hemp shives, which is a by-product of hemp fiber production, as an aggregate and hydraulic lime as a binder [43]. The natural fiber biocomposites are mainly used as a self-supporting wall insulation material, which is embedded in a load-bearing wooden frame.

Although in France this type of construction materials has been used already since the late 1980s [44], now it has become popular in other European countries, such as the UK, Ireland and Poland [45]. The properties of natural fiber biocomposites correspond to the demands of the EU Regulation N305/2011 [46], which sets out 7 essential requirements for construction works and building materials:

- Mechanical strength and stability. It can be used as a self-supporting insulating material, it does not require additional layers of the material, and plaster can be applied directly to the surface. It has a much higher mechanical resistance compared to conventional thermal insulation materials [47].
- Fire resistance. Unlike other natural fiber insulating materials, belonging to the fire reaction class E [48], a mineral binder can ensure the fire resistance class B (EN 13501-1) [49].
- Hygiene, health and environment. The natural fiber biocomposites do not contain volatile organic compounds (VOCs) or other harmful substances. They have a high humidity buffering capacity that improves indoor air quality by preventing the growth of fungi and mold that can lead to allergic diseases [50], [51].
- The materials have a reduced environmental impact due to the significant quantity of CO<sub>2</sub> emissions captured in the bio-aggregate, and their production consumes less energy than other equivalent building materials [19].
- Safety. Biocomposites are not used as a load-bearing material therefore there is no assessment with regard to these basic requirements.
- Sound insulation. The materials have a porous structure at a relatively high density, which makes the natural fiber biocomposites absorb and reflect the sound, providing better sound insulation than the conventional heat insulation materials of the same thickness [26].
- Energy saving and thermal insulation. Natural fiber biocomposites have relatively good thermal insulation properties –  $\lambda$  below 0.06 (W / m · K), which makes them equivalent to other insulation materials [49], [52].

- Sustainable use of natural resources. Several researchers have demonstrated that the entire production process of natural fiber biocomposites attracts more CO<sub>2</sub> than is emitted into the atmosphere because of the absorption of carbon dioxide in the hemp growth process. The lime also attracts CO<sub>2</sub> in the carbonization process. The amount of stored carbon dioxide is from 6.67 kg to 136.65 kg CO<sub>2</sub> ect. / m<sup>3</sup> [19]–[22].

The main disadvantage of the hemp-lime biocomposites is their relatively low mechanical strength, which determines their use – they are used only as self-supporting thermal insulation materials, mainly in the low-rise buildings [28]. As a negative feature can also be regarded the fact that lignin, sugars and other organic compounds released from the aggregate, especially in the alkaline medium of a binder, delay the bonding of hydraulic lime, which reduces the early strength of the biocomposite [27], [36].

The magnesium-based binders can potentially be used to replace lime in natural fiber biocomposites and to increase their strength. These binders are commonly used in combination with various organic aggregates such as wood [29]–[31], rapeseed stalks [32], wooden pulp [33], hemp [34], as well as other agricultural waste materials [35]. Compared to calcium-based binders, the advantage of magnesium-based binders is their significantly better compatibility with organic aggregates [29].

In the framework of the Doctoral Thesis, the most suitable magnesium and calcium-based binders have been sought, which, together with organic aggregates, could create natural fiber biocomposites corresponding to the modern requirements. Namely, with improved mechanical, physical and durability properties. In order to prove that these materials are sustainable and have several advantages, research has been carried out in real climatic conditions, and the environmental impact of these materials has been calculated and compared with the conventional building materials.

## 2. RESEARCH METHODS FOR NATURAL FIBERS

Testing of the mechanical properties of natural fiber biocomposites was performed with *Zwick Z100* universal testing machine. The pressure was applied at a speed of 10 mm / min, recording a force-deformation diagram during the process. The compressive strength test was performed with relative strength deformations up to 10 % (according to LVS EN 826), bending strength – up to the collapse. For the testing of mechanical properties of binders in accordance with LVS EN 459, specimens (prisms with the dimensions 160 mm × 40 mm × 40 mm) were prepared and used.

Thermal conductivity of the materials was determined using *LaserComp* heat meter *FOX600* calibrated according to *NIST* systems. Specimens were tested in accordance with Standard LVS EN 12667 guidelines. Temperature settings were  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , upper plate  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lower plate  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

In the framework of the Doctoral Thesis, the following tests were applied in order to determine the classification of natural fiber biocomposites by their reaction to fire in accordance with Standard LVS EN 13501 "Classification of building structures and building elements according to their reaction to fire":

- LVS EN ISO 11925-2: 2011 Reaction to fire tests. Ignitability of products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single flame source test (ISO 11925-2: 2010).
- LVS EN 13823 + A1: 2015 Reaction to fire tests for building products. Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item.

Additional reaction of materials to fire was determined according to Standard LVS ISO 5660-1: 2015 "Fire reaction tests. Cone calorimeter method" to classify materials with *Nordtest* project 1526-01 methodology [124].

Microbiological stability tests were performed in 3 stages, the specimens of materials were artificially inoculated with 6 different types of fungal spores, incubated in 75 % and 99 % RH conditions, then aged in a climatic chamber and treated with various protective agents. In all three stages visual assessment was performed according to the following scale [125].

Table 2.1

Expert rating scale for the growth of fungi colonies

Visual assessment	Characterization	Color in the scale
0	No fungi growth has been detected on a microscopic level	
1	Fungi growth has been detected on a microscopic level	
2	An increase in fungi growth that covers the whole surface of the specimen has been detected on a microscopic level	
3	Fungi growth has been detected on a macroscopic level (visible to the naked eye)	
4	Macroscopic growth, covering > 80 % of the surface of the material	

In the framework of the Doctoral Thesis, a system has been developed in order to determine the thermal transmittance and the moisture migration of different structures in real-life conditions. The operation of this system is based on measurements from temperature sensors attached to surfaces (Fig. 2.1, H6 and H7) and from the heat flow sensor (Fig. 2.1, q1). Humidity

measurements were obtained from the sensors of relative humidity placed in the walls with different thickness.

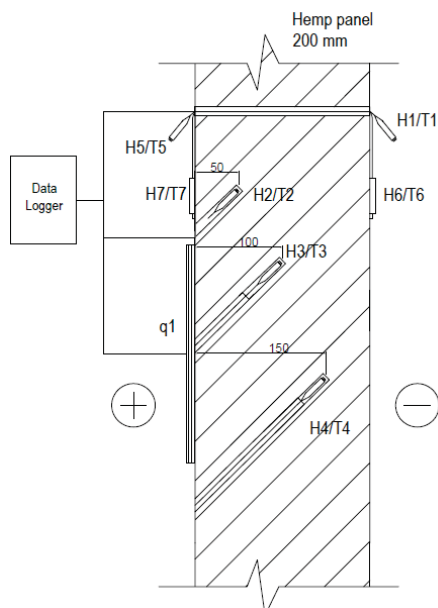


Fig 2.1. Principle location of the heat flow and surface temperature sensors.

The methodology for calculating the U value developed by the Laboratory for Mathematical Modelling of Environmental and Technological Processes of the University of Latvia has been used for the data processing in the framework of the Doctoral Thesis research as it allows the use of experimental data collected from the measurements in a short period of time [126]. The method is based on the one-dimensional calculation of heat transfer coefficient using the heat flow density on a warmer surface and the temperature difference of the surfaces [127]. The method has been integrated and used with *DataProc* program [46].

The aim of the Doctoral Thesis is to use LCA to assess the environmental impact of natural fiber biocomposites. The biocomposite Life Cycle Analysis (LCA) in accordance with the guidelines of Standard ISO 14040/44 has been carried out in the following stages of research:

1. Defining the target and scope.
2. Inventory analysis.
3. Impact assessment.
4. Interpretation of results.

The calculation has been done using *Sima Pro 8* LCA calculation program with the *Ecoinvent 3.0* [144] database. *CML 2 baseline* method has been used for results analysis [145]. During results analysis, each stage of the production cycle was considered separately in order to assess the effects of its separate sections. The environmental damage caused by emissions was determined using appropriate equivalency factors for the selected compounds in several impact categories: potential of global warming, acidification, eutrophication, and tropospheric ozone and photochemical potential, stratospheric ozone depletion potential and ecotoxicity potential.



### 3. DESCRIPTION OF RAW MATERIALS USED IN RESEARCH

In the framework of the Doctoral Thesis eight different types of hemp shives coming from the largest processors of hemp fiber in Latvia were used. These hemp shives have different granulometric composition, fiber content, dustiness, etc., which mainly depend on the type of processing. The selected processors were agricultural holding "Rudeņi" from Jelgava region (RM, RL and RS shives), hemp and linen processing company "Zalers" from Krāslava region (ZM and ZL shives), agricultural holding "Lieplejas" from Salacgrīva region (LM and LS shives), and Agriculture Science Center of Latgale "Latgales lauksaimniecības zinātnes centrs" from Viļāni region (EE shives). RM, ZM, LM – small hemp shives with a fraction of 0.63 mm–10 mm – at least 80 %; RL, ZL, LL – large hemp shives with a fraction > 10 mm – more than 15 %. RS – hemp shives with fiber – quantity exceeds 6 %. EE – experimental shives, retted on the field for one season (to separate fiber from pulp), dust < 1 %.

Two air-drying lime binders were used for the research purposes, their chemical composition is shown in Table 3.1: hydrated lime CL90 S ("*Lhoist Bukowa*", Poland), dolomitic quicklime DL 60 ("*Saulkalne*", Latvia).

Table 3.1

Composition and main properties of the lime binders used

	CL90 S	DL 60 Q
CaO + MgO	≥ 90%	≥ 60%
MgO	≤ 5%	≤ 30%
CO <sub>2</sub>	≤ 4%	≤ 21%
SO <sub>3</sub>	≤ 2%	≤ 2%
Active lime	≥ 80%	≥ 60%
Particle sizes		
Mass of residues on 0.2 mm sieve	≤ 2%	≤ 1.5%
Mass of residues on 0.09 mm sieve	≤ 7%	≤ 15%

Metakaolin used for the purposes of research is a waste product from the production of expanded glass granules ("*Stiklaporas*", Lithuania). Kaolinic clays, used as an anti-caking agent, are calcined in a kiln at 800 °C to 850 °C for 40–50 minutes [128].

In the framework of the Doctoral Thesis, two types of waste products, which are obtained during the processing of fluorescent lamps, have been used: lead-consisting Pb glass and borosilicate glass ("*Lampu Demerkurizācijas Centrs*", Latvia) [131].

Two types of magnesium oxides were used in the research. Caustic magnesium oxide CCM RKMH-F burned at 800 °C ("*RHI AG Ltd*", Austria) with the MgO content of at least 73 % (MgO A.) was used for the production of magnesium oxychloride cement (MOC). Burnt magnesium oxide M-76 burnt at 1700 °C ("*Integra Ltd*", Slovakia) with MgO content of at least 85 % (MgO S) was used for the production of magnesium phosphate cement.

Two types of soluble acidic phosphates, potassium and ammonium phosphates were used for the production of magnesium phosphate cements. The mono-potassium phosphate (MKP)

used is mineral fertilizer 0-52-35 (N-P-K proportion) with  $P_2O_5$  content at least 52.1 % ("*Praton SA*"). The used monoammonium phosphate (MAP) is mineral fertilizer 12-61-0 ("*Haifa Ltd.*"). The following components are necessary for the production of magnesium oxychloride cement:  $MgCl_2$ , hardener – magnesium chloride hexahydrate  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  with  $MgCl_2$  content 47 % (Germany).

## 4. EXPERIMENTAL PART

### 4.1. Development of binders suitable for natural fiber biocomposites

#### 4.1.1. Lime-based binders

During the research process of the Doctoral Thesis the lime-based hydraulic binding agent was developed by replacing 10 % –70 % of air drying lime binder with hydraulic additives – metakaolin (MK), lead-consisting lamp glass (PG), and borosilicate lamp glass (BG) (Table 4.1). The water / binder ratio (W / S) for all specimens was constant – 2:3. The ratio of aggregate and hydraulic binder for all specimens was 2:1.

Table 4.1

Calcium lime composition and mechanical strength test results

Composition of mix	Raw material (part of the mass unit)				Lime/puzzolan ratio %	Density, kg/m <sup>3</sup>	Compressive strength $F_c$ , MPa	Bending strength $F_m$ , MPa
	CL90	MK	PG	BG				
CL-0	1.0	-	-	-	0 %	1590	1.18	0.12
CL-MK-1	0.9	0.1	-	-	10 %	1623	4.55	1.05
CL-MK-2	0.8	0.2	-	-	20 %	1668	7.87	1.21
CL-MK-3	0.7	0.3	-	-	30 %	1712	11.55	1.56
CL-MK-4	0.6	0.4	-	-	40 %	1698	12.30	1.49
CL-MK-5	0.5	0.5	-	-	50 %	1657	12.15	1.20
CL-MK-6	0.4	0.6	-	-	60 %	1645	8.54	1.00
CL-MK-7	0.3	0.7	-	-	70 %	1622	4.45	0.80
CL-PG-1	0.9	-	0.1	-	10 %	1856	4.05	1.25
CL-PG-2	0.8	-	0.2	-	20 %	1901	5.04	1.22
CL-PG-3	0.7	-	0.3	-	30 %	1921	5.21	1.08
CL-PG-4	0.6	-	0.4	-	40 %	1903	4.32	0.95
CL-PG-5	0.5	-	0.5	-	50 %	1867	4.17	0.87
CL-BG-1	0.9	-	-	0.1	10 %	1825	3.89	1.28
CL-BG-2	0.8	-	-	0.2	20 %	1887	5.02	1.33
CL-BG-3	0.7	-	-	0.3	30 %	1905	4.87	1.42
CL-BG-4	0.6	-	-	0.4	40 %	1845	4.63	1.25
CL-BG-5	0.5	-	-	0.5	50 %	1893	2.87	0.77

After 3 days of setting in the molds, the specimens were demolded and further stored in laboratory conditions at 20 °C-23 °C. The reference composition (CL-0), made from air-drying lime without hydraulic additives, after preparation was set under laboratory conditions with a relative air humidity of 40 % -50 %. The setting process of other specimens took place under high humidity conditions with 95 % to 99 % RH. According to the published research results, such curing conditions are considered to be optimal for the hydraulic lime [95].

The compressive strength of the reference specimen (CL-0) after the 28-day hardening reached 1.18 MPa (Table 4.1). When replacing a lime binder with meta-golden hydraulic additives by 10 %-40 %, the compressive strength of the specimens after 28 day hardening increased accordingly from 4.6 MPa to 12.3 MPa. By increasing the amount of metakaolin to 50 %, it decreases slightly to 12.1 MPa, while increasing the metakaolin content to 70 %, the compressive strength decreases significantly to 4.5 MPa after 28 days of hardening (Table 4.1).

