

Pauls Pāvils Ārgalis

KOKSNES-CEMENTA SATUROŠU RAŽOŠANAS ATLIKUMU PĀRSTRĀDE INOVATĪVOS BŪVMATERIĀLOS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūts

Pauls Pāvils Ārgalis

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

**KOKSNES-CEMENTA SATUROŠU RAŽOŠANAS
ATLIKUMU PĀRSTRĀDE INOVATĪVOS
BŪVMATERIĀLOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesore *Dr. sc. ing.*

DIĀNA BAJĀRE

vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.*

MĀRIS ŠINKA

RTU Izdevniecība

Rīga 2025

Ārgalis, P. P. Koksnes-cementa saturošu ražošanas atlikumu pārstrāde inovatīvos būvmateriālos. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 49 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-06" 2025. gada 4. jūnija lēmumu, protokols Nr. 04030- 9.6/6.

Vislielākā pateicība manai ģimenei, kas ir bijusi man tuva, motivējot un uzmundrinot mani šī procesa laikā! Paldies jums! Kā reiz teica kāds dižens cilvēks: **"Labāk, kā būs, nebūs!"**

Vāka attēls no SIA "CEWOOD", autors – Māris Šmits.

<https://doi.org/10.7250/9789934372025>
ISBN 978-9934-37-202-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 19. septembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6a, 342. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētā profesore *Dr. sc. ing.* Līva Pupure,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Ph. D. Jiří Zach,*
Brno Tehnoloģiju universitāte, Čehija

Profesore *Ph. D. Džigita Nagrockienė,*
Vilņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Pauls Pāvils Ārgalis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, astoņas nodaļas, secinājumi, 99 attēli, 28 tabulas, kopā 139 lappuses. Literatūras sarakstā ir 245 nosaukumi.

SATURS

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI.....	6
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	7
TĒMAS AKTUALITĀTE UN PROBLĒMAS NOSTĀDNE	7
PROMOCIJAS DARBA MĒRĶIS	8
PROMOCIJAS DARBA UZDEVUMI	8
PĒTĪUMA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	8
PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKAIS NOZĪMĪGUMS	9
PĒTĪŠANAS METODIKA	10
PĒTĪUMA ROBEŽAS	11
AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTĀS TĒZES	11
PROMOCIJAS DARBA SASTĀVS UN APJOMS	11
PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTU APROBĀCIJA	12
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS	12
1. KLIMATA STRATĒGIJAS UN IETEKME UZ VIDI LATVIJĀ	14
2. KOKSNES VILNAS UN CEMENTA PANĒLI.....	15
3. PORTLANDCEMENTA BĀZES SAISTVIELU REAKTIVIZĀCIJA.....	16
4. MATERIĀLI UN METODES.....	17
4.1. IZEJMATERIĀLI.....	17
<i>Slīpputekļi (SD).....</i>	17
<i>Ražošanas līnijas atlikumi (PLW).....</i>	17
<i>Citi materiāli.....</i>	18
4.2. SLĪPPUTEKĻU MODIFIKĀCIJA.....	18
4.3. TESTĒŠANAS METODES	18
4.4. DŽĪVES CIKLA NOVĒRTĒJUMS.....	19
5. MALŠANAS IETEKME UZ SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJU.....	20
5.1. SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJA AR PLANETĀRAJĀM LODIŠU DZIRNAVĀM	20
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	20
<i>Rezultāti</i>	20
5.2. SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJA AR DEZINTEGRATORU	21
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	21
<i>Rezultāti</i>	21
5.3. SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJA AR VIBRĀCIJU MALĒJU	22
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	22
<i>Rezultāti</i>	22
5.4. NODAĻAS KOPSAVILKUMS	23
6. TERMISKĀS APSTRĀDES IETEKME UZ SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJU.....	24
6.1. SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJA AR MUPEĻKRĀSNI.....	24
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	24
<i>Rezultāti</i>	24
6.2. NODAĻAS KOPSAVILKUMS	29
7. BIOKOMPOZĪTU AR REAKTIVIZĒTĀM SAISTVIELĀM RAKSTUROJUMS UN VEIKTSPĒJA	30

7.1. BIOKOMPOZĪTI AR MEHĀNISKI AKTIVIZĒTU SAISTVIELU	30
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	30
<i>Rezultāti un diskusija</i>	30
7.2. BIOKOMPOZĪTI AR TERMISKI APSTRĀDĀTIEM SLĪPPUTEKĻIEM	32
7.2.1. <i>Biokompozīti ar 450 °C temperatūrā karsētiem slīpputekļiem</i>	32
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	32
<i>Rezultāti</i>	32
7.2.2. <i>Biokompozīti ar 600 °C temperatūrā karsētiem slīpputekļiem</i>	34
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	34
<i>Rezultāti</i>	34
7.3. BIOKOMPOZĪTI AR CEM II/A-LL 42.5 N	37
<i>Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana</i>	37
<i>Rezultāti un diskusija</i>	38
7.4. BIOKOMPOZĪTU DEMONSTRĒŠANA	39
7.5. NODAĻAS KOPSAVILKUMS	40
8. IZVEIDOTO BIOKOMPOZĪTU DZĪVES CIKLA NOVĒRTĒJUMS	42
SECINĀJUMI	43
IZMANTOTIE LITERATŪRAS AVOTI.....	44

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

CDW – būvmateriālu ražošanas un būvju nojaukšanas atlikumi (no angļu valodas “*Construction and Demolition Waste*”)

LVGMC – Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs

ES – Eiropas Savienība

NEKP – Nacionālais enerģētikas un klimata plāns

nZEB – gandrīz nulles emisiju ēkas (no angļu valodas “*nearly Zero Energy Building*”)

GPP – zaļais publiskais iepirkums (no angļu valodas “*Green Public Procurement*”)

WMP – atlikumu apsaimniekošanas plāns (no angļu valodas “*Waste Management Plan*”)

URC – pilsētas pārstrādes centrs (no angļu valodas “*Urban Recycling Centre*”)

LCA – dzīves cikla novērtējums (no angļu valodas “*Life Cycle Assessment*”)

WWCP – koksnes vilnas cementa paneļi (no angļu valodas “*Wood-Wool Cement Panels*”)

CEM I – > 95 % cementa klinkera saistviela $\geq 52,5$ MPa 28. dienā.

CEM II/A-LL 42.5 N – cementa klinkera un kaļķakmens saistviela $\geq 42,5$ MPa 28. dienā.

PLW – ražošanas līnijas atlikumi (no angļu valodas “*Production Line Waste*”)

TG – termogravimetrija

DTA – diferenciālā termiskā analīze

XRF – rentgenstaru fluorescence (no angļu valodas “*X-Ray Fluorescence*”)

XRD – rentgenstaru difrakcija (no angļu valodas “*X-Ray Diffraction*”)

C-S-H – kalcija silikāta hidrāts

C₂S – belīta fāze

C₃S – alīta fāze

AFm – monosulfoalumināta fāze

AFt – ettringīta fāze

W/B ratio – ūdens/saistvielas attiecība

W/F ratio – ūdens/pildvielas attiecība

W/C ratio – ūdens/cementa attiecība

AAC – gāzbetons (no angļu valodas “*Autoclaved Aerated Concrete*”)

ECCB – keramzītcementa bloks (no angļu valodas “*Expanded Clay Cement Blocks*”)

CBB – keramikas celtniecības bloks (no angļu valodas “*Clay Building Block*”)

EPS – putupolistirols (no angļu valodas “*Expanded Polystyrene*”)

SW – minerālvate (no angļu valodas “*Stone Wool*”)

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Būvniecības nozare negatīvi ietekmē vides problēmas Latvijā un pasaulē, jo īpaši saistībā ar Eiropas Savienības (ES) vērējamajiem klimata neitralitātes mērķiem līdz 2050. gadam [1, 2]. Lai gan būvniecības nozare ir būtiska ekonomikas attīstībai, pasaulē tā saskaras ar pieaugošu spiedienu samazināt tās ietekmi uz vidi, īpaši attiecībā uz atlikumu apsaimniekošanu un resursu efektivitāti. Latvijā pastāvošā būvmateriālu ražošanas un būvju nojaukšanas atlikumu (*CDW*) apsaimniekošanas prakse [3], kā arī ievērojamās nozares CO₂ emisijas uzsvēr steidzamo nepieciešamību pēc inovatīviem ilgtspējīgiem risinājumiem, kas atbilst gan valsts vides politikai [4], gan ES direktīvām par aprites ekonomikas pāreju [5].