The bending strength of the lime binder without added hydraulic additives is low – only 0.12 MPa. Adding 10 % of the metakaolin additive increases it significantly to 1.05 MPa. Proportionally increasing the amount of additive up to 30 %, the strength increases up to 1.56 MPa. By increasing the amount of metakaolin from 40 % to 70 %, the bending strength reduces to 0.80 MPa.

The optimum percentage of metakaolin for obtaining hydraulic binder from a calcium lime with maximally high mechanical properties corresponding to NHL5 was 40 % – this ratio was chosen for further biocomposite research.

Replacing calcium lime binder with lead-containing hydraulic additive by 10 % -50 %, the compressive strength of specimens after 28 day hardening ranged from 4.05 MPa to 5.21 MPa, reaching the highest strength at 30 % of glass content. With the bending strength ranging from 0.87 MPa to 1.25 MPa, the highest strength has been achieved at 10 % of glass additive content (Table 4.1). The optimal amount of additive is 20 % -30 %.

The use of a borosilicate glass hydraulic additive resulted in the highest compressive strength at 20 % – 5.02 MPa, bending strength at 30 % – 1.42 MPa. By adding 50 % of the additive, the strength indicators decrease sharply to 2.87 MPa compressive strength and 0.77 MPa bending strength (Table 4.1).

#### 4.1.2. Magnesium-based binders

Magnesium oxychloride cement (MOC) was made from caustic MgO A (see Section 3) and magnesium chloride hexahydrate. The amount of MgO, which was used to produce magnesium oxychloride cement, was not changed (Table 4.2), but MgCl<sub>2</sub> solution was added from 0.50 to 0.93 ratio with regard to the amount of the MgO. MgCl<sub>2</sub> solution with a density of 1.2 g / cm<sup>3</sup> was obtained by mixing magnesium chloride hexahydrate with water in a 1: 1 ratio by weight.

Table 4.2

Magnesium oxychloride compositions and mechanical strength test results

Composition	Raw material (part of mass unit)		MgCl <sub>2</sub> / MgO	W/B	Density, kg/m <sup>3</sup>	Compressive strength <i>F<sub>c</sub></i> , MPa	Bending strength <i>F<sub>m</sub></i> , MPa
	MgO, g	MgCl <sub>2</sub> sol. 1:1					
OX-1	1.0	0.93	0.47	0.32	2100.0	29.40	5.88
OX-2	1.0	0.83	0.42	0.29	2050.0	39.20	7.84
OX-3	1.0	0.75	0.38	0.27	2015.7	50.40	10.08
OX-4	1.0	0.68	0.34	0.25	2070.6	60.90	8.84
OX-5	1.0	0.60	0.30	0.23	2092.3	48.19	9.64
OX-6	1.0	0.50	0.25	0.20	2142.3	50.46	9.02
OX-7	1.0	0.50	0.25	0.33	2047.7	24.57	4.40
OX-8	1.0	0.60	0.30	0.29	2039.5	22.81	3.83
OX-9	1.0	0.60	0.30	0.36	1999.1	18.29	3.21
OX-10	1.0	0.50	0.25	0.47	2055.9	18.75	4.62

The ratio of aggregate and magnesium oxychloride cement was constant (2:1) for the production of all compositions. Water / binder ratio was variable (see Table 4.2). After the insertion into the molds, the magnesium oxychloride specimens were covered. After the setting for 2 days, they were demolded and stored at a temperature 20 °C-23 °C and relative air humidity of 40 % -50 %. Testing took place after 28 days of hardening.

The compressive strength increased from 50.5 MPa to 60.9 MPa, with the W/B ratio increasing from 0.20 to 0.25. With the W/B ratio reaching 0.29, the strength decreased to 39.2 MPa. At W/B ratio 0.47, the compressive strength was 18.8 MPa (Table 4.2). A similar tendency was observed in the bending strength. It increased to 10.1 MPa at W/B ratio 0.27, with the strength decreasing to 3.2 MPa at a further increase in the W/B ratio.

The increase of compressive strength was observed when MgO/MgCl<sub>2</sub> ratio decreased to 0.34, reaching 60.9 MPa. With further reduction of the ratio, the compressive strength also decreased (Table 4.2). W/B ratio 0.25 and MgO/MgCl<sub>2</sub> ratio 0.34 were adopted as optimal for further biocomposite research purposes.

Magnesium phosphate cement (MPC) is made from burnt MgO S and hardener – potassium phosphate or ammonium phosphate (see Section 3). For the tests on magnesium phosphate cement composition, various hardener / MgO ratio ranging from 0.6 to 1.0 and water / binder ratio ranging from 0.3 to 0.39 (Table 4.3) were used. The ratio of aggregate and magnesium phosphate cement was constant (2:1) for the production of all compositions. Specimen production and setting procedure were analogous to those of the magnesium oxychloride cement.

When comparing magnesium phosphate cements, it can be seen that potassium phosphate cement generally shows higher compressive strength (by 5 %-41 %) and higher density (by 6 %-13 %) (Table 4.3) than ammonium phosphate cement. Ammonia gas has been released during the setting process of ammonium phosphate cement [106], [107], which is enclosed in the pores, thus reducing the density and strength of the material. The highest compressive strength for the potassium phosphate cement was at the hardener / binder ratio 0.80, for the ammonium phosphate cement – at 0.6 accordingly. Composition KM-3 was chosen for further biocomposite research.

Table 4.3

Composition of magnesium phosphate cement and mechanical strength test results

Composition	Raw material (part of mass unit)				Density, kg/m <sup>3</sup>	Compressive strength $F_c$ , MPa	Bending strength $F_m$ , MPa
	MgO	KPO	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O			
KM-1	1.0	0.8	-	0.60	2046.9	47.9	7.0
KM-2	1.0	0.8	-	0.70	1996.1	40.7	5.3
KM-3	1.0	0.8	-	0.50	2082.0	52.1	8.9
KM-4	1.0	0.9	-	0.57	2066.4	50.6	7.7
KM-5	1.0	1.0	-	0.60	2074.2	50.6	7.9
KM-6	1.0	0.7	-	0.51	2081.6	47.3	6.8
KM-7	1.0	0.6	-	0.48	2109.4	44.3	7.0
KM-8	1.0	0.5	-	0.45	2069.8	42.1	6.4
AM-1	1.0	-	0.8	0.60	1929.7	29.6	7.7
AM-2	1.0	-	0.8	0.70	1816.4	26.1	6.4
AM-3	1.0	-	0.8	0.50	1867.2	39.6	9.5
AM-4	1.0	-	0.9	0.57	1829.5	36.7	8.3
AM-5	1.0	-	1.0	0.60	1820.3	30.1	6.6
AM-6	1.0	-	0.7	0.51	1830.4	44.3	9.3
AM-7	1.0	-	0.6	0.48	1835.9	44.9	9.3
AM-8	1.0	-	0.5	0.45	1803.0	40.0	8.4

## 4.2. Mechanical and thermal properties of natural fiber biocomposites

The binder for magnesium oxychloride biocomposites (MOC) has been produced according to the results obtained in Section 4.1.,  $MgCl_2/MgO$  ratio was 0.34,  $MgCl_2$  solution was 1:1 with water. The specimens were produced using different amounts of  $MgO$ , ranging from 0.5 to 1.5 with regard to the amount of shives.

Sampling methodology – hemp shives were mixed with a part of the total amount of water; binder, which was pre-mixed in a dry form, was added and then magnesium chloride salt solution or water was added. After 2 days, the specimens were demolded and aged under laboratory conditions at  $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  and  $40\text{ \%} \pm 10\text{ \% RH}$  for 28 days.

Table 4.4

MOC biocomposite compositions and test results

Compos.	Raw material (part of mass unit)				A/B	Density, $\text{kg/m}^3$	Compres. strength 10%, MPa	Compres. strength perp., MPa	Bending strength, MPa	Compres. strength collapse, MPa
	Hemp shives	Water for shives	MgO	$MgCl_2$ , solution (1:1)						
MOC-1	1.00	1.25	1.50	1.00	0.50	416.18	0.71	0.74	0.35	0.53
MOC-2	1.00	1.25	1.05	0.70	0.71	357.14	0.37	0.36	0.16	0.30
MOC-3	1.00	1.25	0.75	0.50	1.00	252.79	0.20	0.06	0.05	0.13
MOC-4	1.00	1.25	0.50	0.33	1.50	214.34	0.16	0.14	0.02	-

Magnesium oxychloride biocomposite compressive resistance is summarized in Table 4.4. In Fig 4.1. the compressive strength / deformation diagrams are shown parallel and perpendicular to the direction of laying.

From these diagrams it can be concluded that biocomposites can be divided into 3 groups depending on the amount of binder:

1. MOC biocomposites with low strength binder content (A/B 1.50) – mechanical properties are similar to the strength of unrelated aggregates (shives), high deformability at low load because the binder is only on the surfaces of the shives, interconnecting the shives, but it does not create a rigid binding structure.
2. MOC biocomposites with medium strength binder content (A/B 0.71) – deformations do not increase only in linearly, transition of the elastic deformations in plastic deformations can be observed as well. This is due to the fact that the aggregates are coated with several layers of binder.
3. MOC biocomposites with high strength binder content (A/B 0.50) – aggregates are immersed in the binder, the binder forms a stiff grid. Its collapse can be clearly observed applying compressive strength perpendicularly to the laying direction.

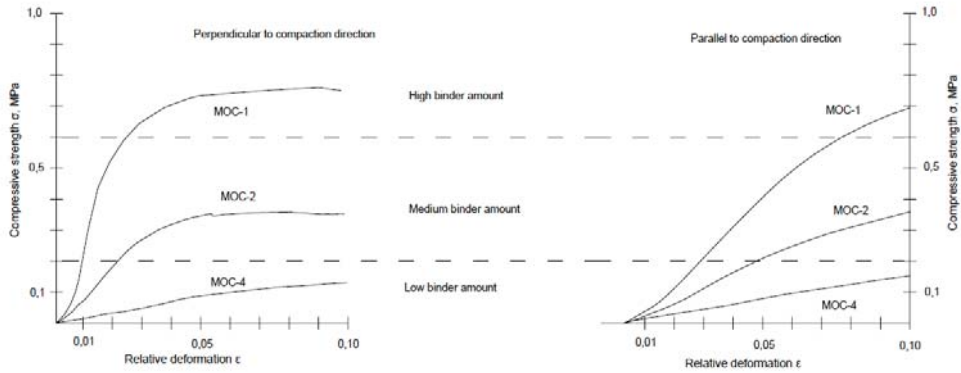


Fig. 4.1. The compression curves characteristic for the MOC materials (parallel and perpendicular to the direction of compaction).

By increasing the aggregate / binder ratio from 0.50 to 0.71, the MOC density decreases by 14 %, mechanical strength – by 48 % (Table 4.4). By increasing the aggregate / binder ratio from 0.71 to 1.50, the MOC density decreases by 40 %, mechanical strength – by 56 %. In general, the strength depends on the A/B ratio, but this ratio is not proportional (Fig. 4.1). Mechanical properties of magnesium phosphate and hydraulic lime biocomposites are shown in Table 4.5.

Specimens for thermal conductivity tests were made analogously to the described guidelines with dimensions 350 mm × 350 mm × (80-100) mm. After demolding the specimens were aged in laboratory conditions at a temperature of 20 °C ± 2 °C and 40 % ± 10 % RH until the mass stabilization. Specimen preparation formulations used were analogue to those used in Section 4.1, thus the density, thermal conductivity and mechanical strength of specimens can be compared simultaneously (see Table 4.5).

Table 4.5

#### Mechanical and physical properties of biocomposites

Binder group	Composition	Density, kg/m <sup>3</sup>	Thermal conductivity, W/m·K	Compressive strength, MPa
MPC	MPC-1	414.86	0.087	0.823
	MPC-2	359.25	0.078	0.409
	MPC-3	249.81	0.062	0.157
	MPC-4	211.16	0.057	0.098
MOC	MOC-1	416.18	0.092	0.709
	MOC-2	357.14	0.081	0.367
	MOC-3	252.79	0.072	0.200
	MOC-4	214.34	0.063	0.155
FHL	FHL-1	488.63	0.103	0.435
	FHL-2	352.54	0.079	0.111
	FHL-3	265.81	0.064	0.071
	FHL-4	223.35	0.062	0.062

Viewing the results in a graphical form (Fig. 4.2), it can be concluded that in the selected density range from 250 kg/m<sup>3</sup> up to 450 kg/m<sup>3</sup> the density / thermal conductivity ratio is linear.

Therefore, the research results confirm findings of other authors, such as the Cerezo study [26], where in the density range from 300 kg/m<sup>3</sup> up to 520 kg/m<sup>3</sup> this ratio was linear, also the linear trend curve equation differs only by 0.0029 (Fig. 4.5):

$$y = 0.0002x + 0.0194 \quad \text{linear trend curve equation in Cerezo study [26];}$$

$$y = 0.0002x + 0.0230 \quad \text{linear trend curve equation for the research conducted within the Doctoral Thesis (Fig. 4.4).}$$

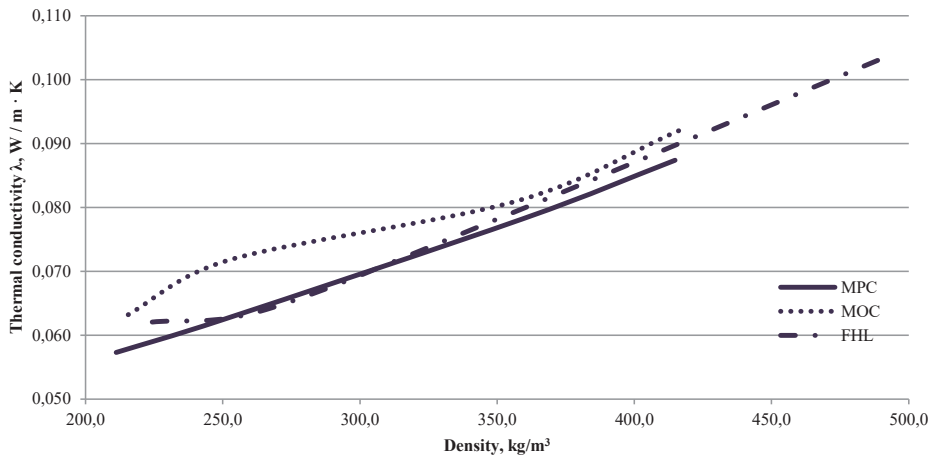


Fig. 4.2. Thermal conductivity / density correlation.