Tiek lēsts, ka viena tonna portlandcimenta rada aptuveni 0,8 tonnas CO₂ SEG emisiju. Aptuveni 8 % no pasaules enerģijas patēriņa ir tieši saistīti ar portlandcimenta ražošanas procesu [6, 7]. Līdz ar to jaunu alternatīvu saistvielu ieviešana būvniecības nozarē ir ļoti svarīga ilgtspējas nodrošināšanai. Būvniecības un nojaukšanas atlikumi ir lieliski izejmateriāli jaunu pārstrādes metožu un alternatīvu materiālu izmēģināšanai un ieviešanai tirgū. Portlandcimenta saistvielu reaktivizācija ir būtisks tehnoloģisks pavērsiens būvmateriālu otrreizējā pārstrādē, kas piedāvā daudzsoļus veidus atlikumu samazināšanai un resursu optimizācijai. Pašreizējās tehnoloģijas, tostarp mehāniskās [8], termiskās [9] un ķīmiskās aktivizācijas metodes [10], uzrāda dažādas efektivitātes pakāpes cementa reaktivizācijas un atkārtotā izmantošanā. Tomēr šie procesi bieži vien joprojām ir energoietilpīgi un ekonomiski sarežģīti, tādējādi uzsvērot nepieciešamību pēc efektīvākām un ilgtspējīgākām saistvielu pārstrādes un reaktivizācijas metodēm [11].

Sabiedrības uztvere un tirgus skeptiskums par otrreiz pārstrādātiem būvmateriāliem attiecībā uz to veikspēju un uzticamību ir būtisks šķērslis to plašai ieviešanai [3]. Neraugoties uz testēšanas standartiem un kvalitātes nodrošināšanas pasākumiem, kas var apstiprināt no otrreizējiem resursiem ražotu materiālu mehāniskās un fizikālās īpašības, šie produkti būvniecības tirgū bieži saskaras ar nepamatotu stigmatizāciju. Šī pretestība uzsvēr nepieciešamību pēc tehniskiem jauninājumiem un sistemātiskai veikspējas rādītāju demonstrējumiem, kas atbilst vai pārsniedz nozares standartus.

Sacietējusā cementa saistvielas reaktivizācija no būvniecības un nojaukšanas atlikumiem galvenokārt ir vērsta uz betona un javas pārstrādi, kuras efektivitāte lielā mērā ir atkarīga no atdalīšanas metodēm no pildvielām, izmantojot mehāniskus, termiskus vai ķīmiskus procesus [12, 13]. Tomēr šie tradicionālie avoti nav vienīgā potenciālā izejviela. Koksnes vilnas cementa paneļi, kas parasti satur 25–40 % cementa saistvielas pēc svara [14], ir vēl viens nozīmīgs cementa atlikumu avots. Kopš šo materiālu ieviešanas 20. gadsimta 20. gados tie ir plaši izmantoti visā Eiropā to siltumizolācijas un akustisko īpašību dēļ. Paredzams, ka šogad pasaulē tiks saražoti aptuveni 174 miljoni m² koksnes vilnas cementa paneļu, no kuriem 25 % tiek ražoti Eiropā [15]. Šis ievērojamais ražošanas apjoms rada ievērojamus ražošanas atlikumus, kā arī defektētus un nolietotus produktus, kas piemēroti cementa saistvielas reaktivizācijai.

Koksni un cementu saturoši ražošanas atlikumi rodas dažādos ražošanas posmos, piemēram, veidošanas, griešanas, apstrādes un galīgās šķirošanas procesā, kur zemākas kvalitātes produkti tiek atdalīti no augstākas kvalitātes produktiem. Arī nolietoto produktu otrreizēja pārstrāde ir iespējama ar tādām pašām pārstrādes metodēm kā ražošanas atlikumu pārstrāde. Tradicionāli ražošanas atlikumi un nolietotie produkti tiek nogādāti atlikumu poligonos. Tie var radīt piesārņojumu, tāpēc tiek meklētas

optimālas tehnoloģijas, lai šos atlikumus efektīvi pārstrādātu izejmateriālos (koksnes vilnā un reaktivizēta cementa saistvielā), ko var izmantot jaunu būvizstrādājumu ražošanā.

Ņemot vērā pieaugošo tirgus pieprasījumu pēc ilgtspējīgiem būvmateriāliem, joprojām pastāv kritisks pētniecības trūkums attiecībā uz efektīvu koksnes vilnas cementa paneļu (*WWCP*) ražošanas atlikumu pārstrādi un atkārtotu izmantošanu. Bieži vien ražošanas uzņēmumi neapzinās savu atlikumu vērtību vai tiem nav pieejamas optimālas pārstrādes tehnoloģijas, un atlikumi tiek nogādāti poligonos. Šis pētījums risina šo problēmu, pētot inovatīvas metodes, kā ražošanas un noliektos atlikumus pārvērst izejvielās, kas izmantojamas būvmateriālu ražošanai ar mazāku ietekmi uz vidi, tādējādi veicinot atlikumu samazināšanu un resursu efektivitāti būvniecības nozarē.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodi koksnes vilnas cementa paneļu būvmateriālu ražošanas un būvju nojaukšanas atlikumu daļējai atdalīšanai un otrreizējai pārstrādei jaunās izejvielās inovatīviem daudzslāņu celtniecības paneļiem ar samazinātu ietekmi uz vidi.

Promocijas darba uzdevumi

Mērķa sasniegšanai ir definēti vairāki promocijas darba uzdevumi.

1. **Noteikt** prasības un izstrādāt metodi, kā visefektīvāk atdalīt koksnes vilnas cementa plātņu būvmateriālu ražošanas un būvju nojaukšanas atlikumus koksne un sacietējušā cementa pastā.
2. **Izstrādāt un optimizēt** atdalītās sacietējušās cementa pastas reaktivizācijas metodi.
3. **Noteikt** reaktivizētās saistvielas īpašības un noteikt tās lietojumu būvniecībā.
4. **Izstrādāt un raksturot** biokompozītu īpašības daudzslāņu paneļiem, izmantojot reaktivizētas saistvielas un ražošanas līnijas atlikumus.
5. **Demonstrēt** daudzslāņu paneļu lietojumu reālā ekspluatācijas vidē (TRL6).
6. **Apstiprināt** izstrādāto biokompozītu ekoloģiskumu, veicot dzīves cikla novērtējumu un salīdzinājumu ar komerciāli pieejamiem produktiem.

Pētījuma zinātniskā novitāte

Šis pētījums sniedz ieguldījumu būvmateriālu aprites, *Green Deal* iniciatīvu un būvniecības nozares ilgtspējas veicināšanā. Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodi koksnes vilnas cementa paneļu būvmateriālu ražošanas un būvju nojaukšanas atlikumu pārstrādāšanai jaunās izejvielās inovatīviem daudzslāņu būvmateriālu paneļiem ar samazinātu ietekmi uz vidi.

Tika savākti un analizēti atlikumi, kas radušies koksnes vilnas cementa paneļu ražošanā un noliektoto produktu savākšanā. Tika optimizēts hidratētās cementa pastas un koksnes vilnas atdalīšanas process. Tika izpētīta hidratētās cementa pastas reaktivizācija, izmantojot malšanas un termiskās apstrādes metodes, lai atjaunotu cementa saistvielas īpašības.

Pirmo reizi reaktivizētas portlandcimenta bāzes saistvielas tika izstrādātas, izmantojot koksnes vilnas cementa paneļu ražošanas atlikumus un noliektos produktus. Atdalītā koksnes vilna un reaktivizētā cementa saistviela tika izmantota jaunu biokompozītu izstrādē. Šie biokompozīti, kas veidoti no sekundārām izejvielām, uzrādīja dažādas mehāniskās un termiskās īpašības. Tika

demonstrēts biokompozītu lietojums pašnesošu daudzslāņu būvpaneļu ražošanā ar lieliskām hidrotermiskajām īpašībām un samazinātu ietekmi uz vidi.

Optimizētie malšanas parametri hidratētas cementa pastas pārstrādei efektīvi sadrumstaloja hidratētā cementa konglomerātus, ļaujot izdalīties nehidratētiem cementa minerāliem. Tika pārbaudīta hidratētas cementa pastas dezintegratora, planetāro lodīšu un vibrācijas malšanas efektivitāte, īpašības un ietekme. Mainot malšanas parametrus, tika izstrādātas dažādas reaktivizētas saistvielas, kas ļāva iegūt paraugus ar spiedes stiprību no 0,5 MPa līdz 15,4 MPa 28. dienā.

Termiskās apstrādes metodes pierādīja cementa saistvielas reaktivizāciju iespēju, dehidrējot hidratētos minerālus. Termiskā apstrāde sākās aptuveni 450 °C temperatūrā, kad portlandīts sāka dehidratēties. Pie 600 °C sākās kalcija silikāta hidratu (C-SH) dehidratācija. Reaktivizēto saistvielu saturošie dehidratētie C-SH produkti ietekmē saistvielas fizikālās un mehāniskās īpašības.