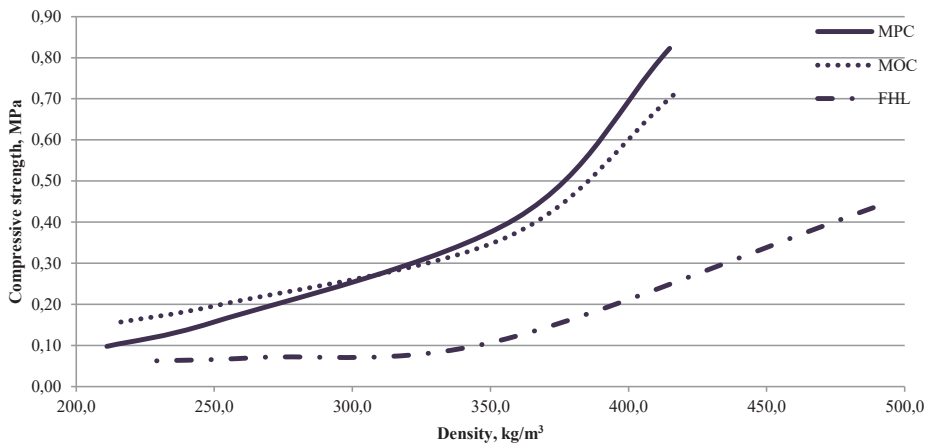


Fig. 4.3. Density / compressive strength correlation.

Thus, it can be concluded that the thermal conductivity of the obtained natural fiber biocomposites is appropriate and similar for all binders at a given density. The MOC and MPC binder biocomposites have an equally high strength; therefore, their compressive strength and density ratio at 350 kg/m<sup>3</sup> is about 0.4 MPa, the FHL strength at an equivalent density is about 0.1 MPa (Fig. 4.3).



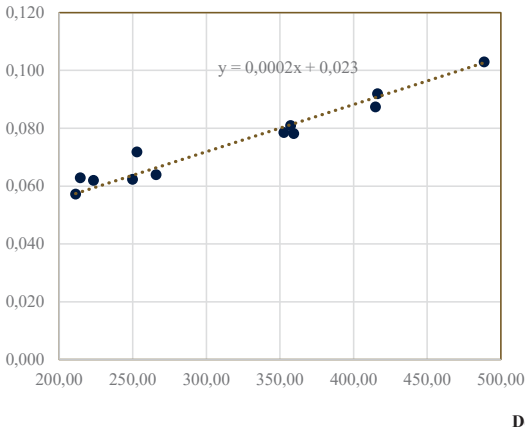


Fig. 4.4. Thermal conductivity / density correlation and linear trend equation.

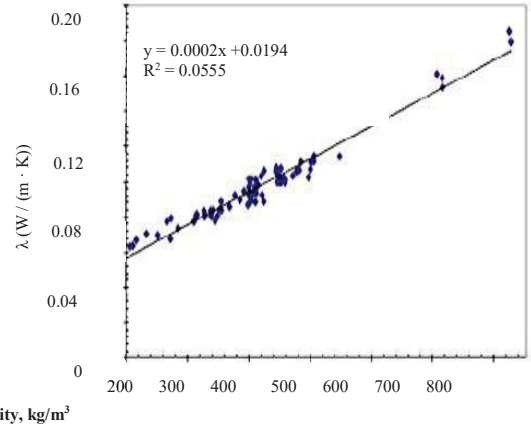


Fig. 4.5. Thermal conductivity / density correlation and linear trend equation from the Cerezo study [26].

### 4.3. Fire resistance of biocomposites

#### *Fire reaction according to Standards LVS EN ISO 11925 and LVS ISO 5660-1*

Several tests were performed to determine the material's reaction to fire and to compare them with each other. The first series of tests consisted of small-scale tests according to Standard LVS EN ISO 11925 and Standard LVS ISO 5660-1. The specimens from all three selected types of biocomposite with MOC-1, MPC-2 and FHL-2 compositions were tested. First, a test was performed according to Standard LVS EN ISO 11925-2 "Part 2: Single-flame source test". According to this test classification of all materials correspond to Class B (according to Standard LVS EN 13501), since none of the three compositions showed fire (Fig 4.7), 150 mm long flame path was not reached, also no smoke or flaming drops were observed. Therefore, additional tests were performed according to Standard LVS ISO 5660- 1 in order to compare materials with each other and with other materials.

According to the standard, specimens with dimensions of 100 mm × 100 mm, thickness up to 80 mm was prepared. Testing was carried out in a cone calorimeter with a heat output 50 kW/m<sup>2</sup>. With this test the time of ignition of biocomposites, the maximum heat release rate reaching time and the maximum heat release rate was determined (Fig. 4.6). The ignition time was recorded only for FHL at 61 s, ignition was not observed in other specimens. HRR – heat release rate – reached its maximum for FHL specimens in 95 s, for magnesium specimens this period of time was 45 %–50 % longer. The maximum capacity for FHL specimens was also higher – 47.61 kW/m<sup>2</sup>, MPC – 30.23 kW/m<sup>2</sup>, and MOC – 24.12 kW/m<sup>2</sup>.

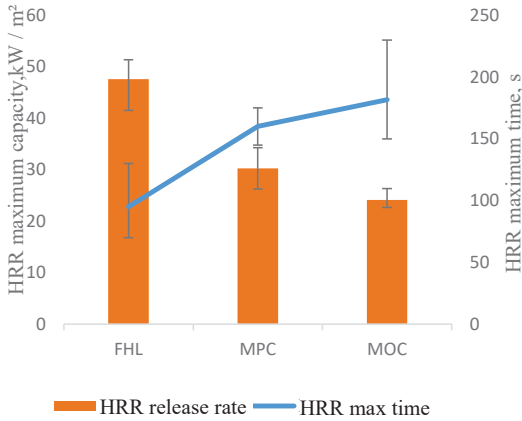


Fig. 4.6. Maximum heat release rate and time depending on biocomposite binder.



Fig. 4.7. MOC testing according to Standard LVS EN ISO 11925-2.

In order to show the fire dynamics, Fig. 4.8 shows the instantaneous heat release rate after 60 s, 180 s and 300 s from the start of the test. The graph shows that the heat release rate of FHL specimens decreases over time, which is similar to the specimens of wood [133]; however, the power of both magnesium compositions increases with time.

The loss of mass due to thermal radiation is shown in Fig. 4.9. The smallest loss of mass was recorded for FHL – 2015 g/m<sup>2</sup>, bigger for MOC – 2822 g/m<sup>2</sup>, but the biggest for MPCs – 3,017 g/m<sup>2</sup>, respectively. These results do not meet expectations, because, according to the measured heat release rate and time, FHL showed the most intense fire but the smallest loss of mass according to this test.

This fact can be explained by the different chemical structure of various binders. MOC and MPC biocomposite binders have high amount of chemically bound water being released at specific temperatures (MPC – from 120 °C to 200 °C [134], MOC – at around 600 °C [98]), thus reducing the heat release rate and increasing the time necessary to reach maximum capacity. MOC hardener MgCl<sub>2</sub> alone was also used as a flame retardant [133], thus chemically unbound MgCl<sub>2</sub> also reduced the heat release rate. Loss of mass (Fig. 4.9) directly indicated the decomposition of these magnesium binders – although they account for 45 %–50 % lower heat release rate, their loss of mass is 40 %–50 % higher.

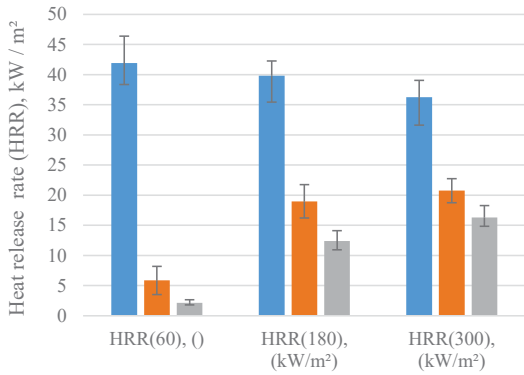


Fig. 4.8. Heat release rate depending on biocomposite binder.

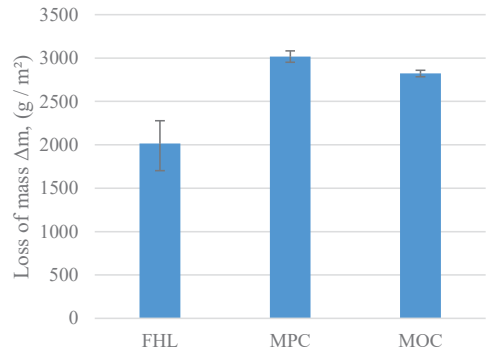


Fig. 4.9. Loss of mass depending on biocomposite binder.

#### 4.4. Results of microbiological stability tests for biocomposites

##### Test Series 1

Microbiological stability tests for two types of compositions – MOC-2 and FHL-2 (the composition is described in Section 4.2) – were carried out in Test series 1. Artificial inoculation was carried out with 2 types of fungal spores (*Cladosporium herbarum* and *Alternaria alternata*), one type of fungi for each group of specimens. The control group specimens did not receive artificial inoculation with fungi (K). In addition, half of the specimens were subjected to artificial aging in the climatic chamber for 30 freeze-thaw cycles and UV exposure (CH).

Specimens that had been artificially aged showed slightly lower performance – MOC-CH and FHL-CH showed fouling intensity 2 but other specimens did not show different fouling intensity. Therefore, it can be concluded that the exposure to freeze-thaw cycles and UV radiation does not significantly decrease the MOH and FHL microbiological stability.

Comparing the specimens subjected to Test series 1 with low pH (pH <6) building materials stored in analogous conditions, it can be observed that the low pH building materials reached the growth rate ranging from 3.5 up to a maximum of 5, thereby indicating that the FHL and MOC compositions are protected against biological effects.

##### Test Series 2

In the second series of tests, microbiological stability of five types of materials was tested – MOC-2, FHL-2 and MPC-3 (composition described in Section 4.2), as well as magnesium carbonate biocomposite, which was analogous to MOC-2 but without adding  $MgCl_2$  hardener, as well as reference material – wood fiber wool. Artificial inoculation was performed with 6 types of fungal spore suspension, for each material the microbiological stability was determined for inoculated specimens and control specimens. In the second series of tests, the analyzed specimens were aged in two humidity regimes: RH 75 % and 99 %. The fouling on the composite materials was visually assessed after 4 months of incubation.

At 99 % RH, MPC showed fouling level 4, wood fiber wool showed fouling level 3, both showed macroscopic fouling with fungi, while the remaining specimens showed fouling level 1 or an increase in microscopically detected fungi. Low microbiological stability of wood fiber wool can be explained by a low pH level of 4.28. Magnesium phosphate cement has a high pH level of 10.45, but low microbiological stability, which is related to the fact that the potassium phosphate is used as a hardener of binder. Potassium phosphate can also be used as a concentrated mineral fertilizer [135], [136], thus the undissolved part of the hardener serves as a nutrient for fungi growth.

### Test Series 3

In the third series of tests, microbiological stability of 8 types of materials was tested – MOC-2, FHL-2 and MPC-3 (as described in Section 4.2), as well as hydraulic lime binder biocomposite, hemp and flax shives and reference materials – wood fiber wool and fibrolite. Three different concentrations of binders – 100 %, 50 % and 20 % – were tested for all biocomposites.

Artificial inoculation was performed with 6 types of fungal spore suspension, for each material the microbiological stability was determined for inoculated specimens (marked with F) and control specimens (marked with K). In the third series of tests, the analyzed specimens were aged in 99 % RH conditions. The fouling on the composite materials was visually assessed after 45 days of incubation.

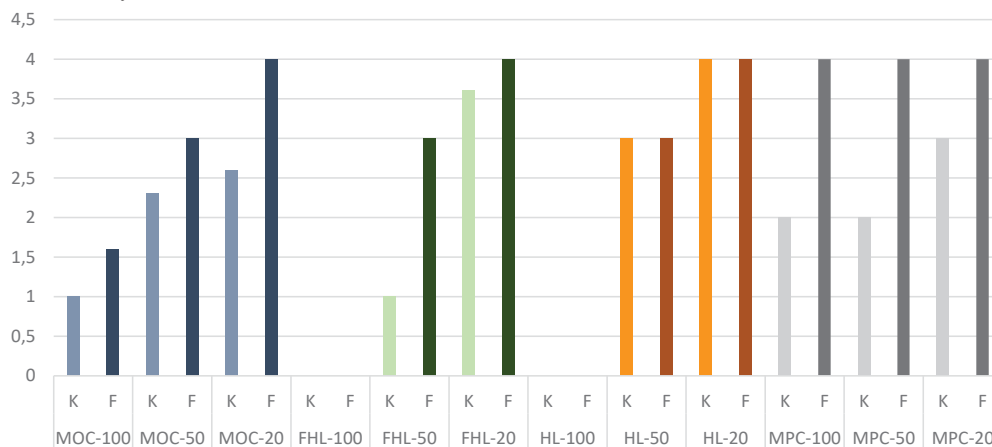


Fig. 4.10. Test Series 3: fouling depending on binder.

Analyzing the changes in microbiological stability of composites depending on the concentration of the binder (Fig. 4.10), it can be concluded that the decrease of the amount of mineral binder also decreases microbiological stability. Assessment of MOC, FHL, and HL biocomposites at 100 % concentration fouling is 0–1.5, at 50 % concentration it is 1–3, at 20 % it is 2.5–4, respectively (Fig. 4.10). The decrease of microbiological stability correlates with the reduction of pH in the specimens. Lime-based binder biocomposites (FHL and HL) show higher microbiological stability than MOC biocomposites, since on the 100 % binder specimens fouling was not observed, while on the MOC the fouling corresponded to the levels 1–2. At 50 % and 20 % concentration specimens, this difference disappears. This can be attributed to

the pH level, which for the lime-based specimens is around 12 at 100 % but for the MOC – 9.76, while the reduction of binder in 50 % and 20 % specimens results in a similar pH and microbiological stability.

Decrease of the microbiological stability in the MPC biocomposites is less pronounced, as fouling at 100 % concentration is 2–4, while at 20 % it is 3–4. Such an increased MPC fouling is similar to the results of Test Series 2 and it can be explained by the impact of the hardener – potassium phosphate.

Microbiological stability of the biocomposite aggregates – hemp shives – is low, - the fungi growth rate is 3.2–4. Some literature sources tend to attribute antibacterial properties to the hemp shives [137] but the experiments show fungi fouling on them. Compared with the aggregate of similar origin – flax shives – it can be observed that the flax shives are completely covered with fouling and the fungus growth started much earlier than for the hemp shives.