Koksnes vilnas cementa paneļu ražošanā izmantotais cements parasti satur zināmu daudzumu smalka kaļķakmens. Cementa klinkerī esošais brīvais kaļķis un Ca(OH)_2 , kas var veidoties kā hidratācijas produkti saistvielas struktūrā, var karbonatizēties pārstrādātu koksnes vilnas cementa paneļu ilgā kalpošanas laikā. Hidratētās cementa pastas termiskā apstrāde 900 °C temperatūrā izraisa CaCO_3 dekarbonizāciju, taču izrādījās neefektīva, jo atmosfērā izdalījās CO_2 , kas nebija plānots. Ņemot vērā siltumenerģijas emisijas un reakcijas rezultātā izdalīto CO_2 , augsttemperatūras termiskās apstrādes metode nav ilgtspējīga cementa saistvielas reaktivizēšanas metode. Karsēšana zem 900 °C izrādījās ilgtspējīgāka metode, ko var izmantot rūpnieciskā mērogā. Reaktivizētās saistvielas izrādījās efektīvas, un tās var izmantot kā sekundāro cementa saistvielu cementa maisījumos, 28. dienā sasniedzot no 1,6 MPa līdz 19,6 MPa spiedes stiprību un samazinot minēto materiālu ietekmi uz vidi.

Inovācija, kas saistīta ar biokompozītu siltumvadītspējas uzlabošanu, ietver noteikta daudzuma kaņepju spaļu iekļaušanu sastāvā. Pamatojoties uz pētījumu iegūtajām zināšanām, ir izstrādāti jauni biokompozīti, galvenokārt izmantojot ražošanas līnijas atlikumus, kā pildvielas materiālu pievienojot līdz 75 % kaņepju spaļu. Pamatojoties uz kaņepju spaļu mikrostruktūru, ir pierādīts, ka tas ir efektīvs siltumizolācijas materiāls un ka to pievienošana samazina siltumvadītspējas koeficientu.

Izstrādāto biokompozītu rezultātā tika iegūts pašnesošs, zema līdz vidēja blīvuma (170–780 kg/m³) siltumizolācijas materiāls ar spiedes stiprību līdz 1,4 MPa un siltumvadītspēju 0,052–0,139 W/(m·K). Izstrādātajiem biokompozītiem ir veikts ietekmes uz vidi novērtējums, un ir konstatēts, ka tie atbilst ES *Green Deal* vadlīnijām, samazinot kopējās emisijas no 1 m³ biokompozīta par 26–58 %, salīdzinot ar cementa bāzes alternatīvām.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Cementa saistvielu reaktivizācija tiek uzskatīta par sarežģītu, energoietilpīgu un neefektīvu procesu, un daudzās valstīs nav standartu, kas reglamentētu reaktivizēta cementa ražošanu un izmantošanu būvniecībā. No ES *Green Deal* viedokļa raugoties, reaktivizētas cementa saistvielas ir ideāls risinājums būvniecības procesu ilgtspējas nodrošināšanai – reaktivizētās cementa saistvielas var izmantot rūpniecības blakusproduktus un atlikumus kā prekursorus, tādējādi samazinot neatjaunojamo resursu patēriņu, un tās var ražot ar mazāku ietekmi uz vidi, salīdzinot ar svaigu portlandcements bāzes saistvielu.

Padziļināta izpratne par pārstrādātu saistvielu izmantošanas iespējām un priekšrocībām var palielināt aprites pieejas popularitāti būvniecības nozares profesionāļu vidū. Promocijas darbā aprakstīti pētījumu rezultāti par alternatīvām saistvielām, kas iegūtas no vietējiem rūpniecības

atlikumiem, izmantojot vai nu malšanas, vai termiskās apstrādes metodes. Promocijas darbā iegūtos rezultātus var izmantot arī pedagoģiskiem mērķiem, kas saistīti ar būvniecību, materiālzinātni un ķīmiju. Gadā pārveidojot aptuveni 450 000 m³ atlikumu par potenciālām izejvielām, pētījums piedāvā reālu risinājumu rūpniecisko atlikumu apsaimniekošanai. Tas parāda skaidru ceļu, kā to, kas kādreiz tika uzskatīts par atlikumiem, pārvērst vērtīgos, videi draudzīgos materiālos ar potenciālu lietojumu būvniecības un ražošanas nozarēs.

Reaktivizētās saistvielas ražošana no rūpniecības atlikumproduktiem ļauj iegūt saistvielu, kuras spiedes stiprība ir līdz 20 MPa, 28. dienā. Izmantojot izstrādātās saistvielas un ražošanas līnijas atlikumus kā pildvielu, tika iegūts pašnesošs, zema līdz vidēja blīvuma (170–780 kg/m³) siltumizolācijas materiāls ar spiedes stiprību līdz 1,4 MPa un siltumvadītspēju 0,052–0,139 W/(m·K).

Pētīšanas metodika

Saistvielas un biokompozītu raksturošanai tika izmantotas vairākas standartizētas metodes, lai nodrošinātu precīzus un reproducējamus rezultātus. Saistvielas **granulometrija** tika veikta saskaņā ar *ASTM C136* standartu, izmantojot slīpputekļu (koksnes vilnas cementa paneļu ražošanas atlikumi) sietus, kuru izmēri ir no 0,125 mm līdz 8 mm. Pēc javu izveides, javas tika novietotas samitrinātā konusā uz *ASTM C143* trieciena galda, un tika pārbaudīta javu **plūstamība**.

Materiāla blīvums tika aprēķināts matemātiski pēc paraugu izmēriem un masas. Spiedes stiprības testi tika veikti, izmantojot *Zwick Z100* universālo testēšanas sistēmu ar ātrumu 0,5 mm/min. **Spiedes stiprība** tika aprēķināta, pamatojoties uz parauga laukumam pielikto spēku. Pirms testēšanas 7., 14. un 28. dienā paraugi 16 stundas tika žāvēti 45 °C temperatūrā, lai noņemtu lieko mitrumu.

Ar lāzerdifrakcijas metodi (*CILAS 1090*) tika analizēts **kumulatīvo daļiņu sadalījums** no 0,10 μm līdz 500,00 μm. Lai noteiktu paraugu elementu sastāvu, tika izmantota **rentgenfluorescences (XRF)** metode, izmantojot *Rigaku ZXS PrimusIV*, kas nodrošināja detalizētu ķīmisko elementu oksīdu analīzi. **Rentgenstaru difraktometriskā (XRD)** analīze tika veikta ar rentgenstaru difraktometru *BRUKER-AXS D8 ADVANCE*, izmantojot *CuKα1* un *CuKα2* starojumu 2θ diapazonā no 10° līdz 70°. **Termiskās īpašības** tika novērtētas, izmantojot *Mettler Toledo TGA1/SF* termogravimetriskās analīzes iekārtu, analīzes veicot no 25 °C līdz 900 °C temperatūrā ar ātrumu 10 °C/min gaisa vidē.

Biokompozītiem **makrostruktūra un vizuālais izskats** tika novērtēts, izmantojot *Veho HDMI Dual Vision Digital* mikroskopu. **Siltumvadītspēja** tika mērīta ar *LaserComp FOX600* siltuma plūsmas mērītāju saskaņā ar *LVS EN 12667* vadlīnijām, izmantojot testa iestatījumus 0 °C augšējai plāksnei un 20 °C apakšējai plāksnei. **Lieces un spiedes stiprības** testi tika veikti, izmantojot universālo testēšanas mašīnu *Zwick Z100* ar ātrumu 0,5 mm/min, ievērojot *BS EN 12390-3* standartus. Spiedes stiprība tika mērīta gan paralēli, gan perpendikulāri iestrādes virzienam, veicot testus līdz 10 % un 20 % relatīvajām deformācijām iestrādes virzienā un 10 % slodzei no parauga augstuma perpendikulārā iestrādes virzienā. Trim paralēliem paraugiem tika mērīta izturība pret liešanas virzienu perpendikulāri formēšanas virzienam. Lieces stiprība tika noteikta perpendikulāri iestrādes virzienam trim paralēliem paraugiem.

Lai novērtētu saistvielu un biokompozītu ilgtspēju, tika izmantoti **dzīves cikla analīzes (LCA)** principi. Analīzē tika salīdzināts 1 kg saistvielas (izstrādātās saistvielas un portlandcimenta) un biokompozītu ar tādām komerciāli pieejamām alternatīvām kā minerālvate un *EPS*, saglabājot *U* vērtību 0,18 W/(m²·K). Aprēķini tika veikti, izmantojot *SimaPro* platformu, izmantojot *NE 15804 + A2 V1.03* metodi saskaņā ar būvmateriālu produktu kategorijas noteikumiem (*PCR*).