In the third stage of the experiment it was discovered that fungi belonging to the species *Paecilomyces* and *Stachybotrys* are the most common on the materials included in the research. In some cases *Penicillium*, *Acremonium*, *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Trichoderma* and *Mucor* were also observed, indicating that the substrates contain sufficient amount of moisture and nutrients for the fungal development. Most of these fungi feed on cellulose; therefore they can be found on cellulose-based materials [125], [138]. *Stachybotrys* also feeds on lignin and for this reason it is often found on wood and its products [139], also known as black mold [140]. Since hemp shives contain high levels of lignin and cellulose, this type of fungi can be found on a large number of specimens (Fig. 4.11). The mycotoxins produced by these fungi cause allergic reactions, they are often associated with various health problems caused by inappropriate indoor microclimate [141].

The pH levels play an important role regarding spread of fungi in building materials. On composite materials with the pH level 6 to 8, fungi spread more rapidly than alkaline materials with the pH levels 12-13-14. The pH levels of lime-based and cement-based materials decrease to about 9 due to the carbonization process, allowing the growth of microorganisms on the materials. Similar pH values are achieved by decreasing the amount of binder. Various studies on mortar carbonization show that their biological susceptibility is significantly increased in



Fig. 4.11. From the left: FHL-100, FHL-50, FHL-20.

the case of reduced pH [141] levels, the same way as in the performed study on the reduction of the amount of binder.

### 4.5. Field tests to determine the thermal conductivity and moisture migration

Within the framework of this research, natural fiber biocomposites have been tested in field conditions by measurements in the existing buildings using these materials to analyze their performance in an average European climate zone. Measurements were made using a specially designed portable measuring system with temperature, humidity and heat flow sensors, thermal and technical properties of the material were analysed and compared with those obtained in laboratory settings, the migration of moisture in biocomposites also has been considered.

The chosen system was designed for installing indoors. The system consists of 14 miniature temperature and humidity sensors, which are intended for installation in premises and structural elements of the building, and 1 heat flow sensor in the form of a board. Temperature and humidity sensors are placed in the protective housing having an opening. Heat flow sensor is attached to the wall. The system was placed in a closed housing, where sensors were connected with cables. Access to the measurement data was provided using remote mobile modem.

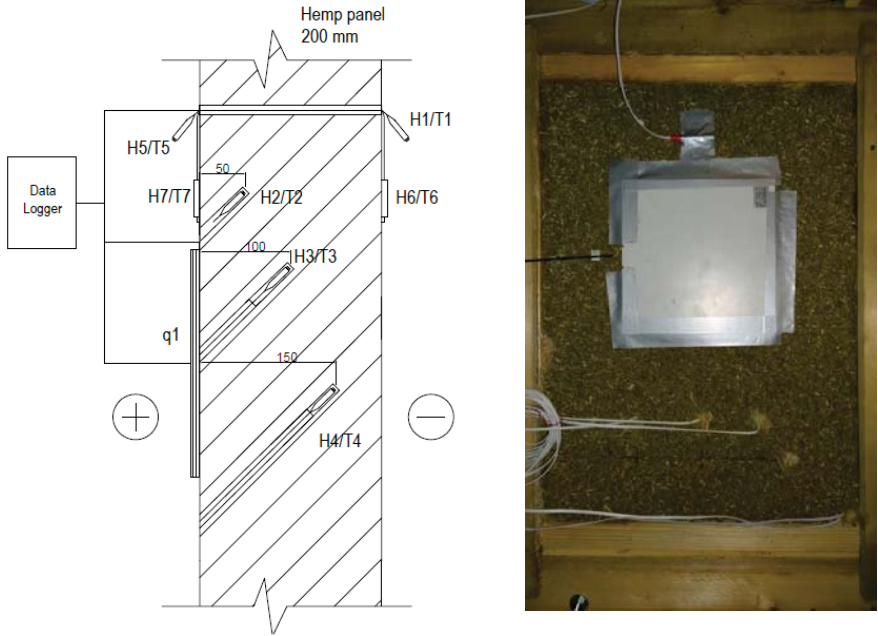


Fig. 4.12. A-type wall – experimental biocomposite panel.

For the research purposes, in real-life conditions three different types of wall constructions were measured: 200 mm thick hemp-lime panel without internal and external finishes (Table 4.6. A, Fig. 4.12), 250 mm thick hemp-lime wall and 50 mm thick wool fiber insulation (Table

4.6. B), and 80 mm hemp-lime blocks used to insulate an existing 200 mm thick pile building wall (Table 4.6. C).

From the experimental field measurements of the biocomposite, two different  $U$  values were calculated:  $U_{avg}$  and  $U_{num}$ .  $U_{avg}$  can be calculated for a specific time period using the internal and external surface temperature data and the results of the heat flow by cumulative method. For the measurements of biocomposite blocks (Table 4.6. C), the  $U$  value for the wall was determined without prior insulation, and tests with an insulated wall allowed it to be determined on the basis of an increase in thermal resistance.  $U_{theor}$  values were calculated from laboratory measurements.

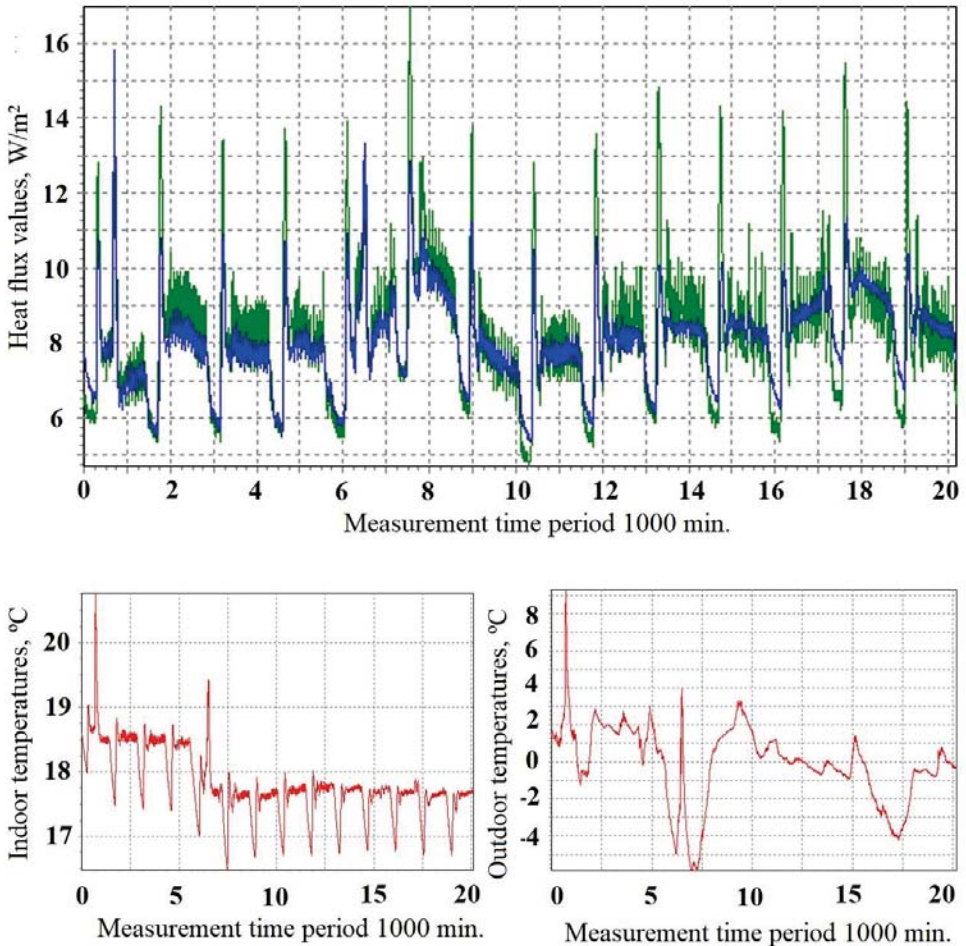


Fig. 4.13. Comparison of  $U_{avg}$  and  $U_{num}$  values.

However, for a precise use of the cumulative method for the calculation of the  $U$ -value, rapid fluctuations in temperature are not permitted. Experimental data indicated that fluctuations in the temperature and heat flow affecting the surface inside the wall, usually caused by different sources of heat, such as heaters or human activities, can be observed. As a

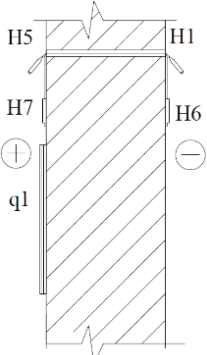
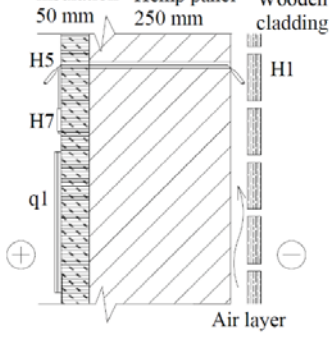
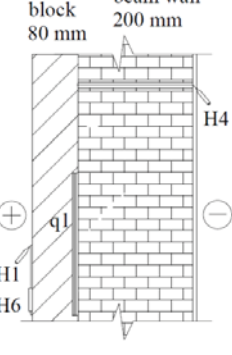
result, measurements with heat flow sensors inside the wall showed changes in  $U_{avg}$  value even by 15 % in one week. These fluctuations are shown in Fig. 4.13, where the green line represents the values of the measured heat flow.

The  $U$  methodology for calculating  $U$  was developed in the Laboratory for Mathematical Modelling of Environmental and Technological Processes of the University of Latvia, allowing to use the experimental data from short-term measurements [126]. The method is based on a one-dimensional calculation of heat transfer coefficient using the heat flow density on a warmer surface and the temperature difference of the surfaces [127]. The method was integrated and used with the *DataProc* program [46].

A comparison of the theoretical and numerical  $U$  values indicates that the greatest differences are for the experimental panel (Table 4.6. Type A). This is due to the drying time of the material, since it was installed shortly after production, and only 2 months of drying the H4 internal RH sensor was not below 80% RH. It can also be seen in the variation of  $U$  value  $0.3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  during this 2-month period of drying.

Table 4.6

Experimental types of walls, their theoretical and measured  $U$ -values

Wall type	A	B	C
	Hemp panel 200 mm	Wood wool insulation 50 mm Hemp panel 250 mm Wooden cladding	Hemp block 80 mm Wooden beam wall 200 mm
Cross-section of the wall			
Total wall structure thickness, mm	200	300	280
Biocomposite thickness, mm	200	250	80
$U_{theor}$ , $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	0.60	0.23	0.30
$U_{avg}$ , $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1.2 (2016-feb) 0.9 (2016-apr, oct)	0.29 (2016-nov) 0.34 (spring-2017-apr)	0.48 (without biocomposite block) 0.23 (with biocomposite block)
$U_{num}$ , $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1.2 (2016-feb) 0.9 (2016-apr, oct)	0.28 (2016-nov) 0.29 (2017-apr)	0.45 (without biocomposite block) 0.20 (with biocomposite block)

The comparison of the two experimental  $U$  values shows that in the measurement where the heat flow sensor is located on the inner surface of the material, the temperature and heat flow fluctuations affect  $U_{avg}$  values. For example, it can be observed in a sequential 7-day measurement period, where the results can vary by 15 %; however,  $U_{num}$  calculation reduces



these fluctuations and allows to shorten the measurement time. For measurements with the heat flow sensor located in the middle layer, the difference between  $U_{avg}$  and  $U_{num}$  values is only  $0.03 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , or no more than 6.7 %, thus, if the heat flow sensor is in stable conditions, then using the cumulative method can result in sufficiently accurate results.

The results of the heat flow and relative humidity sensors indicate the need to dry the appropriate biocomposite material, as it has retained a significant amount of water during the production process. This excess water has a negative effect on the U value. Namely, it is by 25% to 33% higher than the dried panel. This moisture locking between the finishing layers should be avoided, as it prevents drying and can create favorable conditions for fungi growth.

Looking at the changes in the temperature schedule, the thermal inertia phase shift can also be determined graphically. Temperature sensor T6 reaches its peak during the day, sensor T4 located 50 mm deeper reaches its peak after 3 hours, T3 – after 4 hours, and T2, which is located 50 mm from the inner surface, after 6 hours in average. Consequently, the thermal inertia phase shift for a 200 mm thick biocomposite panel between its internal and external surfaces is 6–8 hours. This phase shift is also obtained by calculating  $U_{num}$  with *DataProc*.

For a wall type B, it can be observed that sensor T2 reaches the peak in 9–10 hours after the surface sensor T4 has reached its maximum, which means that thermal inertia phase shift for a 250 mm biocomposite wall with a 50 mm wooden fiber insulation is 10–12 hours, which is considered optimal in order to maximize thermal inertia and passive cooling capacity in buildings.

Looking at the data from type B wall humidity sensor, high moisture buffering capacity of hemp can be observed. The relative humidity indoors ranged from 23 % to 50 % during the period considered, but it was from 50 % to 60 % at a depth of 50 mm inside the wall. This change occurs without phase shift over time. This indicates that the hemp biocomposite wall is actively regulating the indoor microclimate, as only 20 % of the period under consideration the indoor humidity was below 40 %, which is considered to be a threshold for indoor microclimate favorable for human health [141].

The results of humidity measurements indicate high permeability and biocomposite buffering capacity, as it responds to internal and external humidity fluctuations by absorbing and desorbing water vapor. This, on the one hand, reduces the thermal resistance of the material, but on the other hand allows for higher indoor thermal comfort, as the relative humidity fluctuations decrease.

## 5. LIFE CYCLE ANALYSIS OF NATURAL FIBER BIOCOMPOSITES

### 5.1. Defining of the target and scope

#### 5.1.1. LCA method for biocomposites

In order to evaluate different biocomposites produced for the research purposes and to compare them with alternative materials, a uniform method for calculating their impact was necessary and consequently was developed within this Doctoral Thesis.