Pētījuma robežas

Pētījuma robežas tiek raksturotas šādi:

- iegūt tehnoloģiski izmantojamu slīpputekļu frakciju ($< 0,25$ mm) tās reaktivizācijai;
- iegūt reaktivizētu saistvielu ar spiedes stiprību līdz 20 MPa 28. dienā, izmantojot šādas reaktivizācijas metodes:
 - dezintegratoru ar rotācijas frekvenci **25 Hz un 50 Hz 1 līdz 5 reizes**;
 - planetārais lodīšu malējs ar **300 apgriezieniem minūtē 1 līdz 30 minūtes**;
 - vibrāciju malšana **5 līdz 20 minūtes**;
 - karsēšana mufelkrāsnī **no 300 °C līdz 1200 °C 1 līdz 5 stundas** ar karsēšanas ātrumu **10 °C/min**;
 - karsēšana rotācijas krāsnī ar ātrumu **25 apgr./min** un **5° slīpumu 450 °C un 900 °C** temperatūrā;
- iegūt biokompozītus, **kā pildvielu izmantojot ražošanas līnijas atlikumus vai līdz 75 % kaņepju spaļu** maisījumu, ar materiāla blīvumu **no 150 kg/m³ līdz 800 kg/m³**, siltumvadītspējas koeficientu **no 0,05 W/(m·K) līdz 0,15 W/(m·K)** un spiedes stiprību līdz **1,5 MPa** 28. dienā pēc izveidošanas.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Mehāniskā reaktivizācija, izmantojot optimizētus malšanas procesus, var efektīvi reaktivizēt daļēji hidratētu cementu no koksnes vilnas cementa plātņu ražošanas atlikumiem, 28. dienā iegūstot zemas stiprības saistvielu līdz 10 MPa, kas piemērota zemas slodzes būvniecības lietojumiem.
- Reaktivizēšana ar termisko apstrādi kontrolētā temperatūrā ievērojami uzlabo jau hidratēta cementa saistvielas īpašības, sasniedzot līdz 20 MPa spiedes stiprību, salīdzinot ar mehānisko reaktivizāciju.
- Reaktivizēto cementa saistvielu integrēšana ar ražošanas līniju atlikumiem un kaņepju spaļiem rada biokompozītus, kas uzrāda siltumizolācijas un mehāniskās īpašības, kas ir salīdzināmas ar komerciāliem būvmateriāliem, vienlaikus saglabājot zemu ietekmi uz vidi.
- Izstrādāto biokompozītu ietekmes uz vidi novērtējums apliecina to atbilstību ES *Green Deal* mērķiem, uzrādot par 26–58 % samazinātu oglekļa dioksīda emisiju (47–82 kg CO₂ ekv./m³ biokompozīta), salīdzinot tos ar cementa bāzes produktiem (111 kg CO₂ ekv./m³ biokompozīta).

Promocijas darba sastāvs un apjoms

Darbs ietver anotācijas divās valodās, vispārēju darba aprakstu, deviņas galvenās nodaļas, kas sadalītas apakšnodaļās, secinājumus un literatūras sarakstu. 1.–3. nodaļā ietverts literatūras apskats un formulēts promocijas darba mērķis un uzdevumi. Lai sasniegtu mērķi, 4.–7. nodaļā aprakstītas izmantotās pētniecības metodes un materiāli, kā arī eksperimentālās analīzes rezultātā iegūtie rezultāti un to analīze. Darba 8. nodaļā salīdzināti izstrādāto materiālu *LCA* rezultāti, un nodaļa pirms literatūras saraksta noslēdz darbu.

Promocijas darbu veido 139 lappuses, 99 attēli, 28 tabulas un literatūras saraksts ar 245 atsaucēm. Promocijas darbs rakstīts angļu valodā.

Promocijas darba rezultātu aprobācija

Dalība konferencēs. Galvenās atziņas un metodoloģiskie jauninājumi ir izplatīti un pārskatīti starptautiskās zinātniskās konferencēs, kas ļāva iegūt ekspertu viedokli un atsauksmes.

1. Rīgas Tehniskās universitātes 62. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Būvniecība”, Rīga, Latvija, 28.10.2021.
2. 5th International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” IMST 2022, Rīga, Latvia, 28.–30.09.2022.
3. Rīgas Tehniskās universitātes 63. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Būvniecība”, Rīga, Latvija, 10.11.2022.
4. XVI Starptautiskā vides un klimata tehnoloģiju zinātniskā konference “Conect 23”, Rīga, Latvija, 10.–12.05.2023.
5. 5. starptautiskā konference par bioloģiskās būvniecības materiāliem “ICBBM 2023”, Austrija, Vīne, 21.–23.06.2023.
6. Rīgas Tehniskās universitātes 64. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Būvniecība”, Rīga, Latvija, 19.10.2023.
7. XVII Starptautiskā vides un klimata tehnoloģiju zinātniskā konference “Conect 2024”, Rīga, Latvija, 15.–17.05.2024.
8. 4. starptautiskā konference par ilgtspējīgu attīstību civilajā, pilsētu un transporta inženierzinātnē “CUTE 2024”, Vroclava, Polija, 14.–16.10.2024.
9. 6. starptautiskā konference par biobūvniecības materiāliem “ICBBM 2025”, Riodežaneiro, Brazīlija, 17.–20.06.2025.

Publikācijas. Pētījums ir atspoguļots četros konferenču rakstu krājumos un piecās publikācijās zinātniskajos žurnālos, kas indeksēti *SCOPUS* datubāzē; kopumā tie ir citēti 83 reizes, h_5 -index – 5 (h -index – 6). Pētījumi publicēti starptautiskos žurnālos, piemēram, *Recycling*, *Environmental and Climate Technologies* un *Materials*.

Sadarbība rūpniecības jomā. Pētījums tika veikts ciešā sadarbībā ar SIA “Cewood”, kas ir vadošais koksnes vilnas cementa paneļu ražotājs, tādējādi nodrošinot izstrādāto metožu un materiālu praktisko nozīmību un lietojamību reālajā dzīvē.

Publikāciju saraksts

1. **Argalis, P. P.**; Sinka, M.; Bajare, D. Recycling of Cement–Wood Board Production Waste into a Low-Strength Cementitious Binder. *Recycling* 2022, 7, 76, doi:10.3390/recycling7050076.
2. **Argalis, P. P.**; Sinka, M.; Bajare, D. A Preliminary Study of Mechanical Treatments’ Effect on the Reactivation of Hydrated Cement Paste. *J. Phys. Conf. Ser.* 2023, 2423, 012008, doi:10.1088/1742-6596/2423/1/012008.
3. Bumanis, G.; **Argalis, P. P.**; Sahmenko, G.; Mironovs, D.; Rucevskis, S.; Korjakins, A.; Bajare, D. Thermal and Sound Insulation Properties of Recycled Expanded Polystyrene Granule and Gypsum Composites. *Recycling* 2023, 8, 19, doi:10.3390/recycling8010019.

4. **Argalis, P. P.**; Bumanis, G.; Bajare, D. Gypsum Composites with Modified Waste Expanded Polystyrene. *Journal of Composites Science* 2023, 7, 203, doi:10.3390/jcs7050203.
5. **Argalis, P. P.**; Sinka, M.; Andzs, M.; Korjamins, A.; Bajare, D. Development of New Bio-Based Building Materials by Utilising Manufacturing Waste. *Environmental and Climate Technologies* 2024, 28, 58–70, doi:10.2478/rtuect-2024-0006.
6. Bumanis, G.; **Argalis, P. P.**; Sinka, M.; Korjamins, A.; Bajare, D. The Use of Recycled Cement-Bonded Particle Board Waste in the Development of Lightweight Biocomposites. *Materials* 2024, 17, 5890, doi:10.3390/ma17235890.
7. **Argalis, P. P.**; Sinka, M.; Bumanis, G.; Bajare, D. Application of a Recovered Low-Strength Binder from Wood–Cement Particleboard Production. In *Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Development in Civil, Urban and Transportation Engineering*; Springer, 2025; Vol. 418, pp. 245–253.
8. Hajj Obeid, M.; **Argalis, P. P.**; Sinka, M.; Bajare, D.; Pailha, M.; Woloszyn, M. Advancing Sustainable Building Technologies: A Focus on Bio-Based Multi-Layer Panels and Real-Scale Hygrothermal Analysis. In *Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Development in Civil, Urban and Transportation Engineering*; Springer Nature, 2025; Vol. 418, pp. 323–332.
9. **Argalis, P. P.**; Puzule, L.; Sinka, M.; Bajare, D. Transforming Cement-Wood Fiber Industrial Byproducts into Hybrid Binder. In *Bio-Based Building Materials – Proceedings of ICBBM 2025*; Springer Nature, 2025; pp. 738–751, doi:10.1007/978-3-031-92874-1_58.
10. Balina, K.; Gailitis, R.; Sinka, M.; **Argalis, P.P.**; Radina, L.; Sprince, A. Prospective LCA for 3D-Printed Foamed Geopolymer Composites Using Construction Waste as Additives. *Sustainability* 2025, 17, 6459, doi:10.3390/su17146459.

1. KLIMATA STRATĒGIJAS UN IETEKME UZ VIDI LATVIJĀ

Būvmateriālu nozare būtiski ietekmē globālo resursu patēriņu un vides ilgtspējību. Tā rada 33 % ar enerģiju saistīto CO₂ emisiju. Būtiska problēma ir materiālu patēriņš, jo būvmateriāli veido aptuveni 50 % no visām pasaulē iegūtajām izejvielām [16]. Betona ražošana rada aptuveni 8 % no globālajām CO₂ emisijām, tērauda rūpniecība, kas ir cieši saistīta ar būvniecību, rada aptuveni 9 % [17]. Betona ražošanai tiek patērēts aptuveni 10 % pasaules rūpnieciskā ūdens [18].

Būvniecības nozare ir svarīga Latvijas ekonomikai, tā dod būtisku ieguldījumu valsts IKP un nodarbina ievērojamu darbaspēka daļu [19]. Latvijas plašā mežu platība padara koksni par galveno būvniecības materiālu, kas rada ilgtspējības jautājumus saistībā ar mežu apsaimniekošanu [20]. Ietekmi uz vidi rada arī derīgo izrakteņu ieguve – smilts, grants, kaļķakmens un māla ieguve [21]. Būvniecības darbības ietekmē arī ūdens kvalitāti [22].

Latvija ir daļa no Eiropas Savienības klimata neitralitātes plāna, kura mērķis ir līdz 2050. gadam panākt nulles siltumnīcefekta gāzu neto emisijas [23]. ES ir definējusi mērķi līdz 2030. gadam samazināt oglekļa dioksīda emisijas par 55 %, bet līdz 2050. gadam – par 100 %, vienlaikus veicinot aprites ekonomikas praksi būvniecības un nojaukšanas atlikumu (*CDW*) apsaimniekošanā [24]. Latvija ir apņēmusies līdz 2030. gadam samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas par 65 %, salīdzinot ar 1990. gadu. Tā strādā pie tā, lai samazinātu enerģijas patēriņu jaunās ēkās un atjaunotu sabiedriskās ēkas, lai panāktu lielāku energoefektivitāti [25].

Latvijas normatīvais regulējums ietver Būvniecības likumu, Ēku energoefektivitātes likumu un zaļā publiskā iepirkuma (angļu val. *Green Public Procurement*) noteikumus, kas veicina ilgtspējīgu būvniecību [26]. Izaicinājumi ietver koordināciju starp iestādēm, noteikumu izpildes nekonsekvenci un nepieciešamību pēc holistiskas pieejas ilgtspējībai [27].

Latvijas būvniecības nozarē rodas ievērojams daudzums atlikumu [28]. Valsts atlikumu apsaimniekošanas sistēmā, kas pamatojas uz ES direktīvām, par prioritāti ir noteikta atlikumu rašanās novēršana, atkārtota izmantošana, pārstrāde un reģenerācija [29]. *CDW* ir klasificēti, un maksa par to apglabāšanu ir atšķirīga. *CDW* aprites apsaimniekošanas izaicinājumi ietver tirgus problēmas, regulējuma trūkumus un iedzīvotāju uzvedību. Risinājumi ietver valdības iniciatīvas, tirgus iespējas un iedzīvotāju iesaisti, tostarp pārstrādes centrus pilsētās [30].

Līdz ar arvien plašāku starptautisko regulu ieviešanu ilgtspējības novērtēšana Latvijas būvniecības nozarē attīstās [31]. Tiek ņemti vērā ekonomiskie, sociālie un vides faktori. Dzīves cikla novērtējums (*LCA*) ir galvenais ietekmes uz vidi novērtēšanas instruments [32].

2. KOKSNES VILNAS UN CEMENTA PANEĻI

Koksnes vilnas cementa paneļi ir izgatavoti no egles koksnes, kas izvēlēta tās viendabīgā šķērsgriezuma dēļ. Koksne tiek nomizota, atzarota un žāvēta uz starp distanceriem 6–12 mēnešus, lai nodrošinātu pareizu mitruma migrāciju. Šajā žāvēšanas laikā koksnē esošie sveķi un cukuri migrē uz tās virsmas [33]. Izžāvētā koksne tiek sagriezta 50 cm lielos blokos, kas ir optimālais izmērs ražošanai. Lielāki bloki tiek sadalīti pareizajā diametrā, un atgriezumi tiek izmantoti enerģijas reģenerācijai. Bloki tiek novietoti uz statīviem, nodrošinot koksnes sajaukumu, lai samazinātu izkliedi ražošanas laikā. Katras maiņas sākumā parauga blokiem tiek mērīts mitruma saturs, un šie dati tiek reģistrēti. Ražošanas laikā tiek pievienots ūdens, un, pamatojoties uz koksnes blīvumu, tiek veiktas korekcijas. Bloki tiek saēvelēti koksnes vilnā, kas pēc tam tiek samitrināta.

Samitrinātā koksnes vilna tiek sajaukta ar cementu, attiecība tiek pielāgota nepieciešamajām materiālu īpašībām. Pirmā atlikumu plūsma (ražošanas līnijas atlikumi) veidojas, pirms maisījums nonāk rotējošos disperseros, un maiņas beigās tiek savākti un novadīti uz atsevišķu daļu rūpnīcā, kur tie krājas, līdz tiek vesti uz atlikumu poligonu. Maisījums tiek ievadīts veidnēs, izlīdzināts un ieklāts divās kārtās. Cementa sacietēšanas laiks ir atšķirīgs, un tiek veiktas procesu korekcijas, lai saglabātu kvalitāti. Paneļi tiek presētas, sagriezti 2,4 m garumā un sakrauti kaudzē, lai tie sacietētu. Šā procesa laikā tiek kontrolēta temperatūra, lai novērstu apdegšanu. Pēc sacietēšanas paneļi tiek atveidnoti, nofrēzēti un piezāģēti pēc vajadzības. Šajā procesā rodas papildu atlikumi. Pēc tam paneļi tiek pārvietoti uz otru noliktavu turpmākai žāvēšanai, kas ilgst aptuveni 2–4 nedēļas. Žāvēšanas process ir optimizēts, lai samazinātu žāvēšanas laiku.

Pēc žāvēšanas notiek žāvētu paneļu kvalitātes kontrole, kurā tos slīpē, frēzē un vizuāli pārbauda. Slīpējot rodas slīpēšanas putekļi, kurus savāc, lai izvairītos no respiratoriskām slimībām [34]. Bojātie paneļi, kas veido 3–5 % no saražotās produkcijas, galvenokārt tiek izmantoti kā paliktņi materiālam, lai samazinātu jaunražoto paneļu deformācijas iespaidumus paletēs. Gatavie paneļi pirms transportēšanas tiek uzglabāti noliktavā.

Koksnes vilnas cementa paneļi tiek izmantoti gan akustiskiem, gan celtniecības mērķiem. Akustiskie paneļi tiek izmantoti iekštelpās skaņas izolācijai un trokšņu absorbcijai birojos, skolās un mūzikas zālēs. Būvkonstrukciju paneļi tiek izmantoti būvniecībā, siltumizolācijā un skaņas izolācijā [35].

Ražošanas procesā tiek izmantota egles koksne, baltais vai pelēkais cements, rūpnieciskais ūdens un lakas un krāsas uz ūdens bāzes. Šajā procesā rodas vairākas atlikumu plūsmas, tostarp ražošanas līnijas atlikumi, zāģēšanas atlikumi un slīpēšanas putekļi. Atlikumus ir iespējams izmantot biokompozītu izstrādē, izmantojot rupjas koksnes vilnas atlikumus un modificētus slīpēšanas putekļus. Garākās koksnes šķiedras var izmantot kā pildvielu, savukārt slīpputekļus var izmantot kā saistvielu. Šīs pieejas mērķis ir radīt ilgtspējīgus un ekonomiski pamatotus biokompozītus.

3. PORTLANDCEMENTA BĀZES SAISTVIELU REAKTIVIZĀCIJA

Pieaugošais pieprasījums pēc ilgtspējīgiem materiāliem ir veicinājis pētījumus par portlandcementa saistvielu reaktivizāciju un pārstrādi, jo īpaši no cementa ražošanas atlikumiem [36, 37]. Šīs pieejas mērķis ir atjaunot daļēji hidratētu cementa saistīšanās īpašības, pārvēršot atlikumus vērtīgos būvniecības resursos [38, 39] un risinot vides problēmas, piemēram, atlikumu rašanos, resursu izsīkšanu un oglekļa emisijas [6]. Reaktivizācijas tehnoloģijas ietver pārstrādi, smalcināšanu, malšanu un materiālu apstrādi, lai radītu ilgtspējīgus būvniecības risinājumus, kas saudzē resursus un samazina ietekmi uz vidi.

Malšana ir daudzsološa metode cementa saistvielu reaktivitātes uzlabošanai. Planetārās lodīšu dzirnavas var samazināt cementa daļiņu izmēru no 10–50 μm līdz mazāk nekā 5 μm, ievērojami palielinot īpatnējo virsmas laukumu un reaktivitāti. Šis process ievieš kristālrežģa deformāciju un strukturālus defektus, paātrinot ķīmisko mijiedarbību hidratācijas laikā [40]. Problēma ir enerģijas patēriņš, iekārtu nodilums un iespējamā daļiņu aglomerācija.

Dezintegrators, planetārās lodīšu dzirnavas un vibrāciju malējs maina materiāla īpašības mikroskopiskā līmenī, samazinot daļiņu izmēru, sadalot konglomerātus, palielinot virsmas laukumu un uzlabojot hidratāciju [41–43]. Planetārās lodīšu dzirnavās tiek izmantots centrālās spēks un Koriolisa efekts smalkai malšanai. Dezintegratorā tiek izmantots ātrdarbīgs rotors, lai samazinātu daļiņu triecienu un izmēru. Vibrācijas dzirnavās tiek izmantota svārstību kustība, lai ar trieciena un berzes palīdzību samazinātu izmēru.