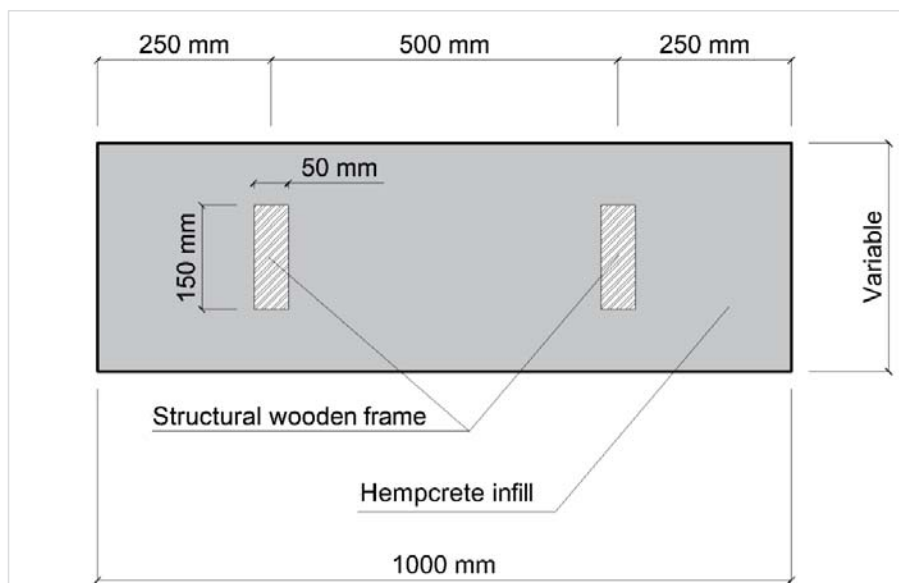


Fig. 5.1. Section of a functional unit of a part of the wall.

As the main application of natural fiber biocomposites is using them as wall insulation materials, LCA functional units are described as 1 m<sup>2</sup> wide wall area with  $U = 0.18 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , which, according to the Latvian Construction Standard LBN 002-15 "Thermal engineering of building envelope structures", is the  $U$  value of the normative walls for residential buildings. A wall segment with variable thickness was filled with a hemp biocomposite, except for a supporting part consisting of two 150 mm x 50 mm wooden stacks located 500 mm apart and in the middle of the wall section (Fig. 5.1).

Biocomposite strength is defined by two limit values, based on previous studies [147] – the first is 0.15 MPa, which characterizes the method of the traditional hemp biocomposite application in the formwork on the construction site, the second – 0.5 MPa describes the application as a self-supporting thermal insulation block material.

In order to obtain the thickness of the functional unit and the amount of materials used, it is necessary to collect the thermal conductivity, strength and density data from the experimental part to determine the values at the given limit values. Since the thermal conductivity at the required strength had been determined during the experimental phase, the thickness was specified to achieve the required normative  $U$  value (see the summary in Table 5.1).

The highest consumption of materials was for the lime-based formulations (Table 5.1), because they have lower strength and thus require higher amount of binder to reach the functional unit limit values. The lowest consumption of materials for achieving a certain  $U$  value was for the magnesium oxychloride and orthophosphate binder specimens because they have low strength / thermal conductivity ratios.

Table 5.1

Functional unit properties and dimensions

Binder type	Name	Shives, kg	Water, kg	Binder, kg	Compr. strength, MPa	Thermal conduct., W/m·K	Density, kg/m <sup>3</sup>	Thickness at $U = 0.18$ , W/m <sup>2</sup> ·K	FU at $U = 0.18$ W/m <sup>2</sup> ·K, relative thickness, m
MPC	MPC (0.15)	125.6	205.2	108.5	0.15	0.062	245.2	0.344	0.344
	MPC (0.50)	125.6	268.5	239.7	0.50	0.080	371.5	0.446	0.446
MOC	MOC (0.15)	125.6	157.0	98.8	0.15	0.062	210.1	0.344	0.344
	MOC (0.50)	125.6	157.0	256.4	0.50	0.085	380.1	0.474	0.474
FHL	FHL (0.15)	125.6	286.4	258.7	0.15	0.082	368.9	0.453	0.453
	FHL (0.50)	125.6	320.3	326.5	0.50	0.108	515.9	0.600	0.600
HL	HL (0.15)	125.6	248.3	182.7	0.15	0.075	322.6	0.415	0.415
	HL (0.50)	125.6	308.0	302.0	0.50	0.097	446.6	0.541	0.541

Since identical values of  $U$  were defined in a functional unit, no differences could be obtained in terms of thermal conductivity during the material use phase. In order to take into account the biological accumulation of CO<sub>2</sub> content of such materials, it was necessary to use "cradle-to-gate" system (Fig. 5.2) [148].

In this case, LCA study required "impact allocation" (the environmental impact was divided between several products of the same process with regard to the mass or economic distribution) for the hemp shives and metakaolin, because they were both waste products whose primary products weigh significantly less but account for 75 %–95 % of the revenues. In such cases, an economic breakdown is used [149], which is also used in the Doctoral Thesis.

In order to be able to compare the lifecycle of hemp biocomposites with other materials, it was necessary to create alternative material functional units with comparable properties; therefore, functional units were adopted with an analogue  $U$  value of 0.18 W/m<sup>2</sup>·K. 500 mm and 300 kg/m<sup>3</sup> aerated concrete blocks without additional insulation, 300 mm and 375 kg/m<sup>3</sup> aero concrete blocks with 100 mm and 120 kg/m<sup>3</sup> stone wool insulation and a structural wooden frame with a 200 mm mineral wool layer and a gypsum plasterboard from the inside were selected as alternative materials. The transport distance for all materials was assumed to be 100 km.

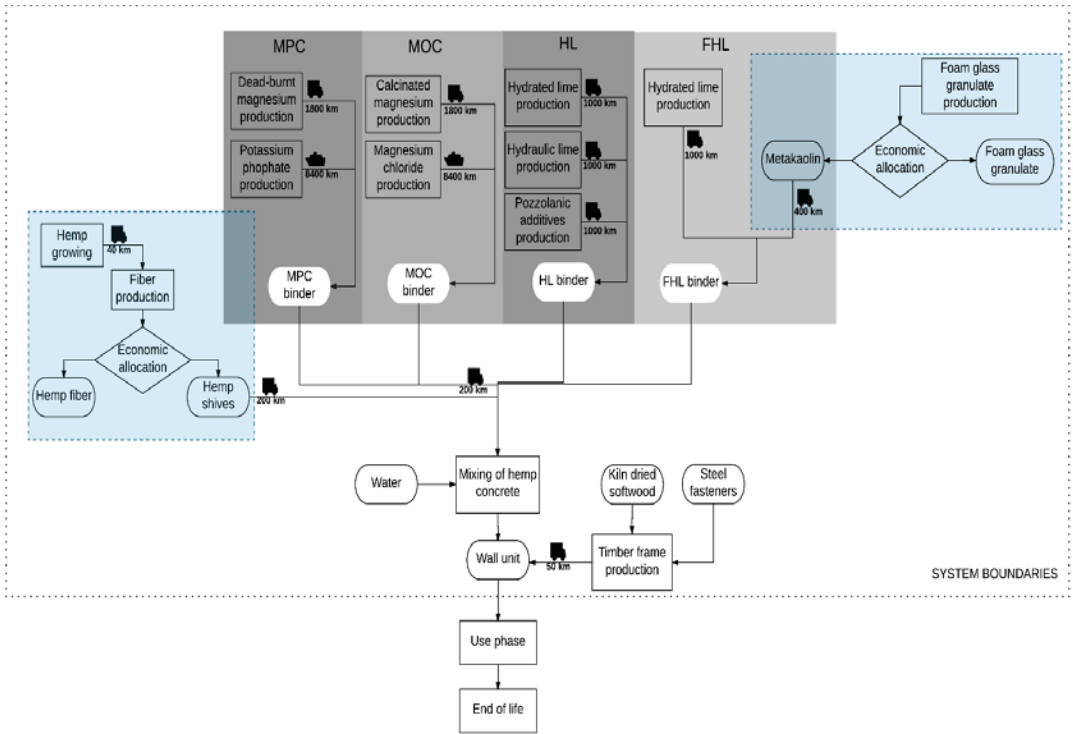


Fig. 5.2. Flow chart of system boundaries.

## 5.2. Inventory analysis

The data used in the Doctoral Thesis for the LCA purposes was derived from a variety of sources. Primarily, the Ecoinvent database was used, where possible. It was the only database that was used to provide a consistent interpretation of the data. If no data was available, similar studies, summaries, descriptions, or personal communication was used. The main data on the cultivation and processing of hemp are taken from research conducted in Latvia, mainly by V. Stramkale from "Latgales lauksaimniecības zinātnes centrs" [150–152], as well as from personal communication with experts involved in the growing and processing process.

## 5.3. Analysis and interpretation of results

### 5.3.1. Comparison of functional units

Results of CML 2 Baseline analysis method for both functional units are shown in Fig. 5.3. Separate impact assessment for each 0.15 MPa functional unit binder is shown in Fig. 5.4.

MPC has the highest impact in almost all categories (Fig. 5.3), with an exception of the ozone layer depletion and freshwater ecotoxicity, but also in these categories the impact is quite high. It is also the single binder for which the functional unit has a positive CO<sub>2</sub> emission, all

others present CO<sub>2</sub> collection (negative emissions). In impact categories, such as acidification or eutrophication, the MPC shows 5 to 10 times higher effect than other binders, in the remaining categories it is 2 to 3 times higher. These results, together with the impact in individual categories (see Fig. 5.4), lead to the conclusion that mono-potassium phosphate has the highest impact, since it is the most significant in all categories, especially in the formation of acidification and eutrophication potential. Upon closer examination, it is evident that most of the environmental impact is due to the mono-potassium phosphate produced via the classical wet phosphoric acid process.

Taking into account that 30 % -50 % of biocomposites contain hemp shives, they produce a significant effect with a small amount of binder (Fig. 5.4), the main impact coming from the use of mineral fertilizers and diesel fuel. In addition, it should be noted that not only by emissions, but also by absorbed CO<sub>2</sub>, impact of hemp shives is attributed (Section 5.1), taking into account the economic distribution, that is, only 27 % of the observed CO<sub>2</sub>. If mass distribution were used, then 54 % of the absorbed CO<sub>2</sub> would be allocated to the hemp shives, thus creating higher impact in other categories. This difference should be taken into account when the study data is used in a situation with a different fiber / shive ratio. Namely, if the ratio changes, the impact of hemp shives on the environment also changes.

Comparing HL and FHL emissions (Fig. 5.3), it can be concluded that in most categories they do not differ by more than 10 %, except for the GWP, since both binders are based on hydrated lime. GWP 100 in the FHL category shows by 30 % better results, which is related to the low emissions from the production of metakaolin as a waste product. If metakaolin or other admixture were produced specifically for this purpose, the effects of FHL would be significantly higher and its use would not be justified.

An analysis of the MOC results shows that, in comparison with other biocomposites, it shows lower results at 0.15 MPa strength in most of the impact classes, with the results becoming slightly closer at 0.5 MPa due to higher amount of MgO. The low impact of MOC is ensured by its high strength / density ratio, as well as the low impact of magnesium chloride compared to potassium phosphate.

The obtained results (Table 5.2) are consistent with previous LCA studies on LHC materials that show CO<sub>2</sub> absorption from 36.08 kg to 1.6 kg CO<sub>2</sub> equiv. / FU because FUs differ among the studies [19], [20], [22], [158]. The GWP factor for lime-based binders used in this study is similar to that in other studies, ranging from 30.91 kg to 4.88 kg CO<sub>2</sub> equiv. / FU. Most of this absorption is done by hemp shives (Fig. 5.4), as the results show also in all other studies (Table 5.2). One of the major differences from other studies is the assumptions about the absorption of CO<sub>2</sub> of the lime-based binding agent. Boutin [158], Ip [20] and Pretot [19] assume complete carbonization of binders, the same as in this study, Arrigoni [22] assumes partial carbonization, which has taken place after 240 days, based on the experimental results. If the Arrigoni study had assumed complete carbonization, then the total balance would have been 26.01 kg CO<sub>2</sub> equiv./ FU, but only partial carbonization was assumed resulting in a balance of 12.09 kg CO<sub>2</sub> equiv./ FU. Using this partial carbonization method, this study would produce significantly different results and would be more beneficial for the use of the MgO binder.

MgO binders, due to the lower magnesium calcination temperature [89], as well as the MgO's ability to carbonize, thus absorbing CO<sub>2</sub> [159], are considered to be superior to their small environmental impact, compared with lime and cement binders. However, some studies focusing mainly on MgO's production LCA have revealed that, comparing only by the binder mass, MgO has higher CO<sub>2</sub> emissions than the same amount of lime or cement [160], [161]. This is due to the fact that the decomposition of magnesite results in the release of 1.10 t / t CO<sub>2</sub>, while limestone decomposition results in only 0.78–0.83 t / t CO<sub>2</sub>, regardless of lower calcination temperatures [151]. It directly affects the potential of GWP (Fig. 5.4), since

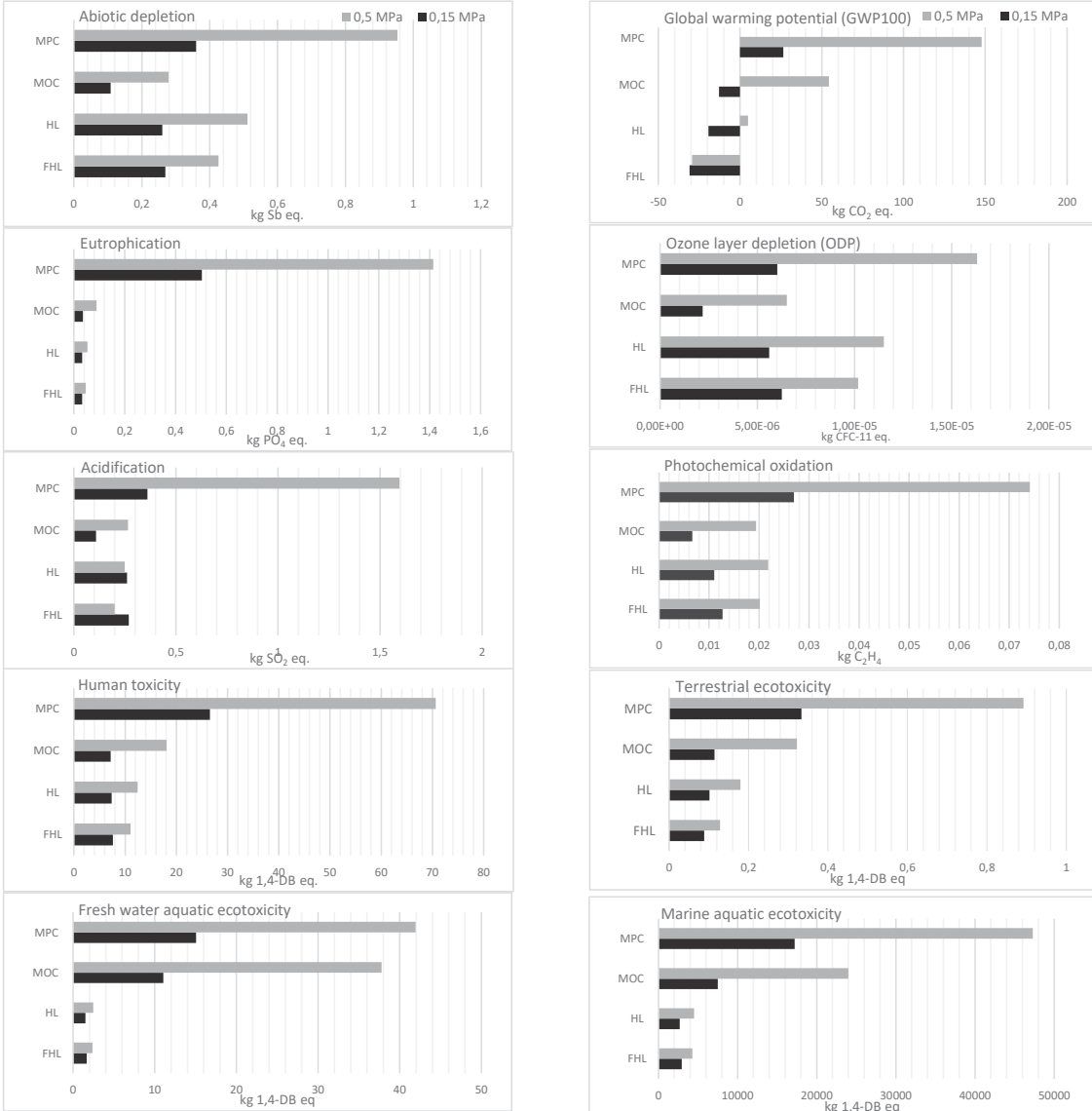


Fig. 5.3. CML2 Baseline results for each impact category.

magnesium-based binders contribute to GWP more than the lime-based binders, although this can be avoided by reducing the use of binders in MOC.



Fig. 5.4. CML2 impact factors for 0.15 MPa wall.

Comparison of GWP results with other studies on hemp-lime concrete

Authors	Shives, kg	Water, kg	Binder, kg	Thermal conduct., W/m·K	Density, kg/m <sup>3</sup>	Thick., m	U-value, W/m <sup>2</sup> ·K	CO <sub>2</sub> absorbed, kg CO <sub>2</sub> eq/kg shives	GWP balance, kg CO <sub>2</sub> eq/FU	
Boutin et al. [158]	24.8	37.2	54.5	0.109	330.0	0.260	0.42	2.11	-35.53	
Ip and Miller [20]	30.0	75.0	50.0	0.057	275.0	0.300	0.19	1.53	-36.08	
Pretot et al. [19]	20.4	67.0	45.0	0.086	390-460	0.240	0.36	1.70	-1,60	
Arrigoni et al. [22]	31.4	58.6	44.5	0.067	330.0	0.250	0.27	1.84	-12.09	
Results of the current study	MPC (0.15)	43.2	70.6	37.3	0.062	245.2	0.344	0.18	1.84	26.49
	MPC (0.50)	56.0	119.8	106.9	0.080	371.5	0.446	0.18	1.84	147.76
	MOC (0.15)	43.2	54.0	34.0	0.062	210.1	0.344	0.18	1.84	-12.68
	MOC (0.50)	59.5	74.4	121.5	0.085	380.1	0.474	0.18	1.84	54.29
	FHL (0.15)	56.9	129.7	117.2	0.082	368.9	0.453	0.18	1.84	-30.91
	FHL (0.50)	75.4	192.2	195.9	0.108	515.9	0.600	0.18	1.84	-29.33
	HL (0.15)	52.1	103.0	75.8	0.075	322.6	0.415	0.18	1.84	-19.28
	HL (0, 50)	67.9	166.6	163.4	0.097	446.6	0.541	0.18	1.84	4.88

### 5.3.2. Comparison of alternative materials

In order to assess the reduced environmental impact of hemp biocomposites, it was compared with alternative materials having identical thermal conductivity (Fig. 5.5). Aerated concrete products in average have 4–5 times higher environmental impact than other materials, which can be explained by the high amount of energy consumed in the production of cement (the main component of aerated concrete) and during the autoclaving process of aerated concrete. The adhesive for aerated concrete is also energy-intensive. Looking at the GWP factor, it can be seen that the amount of CO<sub>2</sub> emissions from the aerated concrete is on average 4 times bigger than the hemp-lime functional unit is capable to absorb.

In addition, the insulated aerated concrete wall emission factors are even higher than for a wall made of 500 mm aerated concrete alone. This is due to the fact that for identical weight rock wool generates higher emissions than aerated concrete. This is related to higher energy consumption level during the production process. The wooden stud wall, which is packed with mineral wool, has similar emissions as hemp-lime material (Fig. 5.5). The majority of all factor emissions (60 %–70 %) come directly from the mineral wool. Regarding the GWP factor, the functional unit of wooden stud accounts only for 0.48 kg of CO<sub>2</sub> emissions, which makes this material almost CO<sub>2</sub> neutral.

In general, the developed method for analyzing the life cycle of natural fiber materials makes it possible to calculate the environmental impact of materials, by using experimentally



obtained strength properties, physical properties and thermal conductivity properties, and to compare them with conventional building materials.

Lime-based binders have shown a good overall performance of LCA as their impact on GWP was the lowest due to the carbonation of lime-based binders. Comparing the lime-based binder, it can be concluded that the experimental binder has 12 %–28 % lower impact for all factors than the commercial hydraulic lime binder. Under the influence of the GWP factor, hydraulic lime accounts for 55 % of the amount of CO<sub>2</sub> absorbed by the alternative binder. It

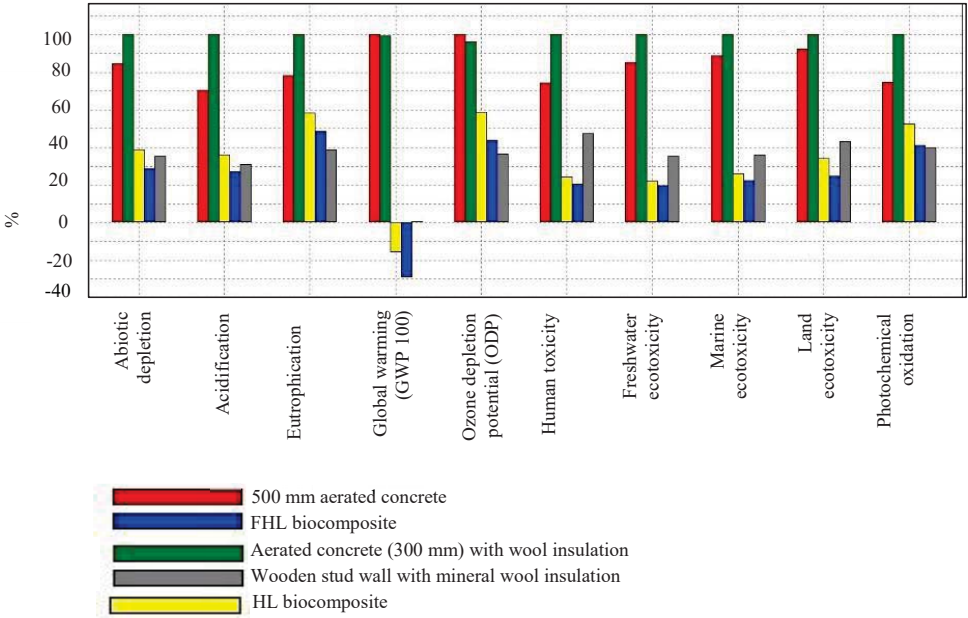


Fig. 5.5. Environmental impact of alternative building materials.

proves that fully or partially substituting the binder with waste products that results in lower emission levels produces the desired effect and reduces total hemp-lime emissions according to all factors.

Magnesium binders showed various results regarding LCA. MPC had the greatest impact in almost all categories, and, despite its high strength and density ratio, the environmental impact of 0.5 MPa FU was even relatively higher. This is due to its hardener – potassium phosphate, whose production processes have high energy and resource capacity.

MOC had the lowest density of 0.15 MPa FU; therefore, low consumption of material was one of the reasons why this biocomposite had the lowest impact in most of the categories. It was also caused by the low environmental impact of the MgCl<sub>2</sub>-MOC hardener. Although the binder did not absorb CO<sub>2</sub> in the curing process, the effect of GWP was only 6.60 kg CO<sub>2</sub> equiv. / FU bigger than for 0.15 MPa wall HL binder. For denser materials this difference is bigger because the amount of hemp fiber remains unchanged. The overall MOC performance shows that it has the greatest potential for being used in industrial biocomposite production, since MOC biocomposites have showed the best strength / thermal conductivity / environmental impact ratio.

Compared to alternative materials (aerated concrete, aerated concrete + stone wool, wooden stud frame + mineral wool), the lime-hemp biocomposite accounts for 2–4 times lower emissions and is the only CO<sub>2</sub> neutral material, which proves that this material has properties, which can be considered as highly environmentally friendly.

## CONCLUSIONS

1. It has been proven that by using waste products (waste metakaolin as well as crushed lamp glass containing borosilicate and lead) as active hydraulic additives it is possible to increase the mechanical properties of hydrated lime to achieve a compressive strength of at least 5 MPa, which is required for the development of natural fiber biocomposites. The highest increase in compressive strength – from 1.18 MPa to 12.30 MPa – can be obtained by replacing the CL90 hydrated lime with 40 % metakaolin additive.
2. Two types of magnesium-based binders have been obtained, which show significantly higher mechanical strength than lime-based binders:
  - a. Magnesium oxychloride cement is made by bonding caustic magnesium oxide and magnesium chloride salts. The highest compressive strength (60.9 MPa) can be obtained by using  $\text{MgCl}_2/\text{MgO}$  ratio of 0.34 and water/binder ratio of 0.25.
  - b. Magnesium phosphate cement is made from burnt magnesium oxide and potassium orthophosphate. The highest compressive strength (52.1 MPa) can be obtained by using  $\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{MgO}$  ratio of 0.80 and water/binder ratio of 0.28.
3. Three natural fiber biocomposites with different binders and different physical and mechanical properties have been developed:
  - a. Hydraulic lime binder with metakaolin additive biocomposites (FHL) with a density from  $233 \text{ kg/m}^3$  up to  $489 \text{ kg/m}^3$ , compressive strength 0.06 MPa – 0.44 MPa, thermal conductivity  $0.062 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  –  $0.103 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .
  - b. Magnesium oxychloride cement biocomposites (MOC) with a density from  $214 \text{ kg/m}^3$  to  $416 \text{ kg/m}^3$  and at least 60 % higher strength than the biocomposites with lime binders – from 0.16 to 0.71 MPa – and thermal conductivity  $0.063 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  –  $0.092 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .
  - c. Magnesium phosphate cement biocomposites (MPC) with a density from  $211 \text{ kg/m}^3$  up to  $415 \text{ kg/m}^3$ , compressive strength 0.10 MPa – 0.82 MPa, thermal conductivity  $0.057 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  –  $0.087 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .
4. According to their fire reaction, magnesium-based biocomposites MOC and MPC can be classified as Class B s1, d0, lime-based biocomposites FHL – between Classes B and C. MOC shows the lowest heat release rate of  $24.12 \text{ kW/m}^2$ , MPC – is  $30.23 \text{ kW/m}^2$  that is by 25 % higher, FHL releases  $47.61 \text{ kW/m}^2$ . The mass loss for magnesium-based biocomposites in their turn is higher in MOC it is  $2822 \text{ g/m}^2$  and in MPC it is  $3017 \text{ g/m}^2$ , FHL is  $2015 \text{ g/m}^2$ . It is linked to the fact that the magnesium-based biocomposites have chemically bound water, which is released under the impact of elevated temperatures.
5. In the biological stability tests, the lime-based binder biocomposites have had the highest results, as they did not show any fungi growth even on a microscopic level at 100 % use of the binder. In the MOC biocomposites, with a microscope fungi growth has been detected due to its lower pH level (MOC pH 9.76, FHL pH 11.99).

MPC binder biocomposites showed the lowest results with more than 80 % fungal fouling, which was related to the binder hardener used. Potassium orthophosphate is also used as a mineral fertilizer.

6. Within the framework of the Doctoral Thesis, a high-precision measuring device has been developed that allows to measure simultaneously humidity and temperature distribution in the cross section of the wall, as well as to measure the heat flow. The obtained data has been used to compare the theoretical and real values of U and to determine the moisture migration.
7. The developed method for the life cycle calculation allows the use of experimentally obtained results regarding thermal conductivity and strength of biocomposites to create a model for assessing the environmental impact of the functional units of natural fiber biocomposites and to compare it with those of the conventional building materials.
8. By comparing the environmental effects of lime-based binder, it can be concluded that the hydrated lime binder with metakaolin (FHL) for all factors has by 12 %–55 % lower impact than the commercial hydraulic lime binder. Among the magnesium-based binder biocomposites, MOC has a significantly lower environmental impact than MPC, despite the high strength and density ratio of MPC associated with its hardener – potassium phosphate, which is highly energy and resource-intensive.
9. Compared to other materials (aerated concrete, aerated concrete + stone wool, wooden stud frame + mineral wool), the developed natural fiber biocomposites have showed 2–4 times lower emissions and therefore are the only CO<sub>2</sub> neutral materials that demonstrate their reduced environmental impact.
10. During the research process, biocomposites with three different binders have been developed and their properties have been determined. In general, the following conclusions can be drawn from the obtained results on the biocomposite application:
  - a. Lime-based biocomposites have low mechanical strength, average fire reaction, high biological stability and the lowest environmental impact among all biocomposites. They can be used in low-rise buildings, using conventional application in the construction site along with a structural wooden frame.
  - b. Magnesium phosphate cement biocomposites have high mechanical strength but low biological stability and relatively higher environmental impact. They can be used when high early strength is necessary.
  - c. The results of the magnesium oxychloride biocomposites have proved that they have the greatest potential for the industrial biocomposite production because they have showed the best ratio of strength / thermal conductivity / environmental impact.