Termiskā apstrāde ir vēl viena efektīva reaktivizācijas tehnoloģija, kurā tiek izmantotas dažādas metodes, tostarp pirolīze, kalcinēšana un sadedzināšana, lai modificētu cementa akmens fizikālās un ķīmiskās īpašības [44]. Mufelkrāsnis ar to slēgtajām sildīšanas kamerām un precīzu temperatūras kontroli (parasti 400–900 °C) ir ideāli piemērotas laboratorijas mēroga pētījumiem, savukārt rotācijas krāsnis piedāvā priekšrocības nepārtrauktai darbībai un rūpnieciska mēroga apstrādei [45]. Mikroviļņu sildīšana ir daudzsološa, un pētījumi liecina, ka, pateicoties selektīvai molekulārajai vibrācijai un dielektriskajai sildīšanai, spiedes izturība palielinās līdz 30 %, salīdzinot ar neapstrādātiem paraugiem [46].

Malšanas tehnoloģijas var palielināt CO₂ emisijas par aptuveni 30–50 %, salīdzinot ar tradicionālo cementa ražošanu, jo tiek patērēts vairāk enerģijas [47]. Termiskai apstrādei nepieciešams risināt mērogojamības un ekonomiskā pamatojuma jautājumus [39]. Sākotnējās iekārtu izmaksas progresīvām karsēšanas tehnoloģijām svārstās no 250 000 miljoniem līdz 1,5 miljoniem eiro [48]. Ķīmiskā apstrāde var samazināt izejvielu patēriņu par 25–35 % [49], izmaksas ir ap 150–300 EUR/t pārstrādātā cementa [50], turklāt pastāv potenciāls ķīmisko atlikumu un ūdens piesārņojuma risks. Labi izstrādāti reaktivizācijas procesi potenciāli var samazināt materiālu iegādes izdevumus par 20–40 %, salīdzinot ar tradicionālo ražošanu [51].

4. MATERIĀLI UN METODES

4.1. Izejmateriāli

Slīpputekļi (*SD*)

Koksnes vilnas cementa paneļu ražošanas pēdējā posmā sacietējušie un izžāvētie paneļi tiek sagriezti, tiek apstrādātas malas un kalibrēti izmēri, tos slīpējot. Putekļu nosūkšanas sistēma samazina putekļu daudzumu un uztur tīru darba vidi, lai mazinātu iespējamo risku veselībai, ko slīpēšanas laikā rada gaisā esošie putekļi. Nepārtrauktā slīpēšanas un filtru tīrīšanas procesā ik dienas rodas aptuveni 4–5 m³ *SD*. *SD* ir divas galvenās sastāvdaļas – koksnes šķiedras un daļēji hidratētām cementa daļiņām. Koksnes šķiedru daļiņas parasti ir iegarenas un šķiedrainas.

Turpretī cementa daļiņas parasti ir daudz sīkākas, un tās ir mazi, neregulāras formas graudiņi vai fragmenti. Cementa daļiņu morfoloģiju ietekmē cementa veids, smalkums un hidratācijas stāvoklis.

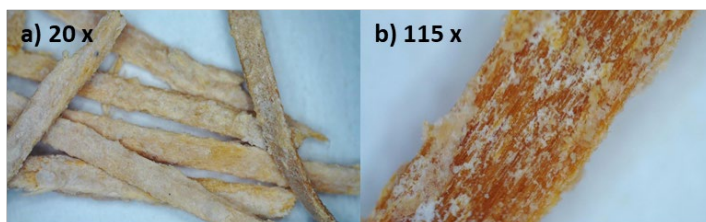
SD rodas, slīpējot koksnes vilnas cementa paneļus pēc 3–4 nedēļu sacietēšanas. 72 masas % *SD* ir mazāki par 0,25 mm, tāpēc hidratēto cementu varētu izmantot kā papildu cementa materiālu vai kā materiālu reaktivizācijai un jaunas saistvielas ražošanai.

Smalkās *SD* daļiņas ir ierosināts izmantot kā izejmateriālu saistvielu izstrādāšanai, lai veidotu biokompozītus ar ražošanas līnijas atlikumiem (*PLW*) kā pildvielu. Saistvielas reaktivizācijas iespēja tika pārbaudīta, izmantojot divas dažādas metodes:

- 1) mehāniska reaktivizācija ar trim dažāda veida malšanas metodēm;
- 2) termiskā apstrāde 300–1200 °C temperatūrā mufelkrāsnī un 450 °C un 900 °C temperatūrā rotācijas krāsnī.

Ražošanas līnijas atlikumi (*PLW*)

Šajā pētījumā kā biokompozītmateriālu pildviela tika izmantoti ražošanas līnijas atlikumi (*PLW*). *PLW* ir egļu koksnes šķiedras, kuru garums ir 5–200 mm, platums 1–1,5 mm, biezums 0,5–0,8 mm. Vidējais blīvums – 250 kg/m³. Koksnes šķiedras ražošanas procesā ir pārklātas ar cementu. Lielākā daļa šķiedru ir atdalītas cita no citas, izņemot nelielus šķiedru sabiezējumus, kas ir sasaistīti kopā. Pirms paraugu sagatavošanas tiek pārbaudīta pildviela, lai izvairītos no šiem sacietējušajiem materiāla sabiezējumiem un iegūtu viendabīgāku struktūru. Materiāla vizuālo izskatu var redzēt 4.1. attēlā.



4.1. att. *PLW* vizuālais izskats dažādos palielinājumos.

Citi materiāli

Citi materiāli ir CEM II/A-LL 42,5 N un kaņepju spaļi. Šo cementa veidu (*Schwenk*, Latvija) ražo, sajaucot parasto portlandcementa klinkeru (80–94 %) ar kaļķakmeni kā sekundāro sastāvdaļu. Kaļķakmens komponents parasti veido 6–20 % no cementa sastāva. Pārējās sastāvdaļas ir maznozīmīgi papildu komponenti, kas veido 0–5 % no kopējā cementa sastāva [52]. Kā papildu pildvielas uz bioloģiskās bāzes tika izmantoti kaņepju spaļi (*Natūralus Pluoštas*, Lietuva), lai samazinātu siltumvadītspējas koeficientu, jo to siltumvadītspēja ir 0,043 W/(m·K). Kaņepju spaļi, ko piegādā šis reģionālais pārstrādātājs, ir vienīgie piemērotie būvmateriālu ražošanai. 64 % kaņepju spaļu daļiņu izmērs ir 1–20 mm. Kaņepju spaļu bēruma blīvums – 80 kg/m³, sablīvētā stāvokļa bēruma blīvums – 115 kg/m³ [53].

4.2. Slīpputekļu modifikācija

Slīpputekļi tika izsijāti caur 0,2 mm sietu. Izsijātā frakcija, kas mazāka par 0,2 mm, tika izmantota kā saistvielas prekursors un apstrādāta, izmantojot trīs mehāniskās malšanas un divas termiskās apstrādes metodes. Lai izpētītu malšanas ietekmi uz saistvielas kvalitāti, izsijātie slīpputekļi tika pakļauti šādai mehāniskai apstrādei:

- dezintegrējot, izmantojot *Desi Desi-16C* (Igaunija, 2016) ar 25 Hz un 50 Hz frekvenci 1, 3 un 5 malšanas reizēm);
- planetārai lodīšu malšanai, izmantojot *Retsch PM 400* (Vācija, 2007), 1–30 minūtes ar 300 apgriezieniem minūtē;
- vibrācijas malšanai, izmantojot *Stankomash MV-20* (Krievija, 2016) 5, 10, 15 un 20 minūtes.

Novērtējot dažādus reaktivizācijas mehānismus, izsijāti slīpēšanas putekļi tika termiski apstrādāti, izmantojot divas metodes:

- karsēšana *Uterna W-80* mufelkrāsnī (Lietuva, 2012) 1–5 stundas 300 °C, 450 °C, 600 °C, 750 °C, 900 °C, 900 °C, 1050 °C un 1200 °C temperatūrā ar karsēšanas ātrumu 10 °C/min;
- karsēšana *Keramserviss KLR* rotācijas krāsnī (Latvija, 2009) 450 °C un 900 °C temperatūrā ar 25 apgriezieniem minūtē pie 5° slīpuma.

Kopumā tika izstrādātas 37 dažādas saistvielas, izmantojot piecas apstrādes metodes. Katru saistvielu raksturo promocijas darba attiecīgā nodaļa.

4.3. Testēšanas metodes

Slīpputekļu granulometrija tika veikta saskaņā ar *ASTM C136* [54] standartu, izmantojot 0,125 mm līdz 8 mm lielus sietus.

Javas plūstamība tika pārbaudīta uz *EN 1015-3* trieciena galda. Tika mērīts konusa diametrs un augstums. Ar trieciena galdu tika veikti 20 triecieni, un tika novērota javas reakcija uz šo spēku. Tika izmērīts konusa diametrs un analizēta javas plūstamība.

Spiedes stiprība tika testēta, izmantojot universālo testēšanas sistēmu *Zwick Z100* (*ZwickRoell*, *Kennesaw, GA*, ASV) ar testa ātrumu 0,5 mm/min. Pirms testēšanas paraugi 16 stundas tika žāvēti 45 °C temperatūrā, lai no struktūras noņemtu lieko ūdeni, un testēti 7., 14. un 28. dienā.

Materiālu kumulatīvais daļiņu izmēru sadalījums iegūts, izmantojot lāzerdifrakciju (*CILAS 1090*, diapazons 0,10–500,00 µm).

Rentgenstaru fluorescence (*XRF*) ir plaši izmantota analītiskā metode parauga elementārā sastāva noteikšanai. *XRF* tika veikta ar *Rigaku ZXS PrimusIV*.

Materiāla rentgenstaru difraktometriskā (*XRD*) analīze tika veikta, izmantojot rentgenstaru difraktometru *BRUKER-AXS D8 ADVANCE* (*Bruker, Billerica, MA, ASV*), izmantojot *CuKα1* un *CuKα2* starojumu 2θ diapazonā no 10° līdz 70°.

Temperatūras ietekme uz izejvielām tika noteikta, izmantojot *Mettler-Toledo TGA1/SF* termogravimetriskās analīzes iekārtu. Vienlaikus ar *Mettler STARe* programmatūru var iegūt termogrammas, ar kuru palīdzību var noteikt masas izmaiņas un destrukcijas produktu izdalīšanos. Analīzēm tika izmantota 25–900 °C temperatūra ar ātrumu 10 °C/min gaisa vidē.

Biokompozīti tika raksturoti, izmantojot digitālo mikroskopu *Veho HDMI Dual Vision Digital*, lai novērtētu biokompozītu makrostruktūru un vizuālo izskatu.

Biokompozītu siltumvadītspēja tika mērīta ar *LaserComp FOX600* siltuma plūsmas mērītāju; saskaņā ar standarta *LVS EN 12667* vadlīnijām testa iestatījumi bija 0 °C apakšējai un 20 °C augšējai plāksnei.

Biokompozītu spiedes un lieces izturība tika testēta ar ātrumu 0,5 mm/min, izmantojot universālo testēšanas iekārtu *Zwick Z100* (*ZwickRoell, Kennesaw, GA, ASV*) saskaņā ar *BS EN 12390-3* un *LVS EN 826* standartu.

4.4. Dzīves cikla novērtējums

Izstrādāto materiālu vides novērtējums tika veikts, izmantojot dzīves cikla novērtējuma (*LCA*) pieeju. Aprēķini tika veikti programmā *SimaPro* ar datubāzi *Ecoinvent 3.8*. Galvenais mērķis bija salīdzināt izgatavotos biokompozītus ar esošajiem izolācijas materiāliem, pamatojoties uz to siltumizolācijas īpašībām. Biokompozītiem tika izvēlēta funkcionālā vienība, lai salīdzinātu to siltumizolācijas efektivitāti, pamatojoties uz U vērtību 0,18 W/(m²K) uz m² biokompozīta vai norobežojošo konstrukciju sistēmas.

Tika veikti salīdzinājumi ar tradicionāli izmantotajiem būvmateriāliem. Šo materiālu dzīves cikla novērtējuma rezultāti tika ņemti no iepriekšējiem pētījumiem un pielāgoti, lai atbilstu šajā darbā izmantotajai funkcionālajai vienībai [55]. Lai salīdzinātu izstrādātos biokompozītus ar tradicionālajiem būvmateriāliem, tika izgatavota norobežojoša konstrukciju sistēma ar koka karkasu (4.1. tab.). Norobežojošo konstrukciju sistēmām aptuvenais biezums ir 36–39 cm.

4.1. tabula

Sienas norobežojošo konstrukciju sistēmas ievades dati

Materiāls	Biezums, mm	Masa, kg
Koka karkass	–	6,3
Spundēti dēļi	25	17,5
Izstrādātie biokompozīti	257–280*	92,4–122,1*
Minerālvate	30	1,8
Pretvēja plēve	–	–
Koksnes vilnas cementa paneli	50	21,0

* Atkarībā no saistvielas veida biokompozītā.

5. MALŠANAS IETEKME UZ SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJU

5.1. Slīpputekļu reaktivizācija ar planetārajām lodīšu dzirnavām

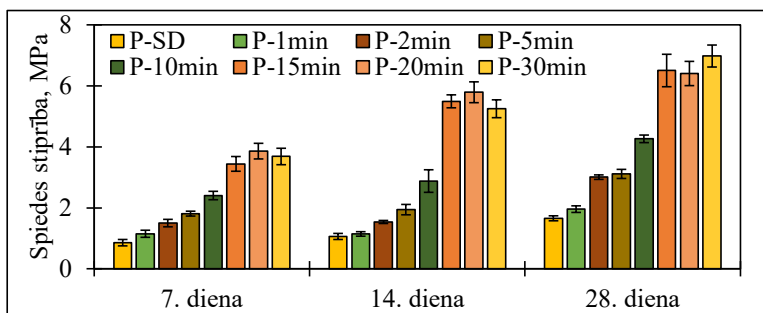
Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

Šajā eksperimentā slīpputekļi (*SD*) tika apstrādāti, izmantojot planetāro lodīšu dzirnavas, lai izpētītu to potenciālu izmantošanai par saistvielu. Tika izveidoti 11, tostarp divi references, sastāvi. Katram paraugam tika pielāgota ūdens un saistvielas (*W/B*) attiecība, lai pēc 20 apgriezieniem uz trieciena galda sasniegtu 15–20 cm plūstamību. Vajadzīgais *SD* un ūdens daudzums tika sajaukts maisīšanas traukā un maisīts 3 minūtes. Sajauktais materiāls tika ievaidnots (20 mm × 20 mm × 20 mm), pārklāts ar plastmasas plēvi un atstāts divas dienas cietēt istabas apstākļos (atmosfēras spiediens, 20 ± 2 °C); plūstamība un sacietēšanas laiks tika mērīts saskaņā ar *EN 196-3*. Paraugi tika cietināti aiztaisāmos plastmasas maisiņos, lai uzturētu augstu relatīvā mitruma līmeni. Spiedes izturība tika pārbaudīta 7., 14. un 28. dienā. Lai iegūtu ticamākus rezultātus, katrā testēšanas periodā tika testēti seši paraugi.

Rezultāti

Rezultāti parādīja, ka *SD* malšana ietekmē materiāla īpašības. Malšanas laika palielināšana ietekmēja materiāla iestrādājamību un sacietēšanas laiku. Piemēram, javai, kas izgatavota no P-1min, bija laba iestrādājamība, un malšanas laika palielināšana līdz 10 minūtēm (P-10min) vēl vairāk uzlaboja iestrādājamību. Tomēr pārāk ilgs malšanas laiks samazināja apstrādājamību. Saistīšanās laiks atšķīrās atkarībā no malšanas ilguma, un visātrāk saistījās P-10min.

Spiedes stiprība kopumā palielinājās, palielinoties malšanas laikam, un vislielākā stiprība bija vērojama P-15min paraugiem. Tomēr malšana ilgāk par 15 minūtēm stiprību būtiski nepalielināja (5.1. att.). P-15min, P-20min un P-30min sasniedza 6,4–7,0 MPa spiedes stiprību 28. dienā.



5.1. att. Planetārās lodīšu malšanas metodes spiedes stiprības rezultātu apkopojums paraugiem.

Pētījumā secināts, ka *SD* malšana planetārajās lodīšu dzirnavās uzlabo spiedes stiprību un apstrādājamību. Optimālie apstrādes parametri bija 15 minūšu malšana ar *W/B* attiecību no 0,6 līdz 0,8 un cietēšana augsta mitruma apstākļos.