## LITERATŪRAS SARAKSTS / LIST OF REFERENCES

- [1] EU, "DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings," 2010.
- [2] EU, "Energy and Climate framework 2030, European Council 23/24 October 2014 – Conclusions, EUCO 169/14," 2014.
- [3] A. Kylili, M. Ilic, and P. A. Fokaides, "Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 116, pp. 169–177, 2017.
- [4] S. Seo, J. Kim, K. K. Yum, and J. McGregor, "Embodied carbon of building products during their supply chains: Case study of aluminium window in Australia," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 105, pp. 160–166, 2015.
- [5] H. X. Li, L. Zhang, D. Mah, and H. Yu, "An integrated simulation and optimization approach for reducing CO<sub>2</sub> emissions from on-site construction process in cold regions," *Energy Build.*, vol. 138, pp. 666–675, 2017.
- [6] B. Lin and H. Liu, "CO<sub>2</sub> mitigation potential in China's building construction industry: A comparison of energy performance," *Build. Environ.*, vol. 94, pp. 239–251, 2015.
- [7] M. U. Hossain, C. S. Poon, Y. H. Dong, and D. Xuan, "Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. May 2016, pp. 597–608, 2018.
- [8] M. Sandanayake, G. Zhang, and S. Setunge, "A comparative method of air emission impact assessment for building construction activities," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 68, no. December 2016, pp. 1–9, 2018.
- [9] A. Estokova, S. Vilcekova, and M. Porhincak, "Analyzing Embodied Energy, Global Warming and Acidification Potentials of Materials in Residential Buildings," *Procedia Eng.*, vol. 180, pp. 1675–1683, 2017.
- [10] K. L. Davis, M. A. Coleman, S. D. Connell, B. D. Russell, B. M. Gillanders, and B. P. Kelaher, "Ecological performance of construction materials subject to ocean climate change," *Mar. Environ. Res.*, vol. 131, pp. 177–182, 2017.
- [11] S. Marcelino-Sadaba, J. Kinuthia, J. Oti, and A. Seco Meneses, "Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials," *Appl. Clay Sci.*, vol. 144, no. May, pp. 121–130, 2017.
- [12] K. Kobetičová and R. Černý, "Ecotoxicology of building materials: A critical review of recent studies," *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 500–508, Nov. 2017.
- [13] A. Balaguera, G. I. Carvajal, J. Albertí, and P. Fullana-i-Palmer, "Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 132, no. May 2017, pp. 37–48, 2018.
- [14] M. U. Hossain, C. S. Poon, I. M. C. Lo, and J. C. P. Cheng, "Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 109, pp. 67–77, 2016.
- [15] F. Pacheco-Torgal and J. A. Labrincha, "The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 729–737, Mar. 2013.
- [16] M. Palumbo, J. Avellaneda, and A. M. Lacasta, "Availability of crop by-products in Spain: New raw materials for natural thermal insulation," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 99, pp. 1–6, 2015.
- [17] K. W. Corscadden, J. N. Biggs, and D. K. Stiles, "Sheep's wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource?," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 86, pp. 9–15, 2014.
- [18] M. Pervaiz and M. M. Sain, "Carbon storage potential in natural fiber composites," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 39, no. 4, pp. 325–340, 2003.

- [19] S. Pretot, F. Collet, and C. Garnier, "Life cycle assessment of a hemp concrete wall : Impact of thickness and coating," *Buuld. Environ.*, vol. 72, pp. 223–231, 2014.
- [20] K. Ip and A. Miller, "Resources , Conservation and Recycling Life cycle greenhouse gas emissions of hemp – lime wall constructions in the UK," *"Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 69, pp. 1–9, 2012.
- [21] A. Shea, M. Lawrence, and P. Walker, "Hygrothermal performance of an experimental hemp – lime building," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 270–275, 2012.
- [22] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Meli, G. Ruggieri, S. Sabbadini, and G. Dotelli, "Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 1051–1061, 2017.
- [23] R. Walker, S. Pavia, and R. Mitchell, "Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 61, pp. 340–348, 2014.
- [24] C. Maalouf, A. D. T. Le, S. B. Umurigirwa, M. Lachi, and O. Douzane, "Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France," *Energy Build.*, vol. 77, pp. 48–57, 2014.
- [25] M. Rahim, O. Douzane, A. D. T. Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, and T. Langlet, "Characterization of flax lime and hemp lime concretes : Hygric properties and moisture buffer capacity," *Energy Build.*, vol. 88, pp. 91–99, 2015.
- [26] V. Cérézo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique," *L'Institut Natl. des Sci. Appliquées Lyon*, p. 247, 2005.
- [27] G. Balciunas, L. Lekunaite-Lukosiune, I. Pundien, and S. Vejelis, "Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical – mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material," vol. 77, pp. 724–734, 2015.
- [28] E. Latif, M. A. Ciupala, and D. C. Wijeyesekera, "The comparative in situ hygrothermal performance of Hemp and Stone Wool insulations in vapour open timber frame wall panels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 205–213, 2014.
- [29] X. Zhou and Z. Li, "Light-weight wood-magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion," *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 382–389, 2012.
- [30] T. A. Plekhanova, J. Keriene, A. Gailius, and G. I. Yakovlev, "Structural, physical and mechanical properties of modified wood-magnesia composite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 9, pp. 1833–1838, 2007.
- [31] T. Smakosz and J. Tejchman, "Evaluation of strength, deformability and failure mode of composite structural insulated panels," *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 1068–1082, 2014.
- [32] L. Ning and C. Bing, "Experimental Investigation Concrete Using Magnesium Phosphate Cement, Fly Ash, and Rape Stalk," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 4, 2016.
- [33] P. K. Donahue and M. D. Aro, "Durable phosphate-bonded natural fiber composite products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 215–219, 2010.
- [34] R. Del Valle-Zermeño, J. E. Aubert, A. Laborel-Préneron, J. Formosa, and J. M. Chimenos, "Preliminary study of the mechanical and hygrothermal properties of hemp-magnesium phosphate cements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 62–68, 2016.
- [35] S. O. Amiandamhen, M. Meincken, and L. Tyhoda, "Magnesium based phosphate cement binder for composite panels: A response surface methodology for optimisation of processing variables in boards produced from agricultural and wood processing industrial residues," *Ind. Crops Prod.*, vol. 94, pp. 746–754, 2016.
- [36] Y. Diquelou, E. Gourlay, L. Arnaud, and B. Kurek, "Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 112–121, 2015.
- [37] E. R. Grist, K. A. Paine, A. Heath, J. Norman, and H. Pinder, "Structural and durability

- properties of hydraulic lime-pozzolan concretes,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 212–223, 2015.
- [38] L. Gregor, “PERFORMANCE OF HEMPCRETE WALLS SUBJECTED TO A STANDARD TIME-TEMPERATURE FIRE CURVE Graduate Certificate in Performance---Based Building and Fire Codes.” 2014.
- [39] Y. Aït Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, and C. Lanos, “Influence of temperature on sorption process in hemp concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 600–607, 2016.
- [40] J. Mussig, “Industrial Applications of Natural Fibres,” *Industrial Applications of natural Fibres*. pp. 10–48, 2010.
- [41] M. Rahim, O. Douzane, A. D. Tran Le, G. Promis, and T. Langlet, “Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes,” *Energy Build.*, vol. 139, pp. 608–615, 2017.
- [42] F. Collet, S. Prétot, and C. Lanos, “Hemp-Straw Composites: Thermal and Hygric Performances,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 294–300, 2017.
- [43] P. de Bruijn and P. Johansson, “Moisture fixation and thermal properties of lime–hemp concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1235–1242, 2013.
- [44] R. Walker and S. Pavia, “Moisture transfer and thermal properties of hemp – lime concretes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 270–276, 2014.
- [45] A. Evrard, C. Flory-Celini, M. Claeys-Bruno, and A. De Herde, “Influence of liquid absorption coefficient on hygrothermal behaviour of an existing brick wall with Lime–Hemp plaster,” *Build. Environ.*, vol. 79, pp. 90–100, 2014.
- [46] PAIC, “DataProc v. 2.1. Siltuma caurlaidības koeficienta aprēķins. Lietotāja rokasgrāmata,” Rīga, 2002.
- [47] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, and L. Goudet, “Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (‘hemcrete’) manufactured by a projection process,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 10, pp. 2116–2123, Oct. 2008.
- [48] H.-R. Kymäläinen and A.-M. Sjöberg, “Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 7, pp. 1261–1269, Jul. 2008.
- [49] E. Sassoni, S. Manzi, A. Motori, M. Montecchi, and M. Canti, “Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization,” *Energy Build.*, vol. 77, pp. 219–226, Jul. 2014.
- [50] A. D. Tran Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz, and F. Collet, “Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1797–1806, Oct. 2010.
- [51] P. S. Bruijn and P. Johansson, “Moisture transport properties of lime–hemp concrete determined over the complete moisture range,” *Biosyst. Eng.*, vol. 122, pp. 31–41, 2014.
- [52] S. Benfratello, C. Capitano, G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, and G. Sorrentino, “Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 745–754, Nov. 2013.
- [53] S. Amziane, L. Arnaud, and N. Challamel, *Bio-aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [54] S. Amziane and F. Collet, “Bio-aggregates Based Building Materials.” RILEM, p. 264, 2017.
- [55] C. Magniont, “Contribution à la formulation et à la caractérisation d’un écomatériau de construction à base d’agrossources,” 2010.
- [56] T. T. Nguyen, “Contribution à l’étude de la formulation et du procédé de fabrication d’éléments de construction en béton de chanvre,” 2010.
- [57] P. Y. Bütschi, C. Deschenaux, B. Miao, and N. K. Srivastava, “Utilisation Du Chanvre Pour La Préfabrication D ’ Éléments De Construction.” pp. 1–6, 2003.
- [58] L. Arnaud and V. Cerezo, *Qualification physique des matériaux de construction à base*

- de chanvre: rapport final, programme de juin 1998 à juin 2001*. CNRS, 2001.
- [59] J. Carmeliet, F. Descamps, and G. Houvenaghel, "A Multiscale Network Model for Simulating Moisture Transfer Properties of Porous Media," *Transp. Porous Media*, vol. 35, no. 1, pp. 67–88, Apr. 1999.
- [60] H. Derluyn, D. Derome, J. Carmeliet, E. Stora, and R. Barbarulo, "Hysteretic moisture behavior of concrete: Modeling and analysis," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 10, pp. 1379–1388, 2012.
- [61] J. Kwiatkowski, M. Woloszyn, and J. J. Roux, "Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 3, pp. 633–642, 2009.
- [62] D. Lelievre, T. Colinart, and P. Glouannec, "Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses," *Energy Build.*, vol. 84, pp. 617–627, 2014.
- [63] Y. A. Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, and C. Lanos, "Influence of temperature on sorption process in hemp concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 600–607, 2016.
- [64] A. Fabbri and F. McGregor, "Impact of the determination of the sorption-desorption curves on the prediction of the hemp concrete hygrothermal behaviour," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 108–116, 2017.
- [65] F. Collet-Foucault, "Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux," 2004.
- [66] A. Evrard, "Transient hygrothermal behavior of Lime- Hemp Materials," no. May 2008, 2008.
- [67] R. Walker and S. Pavia, "Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 270–276, 2014.
- [68] J. Chamoin, "Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation," 2013.
- [69] B. Mazhoud, F. Collet, S. Prétot, and J. Chamoin, "Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters," *Build. Environ.*, vol. 96, pp. 206–216, 2016.
- [70] E. Latif, M. Lawrence, A. Shea, and P. Walker, "Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime," *Build. Environ.*, vol. 93, pp. 199–209, 2015.
- [71] F. Collet, S. Prétot, and C. Lanos, "Hemp-Straw Composites: Thermal And Hygric Performances," *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 294–300, 2017.
- [72] A. Bourdot, T. Moussa, A. Gacoin, C. Maalouf, P. Vazquez, C. Thomachot-Schneider, C. Bliard, A. Merabtime, M. Lachi, O. Douzane, H. Karaky, and G. Polidori, "Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties," *Energy Build.*, vol. 153, pp. 501–512, 2017.
- [73] F. Collet and S. Prétot, "Effect of coating on moisture buffering of hemp concrete," in *The Second International Conference on Building Energy and Environment*, 2012, pp. 878–885.
- [74] M. Sinka, L. Radina, G. Sahmenko, A. Korjakins, and D. Bajare, "ENHANCEMENT OF LIME-HEMP CONCRETE PROPERTIES USING DIFFERENT," *Proc. 1st Int. Conf. Bio-based Build. Mater.*, pp. 301–308, 2015.
- [75] M. Sinka, G. Sahmenko, A. Korjakins, L. Radina, and D. Bajare, "Hemp thermal insulation concrete with alternative binders, analysis of their thermal and mechanical properties," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 96, no. 1.
- [76] M. Sinka and G. Sahmenko, "Sustainable thermal insulation biocomposites from locally available hemp and lime," in *Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources*, 2013, vol. 1.
- [77] E. Gourlay, P. Glé, S. Marceau, C. Foy, and S. Moscardelli, "Effect of water content on



- the acoustical and thermal properties of hemp concretes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 139, pp. 513–523, 2017.
- [78] S. T. Nguyen, A. D. Tran-Le, M. N. Vu, Q. D. To, O. Douzane, and T. Langlet, “Modeling thermal conductivity of hemp insulation material: A multi-scale homogenization approach,” *Build. Environ.*, vol. 107, pp. 127–134, 2016.
- [79] E. Latif, R. M. H. Lawrence, A. D. Shea, and P. Walker, “An experimental investigation into the comparative hygrothermal performance of wall panels incorporating wood fibre, mineral wool and hemp-lime,” *Energy Build.*, vol. 165, pp. 76–91, 2018.
- [80] P. Bouloc, *Le chanvre industriel: production et utilisations*. Editions France Agricole, 2006.
- [81] D. Crônier, B. Monties, and B. Chabbert, “Structure and Chemical Composition of Bast Fibers Isolated from Developing Hemp Stem,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 53, no. 21, pp. 8279–8289, Oct. 2005.
- [82] M. Koivula, H. R. Kymäläinen, J. Virta, H. Hakkarainen, T. Hussein, J. Komulainen, H. Koponen, M. Hautala, K. Hämeri, P. Kanerva, A. Pehkonen, and A. M. Sjöberg, “Emissions from thermal insulations - Part 2: Evaluation of emissions from organic and inorganic insulations,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 6, pp. 803–814, 2005.
- [83] M. Liu, A. Thygesen, J. Summerscales, and A. S. Meyer, “Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: A review,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 108, no. July, pp. 660–683, 2017.
- [84] V. Sabathier, S. Louvel, G. Correa, C. Magniont, P. Evon, and L. Labonne, “INCIDENCE OF THE WATER-SOLUBLE COMPOUNDS CONTAINED INTO LAVENDER AND SUNFLOWER BIOAGGREGATES ON THE HARDENING PROCESS OF MINERAL BINDERS,” 2017, pp. 62–68.
- [85] D. Song, J. Yang, B. Chen, T. Hayat, and A. Alsaedi, “Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain,” *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 916–923, 2016.
- [86] S. Z. Carvalho, F. Vernilli, B. Almeida, M. D. Oliveira, and S. N. Silva, “Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in portland cement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 385–390, 2018.
- [87] M. Uwasu, K. Hara, and H. Yabar, “World cement production and environmental implications,” *Environ. Dev.*, vol. 10, no. 1, pp. 36–47, 2014.
- [88] E. R. Grist, K. A. Paine, A. Heath, J. Norman, and H. Pinder, “The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes,” *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 26–37, 2015.
- [89] L. Mo and D. K. Panesar, “Accelerated carbonation - A potential approach to sequester CO<sub>2</sub> in cement paste containing slag and reactive MgO,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 43, pp. 69–77, 2013.
- [90] Y. A. Criado, M. Alonso, and J. C. Abanades, “Kinetics of the CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> hydration/dehydration reaction for thermochemical energy storage applications,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 32, pp. 12594–12601, 2014.
- [91] J. A. H. Oates, *Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses*. Wiley, 2008.
- [92] P. Bartos, C. Groot, and J. J. Hughes, *PRO 12: International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests*. RILEM Publications, 2000.
- [93] G. Allen, *Hydraulic Lime Mortar for Stone, Brick and Block Masonry: A Best Practice Guide*. Taylor & Francis, 2015.
- [94] Y. A. Criado, M. Alonso, and J. C. Abanades, “Kinetics of the CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> hydration/dehydration reaction for thermochemical energy storage applications,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 32, pp. 12594–12601,

- 2014.
- [95] J. Grilo, P. Faria, R. Veiga, A. Santos Silva, V. Silva, and A. Velosa, “New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 378–384, 2014.
- [96] J. E. Kogel, for Mining Metallurgy, and E. (U.S.), *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006.
- [97] V. M. Malhotra and P. K. Mehta, *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Gordon and Breach, 1996.
- [98] S. A. Walling and J. L. Provis, “Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?,” *Chem. Rev.*, vol. 116, no. 7, pp. 4170–4204, Apr. 2016.
- [99] S. A. Walling and J. L. Provis, “Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?,” *Chem. Rev.*, vol. 116, no. 7, pp. 4170–4204, Apr. 2016.
- [100] F. Schorcht, I. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, and L. D. Sancho, “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.” Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), 2013.
- [101] W. R. EUBANK, “Calcination Studies of Magnesium Oxides,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 34, no. 8, pp. 225–229.
- [102] M. Yildirim and H. Akarsu, “Preparation of Magnesium Oxide (MgO) From Dolomite by Leach-Precipitation-Pyrohydrolysis Process,” *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 44, no. January, pp. 257–272, 2010.
- [103] M. Seeger, W. Otto, W. Flick, F. Bickelhaupt, and O. S. Akkerman, “Magnesium Compounds,” in *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, American Cancer Society, 2011.
- [104] M. Sichel, “Method of producing dental cement,” US 492056 A, 1893.
- [105] D. Ponzani and R. W. Limes, “Basic refractory compositions for intermediate temperature zones,” US 3285758 A, 1966.
- [106] H. Ma, B. Xu, and Z. Li, “Magnesium potassium phosphate cement paste: Degree of reaction, porosity and pore structure,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 65, pp. 96–104, 2014.
- [107] C. Ma and B. Chen, “Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 160–168, 2017.
- [108] D. Singh, V. R. Mandalika, S. J. Parulekar, and A. S. Wagh, “Magnesium potassium phosphate ceramic for 99Tc immobilization,” *J. Nucl. Mater.*, vol. 348, no. 3, pp. 272–282, 2006.
- [109] A. S. Wagh, R. Strain, S. Y. Jeong, D. Reed, T. Krause, and D. Singh, “Stabilization of Rocky Flats Pu-contaminated ash within chemically bonded phosphate ceramics,” *J. Nucl. Mater.*, vol. 265, no. 3, pp. 295–307, 1999.
- [110] G. Zhang, G. Li, and T. He, “Effects of sulphoaluminate cement on the strength and water stability of magnesium potassium phosphate cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 335–342, 2017.
- [111] B. Xu, H. Ma, C. Hu, S. Yang, and Z. Li, “Influence of curing regimes on mechanical properties of magnesium oxychloride cement-based composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 613–619, 2016.
- [112] S. Soeel, “Stanislas soeel,” US53092 A, 1866.
- [113] S. Sorel, “Sur un nouveau ciment magnésien,” *C. R. Hebd. Séances Acad. Sci.*, vol. 65, pp. 102–104, 1867.
- [114] J. B. Shaw<sup>1</sup> and G. A. Bole, “NEW DEVELOPMENTS IN OXYCHLORIDE STUCCO AND FLOORING<sup>1</sup>,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 5, no. 6, pp. 311–321, Jun. 1922.
- [115] S. Malkin and C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining*

- with *Abrasives*. Industrial Press: New York, 2008.
- [116] J. H. Paterson, "Magnesium oxychloride cement," *J. Soc. Chem. Ind.*, vol. 43, no. 9, pp. 215–218, Feb. 1924.
- [117] E. F. Greenleaf, "Rubber deck covering used on ships," *Bur. Ships J.*, vol. 1, no. 3, pp. 26–29, 1952.
- [118] Y. Li, H. Yu, L. Zheng, J. Wen, C. Wu, and Y. Tan, "Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 1–7, 2013.
- [119] F. Prymelski and V. . Zur, "Xyloolith building boards and sheets," US 3788870 A, 1974.
- [120] F. Prymelski, "Building materials in the form of woodstone panels or sheets and processes for their production." Google Patents, 1979.
- [121] Magnesium Oxide Board Corporation, "Magnesium Oxide Board Corporation Product Range," 2017.
- [122] Euroform, "Euroform product range," 2017.
- [123] M. E. Feigin and T. S. Choi, "Magnesium oxide-based construction board," US 7998547 B2, 2011.
- [124] T. H. Bjarne Kristoffersen, Anne Steen-Hansen, O. G. Birgit Östman, Patrik Johansson, Martin Pauner, and P. J. Hovde, "Nordtest project 1526-01 'Using the Cone Calorimeter for screening and control testing of fire retarded wood products'." p. 64.
- [125] M. Klamer, E. Morsing, and T. Husemoen, "Fungal growth on different insulation materials exposed to different moisture regimes," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 54, no. 4, pp. 277–282, 2004.
- [126] A. Jakovičs, *BŪVKONSTRUKCIJU ENERGOEFEKTIVITĀTE UN ILGTSPĒJA LATVIJAS KLIMATĀ*. 2013.
- [127] S. Gendelis, "Ēkas Siltumfizikālo Procesu Kompleksā Analīze." p. 274, 2012.
- [128] Ģ. Būmanis, "Sārnu aktivizētas saistvielas un to pielietojums," RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE, 2015.
- [129] L. Dembovska, D. Bajare, V. Ducman, L. Korat, and G. Bumanis, "The use of different by-products in the production of lightweight alkali activated building materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 315–322, 2017.
- [130] G. Bumanis, L. Vitola, D. Bajare, L. Dembovska, and I. Pundiene, "Impact of reactive SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio in precursor on durability of porous alkali activated materials," *Ceram. Int.*, no. December 2016, pp. 0–1, 2017.
- [131] A. Korjakins, G. Shakhmenko, and G. Bumanis, "Utilisation of Borosilicate Glass Waste as a Micro-Filler for Concrete," *Davidpublishing.Com*, vol. 7, no. 9, pp. 876–883, 2012.
- [132] Cerezo Véronique, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique," 2005.
- [133] E. Bukšāns, "Koksnes materiālu ugunsdrošību ietekmējošie faktori un ugunsreakcijas prognozēšana." Jelgava, p. 127, 2010.
- [134] Y. Fang, P. Cui, Z. Ding, and J. X. Zhu, "Properties of a magnesium phosphate cement-based fire-retardant coating containing glass fiber or glass fiber powder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 162, pp. 553–560, 2018.
- [135] M. Hegedűs, E. Tóth-Bodrogi, S. Németh, J. Somlai, and T. Kovács, "Radiological investigation of phosphate fertilizers: Leaching studies," *J. Environ. Radioact.*, vol. 173, pp. 34–43, 2017.
- [136] N. Shen, Y. Cui, W. Xu, X. Zhao, and L. Yang, "Impact of phosphorus and potassium fertilizers on growth and anthraquinone content in *Rheum tanguticum* Maxim. ex Balf," *Industrial Crops and Products*, vol. 107, pp. 312–319, 2017.
- [137] E. M. M. Ali, A. Z. I. Almagboul, S. M. E. Khogali, and U. M. A. Gergeir, "Antimicrobial Activity of *Cannabis sativa* L.," *Chinese Medicine*, vol. 3, no. March, pp. 61–64, 2012.

- [138] J. Bech–Andersen, “Indoor climate and moulds,” *Holte, Hussvamp Lab. Publ.*
- [139] P. H. Vance, F. Schaeffer, P. Terry, E. Trevino, and A. S. Weissfeld, “Mold Causes and Effects ‘in a Material World,’” *Clin. Microbiol. Newsl.*, vol. 38, no. 14, pp. 111–116, 2016.
- [140] Z.-G. Ding, J.-H. Ding, J.-Y. Zhao, W.-X. Chunyu, M.-G. Li, S.-J. Gu, F. Wang, and M.-L. Wen, “A new phenylspirodrimane dimer from the fungus *Stachybotrys chartarum*,” *Fitoterapia*, vol. 125, pp. 94–97, 2018.
- [141] M. A. Hossain, M. S. Ahmed, and M. A. Ghannoum, “Attributes of *Stachybotrys chartarum* and its association with human disease,” *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 113, no. 2, pp. 200–208, 2004.
- [142] T. Verdier, M. Coutand, A. Bertron, and C. Roques, “A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods,” *Build. Environ.*, vol. 80, pp. 136–149, 2014.
- [143] M. Scarpa, P. Ruggeri, F. Peron, M. Celebrin, and M. De Bei, “New Measurement Procedure for U-value Assessment via Heat Flow Meter,” *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 174–181, 2017.
- [144] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer, and M. Spielmann, “The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp),” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 10, no. 1, pp. 3–9, 2005.
- [145] J. Guinée, *Handbook on Life Cycle Assessment*. Springer Netherlands, 2002.
- [146] M. Guo, *Life Cycle Assessment (LCA) of Light-Weight Eco-composites*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [147] M. Sinka, P. Van Den Heede, N. De Belie, D. Bajare, G. Sahmenko, and A. Korjakins, “Comparative life cycle assessment of magnesium binders as an alternative for hemp concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 133C, pp. 288–299, 2018.
- [148] P. Pawelzik, M. Carus, J. Hotchkiss, R. Narayan, S. Selke, M. Wellisch, M. Weiss, B. Wicke, and M. K. Patel, “Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials - Reviewing methodologies and deriving recommendations,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 73, pp. 211–228, 2013.
- [149] F. Ardente and M. Cellura, “Economic Allocation in Life Cycle Assessment: The State of the Art and Discussion of Examples,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 16, no. 3, pp. 387–398, 2012.
- [150] V. Stramkale, “Research of hemp cultivation in Latvia by ‘Latgale Agriculture Research Centre,’” 2012.
- [151] V. Stramkale, “Multipurpose hemp for bioproducts and biomass. Latgale Agriculture Research Centre.” Latgale Agriculture Research Centre, Vilani, 2015.
- [152] V. Stramkale, “„Industriālo kaņepju (*Cannabis sativa* L.) audzēšanas un novākšanas tehnoloģiju izstrāde produkcijas ieguvei ar augstu pievienoto vērtību” Pārskats par 2013. gadu,” Viļāni, 2013.
- [153] L. Turunen and H. M. G. van der Werf, “Life Cycle Analysis of Hemp Textile Yarn, Comparison of Three Hemp Fiber Processing Scenarios and a Flax Scenario,” *INRA-French Natl. Inst. Agron. ...*, no. May, 2006.
- [154] K. Ip and A. Miller, “Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 69, pp. 1–9, Dec. 2012.
- [155] M. A. Shand, *The Chemistry and Technology of Magnesia*. John Wiley and Sons, Inc., 2006.
- [156] B. K. Chakrabarti, “Investigations on heat loss through the kiln shell in magnesite dead burning process: A case study,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 22, no. 12, pp. 1339–1345, 2002.
- [157] J. A. Kent, *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*. Springer Science & Business Media, 2013.

- [158] M.-P. Boutin, C. FLAMIN, S. QUINTON, G. GOSSE, and I. Lille, "ETUDE DES CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES DU CHANVRE PAR L'ANALYSE DE SON CYCLE DE VIE," 2006.
- [159] J. L. Galvez-Martos, J. Morrison, G. Jauffret, E. Elsarrag, Y. AlHorr, M. S. Imbabi, and F. P. Glasser, "Environmental assessment of aqueous alkaline absorption of carbon dioxide and its use to produce a construction material," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 107, pp. 129–141, 2016.
- [160] S. Ruan and C. Unluer, "Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, no. x, pp. 258–273, 2016.
- [161] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, and E. Gartner, "Cement and carbon emissions," *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 6, pp. 1055–1065, 2013.
- [162] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, and R. Samson, "Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment," *J. Ind. Ecol.*, vol. 17, no. 1, pp. 117–128, 2013.
- [163] F. Krause, "Dynamic and Traditional Life Cycle Assessment of a 'zero carbon' Wall Element," Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2017.



**Māris Šinka** ir dzimis 1988. gadā Rīgā, Latvijā. 2012. gadā Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Būvniecības fakultātē ieguvis bakalaura grādu būvniecībā un inženiera kvalifikāciju, 2013. gadā – profesionālā maģistra grādu būvniecībā (Mg. Sc. Ing.).

Dabīgo šķiedru biokompozītus M. Šinka pēta jau 8 gadus. Šobrīd strādā kā pētnieks Būvmateriālu un būvizstrādājumu katedrā. Piedalījies vairākos pētījumu projektos, gan Valsts pētījumu programmas, gan ERAF ietvaros, kur pētījis un izstrādājis, galvenokārt, dabīgo šķiedru biokompozītus.

M. Šinka ir arī sertificēts būvuzraugs. Savā profesionālajā darbībā uzraudzījis vairāku nozīmīgu objektu būvniecību, tajā skaitā Daugavas stadiona Rīgā rekonstrukciju 2017.–2018. gadā.

---

**Maris Sinka** was born in 1988, in Riga, Latvia. In 2012, he obtained the Bachelor`s degree in Civil Engineering as well as the qualification of Civil Engineer from Riga Technical University (RTU), and in 2013 received the Professional Master`s degree in Civil Engineering (Mg. Sc. Ing.).

M. Sinka has been studying natural fiber biocomposites for 8 years. Currently he is working as a researcher in the Department of Building Materials and Building Products. He has participated in several research projects, both in the framework of the National Research Programme and the ERDF, where he studied and developed natural fiber biocomposites.

M. Sinka is also a certified construction supervisor. In his professional career, he has supervised the construction of several significant projects, including the reconstruction of the Daugava stadium in Riga in 2017 to 2018.