5.2. Slīpputeķļu reaktivizācija ar dezintegratoru

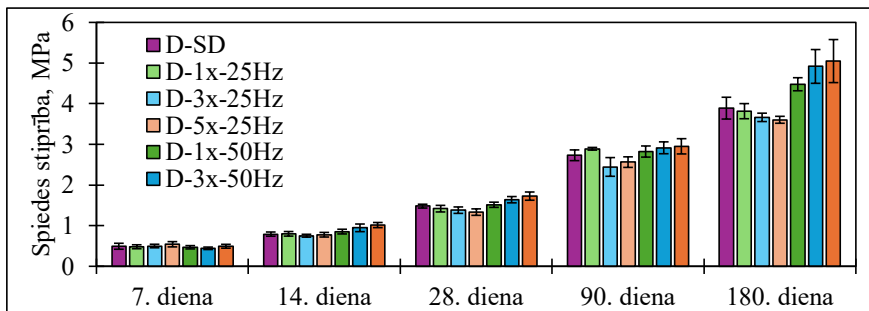
Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

Šajā apakšnodaļā aplūkots slīpputeķļu, kas apstrādāti dezintegratorā, kā saistvielas izmantošana. Tika izveidoti septiņi sastāvi, kas atšķīrās pēc apstrādes frekvences (25 Hz un 50 Hz) un apstrādes ciklu skaita (1, 3 un 5). Tika iekļauta arī references paraugu sērija. Visos sastāvos tika izmantota *W/B* attiecība 0,7. Paraugi (20 mm × 20 mm × 20 mm) tika cietināti augsta mitruma vidē (20 ± 2 °C, relatīvais mitrums > 90 %) piecas dienas, pēc tam atveidoti un cietināti istabas temperatūrā plastmasas maisiņā, lai saglabātu mitrumu. Spiedes stiprība tika noteikta 7., 14., 28., 90. un 180. dienā. Lai iegūtu ticamākus rezultātus, katram testēšanas periodam tikai izveidoti 4–5 paralēlie paraugi kļūdas mazināšanai.

Rezultāti

Rezultāti parādīja, ka visiem paraugiem laika gaitā spiedes stiprība pieaug (5.2. att.). Laika gaitā visos paraugos bija vērojams konsekvents spiedes stiprības pieaugums. Līdz 14. dienai spiedes stiprība nedaudz palielinājās līdz aptuveni 0,8–1,0 MPa; līdz 28. dienai tā sasniedza aptuveni 1,5 MPa. Stiprības palielināšanās turpinājās, 90. dienā sasniedzot aptuveni 2,5–3,0 MPa.

Visievērojamākā stiprības attīstība notika no 90. līdz 180. dienai, kad visos paraugos ievērojami palielinājās spiedes stiprība. Interesanti, ka 180. dienā bija vērojama ievērojama atšķirība starp apstrādes apstākļiem. D-3x-50Hz un D-5x-50Hz uzrādīja lielāku spiedes stiprību – aptuveni 4,9–5,0 MPa, salīdzinot ar 25 Hz analogiem (D-3x-25Hz un D-5x-25Hz), sasniedzot 3,6–3,8 MPa. D-SD paraugs 180. dienā sasniedza 3,9 MPa, kas liecina, ka 25 Hz malšana nav pietiekama, lai palielinātu spiedes stiprību.



5.2. att. Paraugu spiedes stiprības apkopojums.

Apstrādes frekvences (25 Hz pret 50 Hz) nozīme kļūst izteiktāka vēlākos posmos. Līdz 180. dienai 50 Hz malto *SD* paraugiem ir lielāka spiedes stiprība nekā 25 Hz malto *SD* paraugiem. Tas varētu liecināt, ka *SD* paraugi, kas apstrādāti ar augstāku frekvenci, varētu nodrošināt labāku daļiņu sadalījumu vai efektīvāku daļēji hidratētā cementa reaktivizāciju *SD*. Vairāki apstrādes cikli (3 un 5 reizes) pie 50 Hz frekvences šo efektu pastiprina.

No materiālzinātnes viedokļa šādu uzvedību varētu izskaidrot ar vairākiem mehānismiem.

- Pieaugošā stiprība liecina par aizkavētu, bet turpinātu cementa hidratācijas procesu un labāku koksnes daļiņu un cementa saķeri laika gaitā.
- Augstāka frekvences apstrāde (50 Hz) rada optimālāku daļiņu izmēru sadalījumu vai atklāj lielāku daļēji hidratēta cementa virsmas laukumu [56, 57] jaunām hidratācijas reakcijām [58].

D-SD uzrāda mērenu spiedes stiprības rādītāju, kas liecina, ka mehāniskā apstrāde zemās frekvencēs neietekmē materiāla īpašības.

5.3. Slīpputekļu reaktivizācija ar vibrāciju malējū

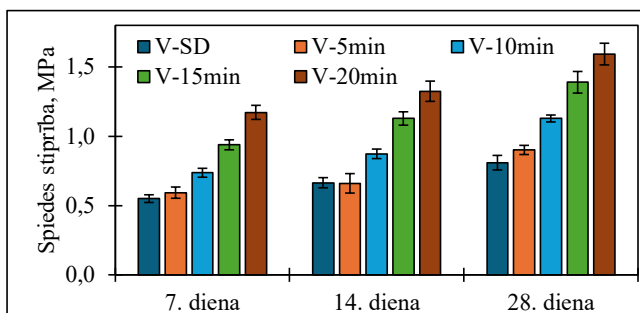
Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

Šajā eksperimentā kā saistviela tika izmantoti vibrācijas dzirnavās apstrādātie slīpputekļi. Tika izveidoti četri sastāvi ar dažādu malšanas ilgumu un viens references sastāvs. Visiem paraugiem (20 mm × 20 mm × 20 mm) tika izmantota *W/B* attiecība 0,8. Tika izmērīta iestrādājamība un saistīšanās laiks, un paraugi cietēja piecas dienas (20 ± 2 °C), kam sekoja turpmāka cietēšana paaugstinātā mitruma vidē. Spiedes stiprība tika pārbaudīta 7., 14. un 28. dienā.

Rezultāti

Plūstamības rezultāti parādīja, ka visas javas ir iestrādājamās, izmantojot *W/B* attiecību 0,8. *SD* malšanas laika palielināšana līdz 20 minūtēm samazina materiāla iestrādājamību.

Apkopojot spiedes stiprības rezultātus (5.3. att.), redzams, ka, palielinoties malšanas laikam, palielinās spiedes stiprība. Spiedes stiprības dati redzami 5.6. attēlā. Viszemākā spiedes stiprība tika iegūta V-SD, 28. dienā sasniedzot 0,8 MPa. V-5 min sasniedza 0,9 MPa, savukārt V-15 min paraugs sasniedza 1,4 MPa; vislielāko spiedes stiprību uzrādīja V-20min, 28. dienā sasniedzot 1,6 MPa. No šiem rezultātiem var secināt, ka, palielinot *SD* malšanas laiku, var palielināt javu spiedes stiprību.



5.3. att. Vibrācijas malšanas metodes paraugu spiedes stiprības apkopojums.

Spiedes stiprības atšķirības joprojām ir ievērojamas un, šķiet, ar laiku pat nedaudz palielinās. Tas liecina, ka ilgāka malšana turpina pastāvīgi ietekmēt stiprības attīstību.

5.4. Nodaļas kopsavilkums

Pētījumā tika pētīta slīpputekļu reaktivizācija, izmantojot dažādas malšanas metodes.

Planetārā lodīšu malšana parādīja, ka malšanas ilgums būtiski ietekmē iestrādājamību un spiedes stiprību, 28. dienā sasniedzot 7,0 MPa paraugam P-30min.

Malšana ar dezintegratoru uzlaboja spiedes stiprību, un vairāku reižu apstrāde ļāva sasniegt labākus rezultātus. Tomēr stiprības pieaugums nebija energoefektīvs, jo 28. dienā tika sasniegts 1,7 MPa.

Vibrācijas malšana parādīja, ka malšanas ilgums ietekmē iestrādājamību un spiedes stiprību, piedāvājot plašāk pielāgojamu pieeju, 28. dienā sasniedzot 1,6 MPa.

Salīdzinot trīs metodes, ar planetāro lodīšu malšanu tika sasniegta visaugstākā stiprība, taču tās mērogojamība bija ierobežota. Dezintegratora malšana nodrošināja mērenu stiprības pieaugumu, bet sliktu energoefektivitāti. Vibrācijas malšana nodrošināja veiktspējas, energoefektivitātes un mērogojamības līdzsvaru un tika izvēlēta kā metode tālākiem eksperimentiem.

6. TERMISKĀS APSTRĀDES IETEKME UZ SLĪPPUTEKĻU REAKTIVIZĀCIJU

6.1. Slīpputekļu reaktivizācija ar mufelkrāsni

Termiskās apstrādes mērķis bija raksturot termiski apstrādātas *SD* javas īpašības neapstrādātā un hidratētā stāvoklī, lai saprastu, vai šai apstrādes metodei ir potenciāls. Temperatūra tika izvēlēta ar 150 °C soli, sākot no 300 °C līdz 1200 °C grādiem, saglabājot izvēlēto temperatūru četras stundas. Četras stundas tika uzskatītas par pietiekamu laiku, lai izsildītu visu materiālu. Temperatūra tika izvēlēta, pamatojoties uz literatūrā pieejamajiem pētījumiem [59, 60] un promocijas darba autora veiktajiem eksperimentiem.

Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

Maisījumu dizains aprakstīts 6.1. tabulā. Tika izveidoti septiņi sastāvi, kā arī references paraugs (M-SD-2). Termiski apstrādātie *SD* tika izmantoti kā saistviela. Tika izmantotas dažādas ūdens un saistvielas (*W/B*) attiecības, lai panāktu vienādu iestrādājamību visām javām. Katram sastāvam tika izmantota viena ierosinātās saistvielas masas daļa.

6.1. tabula

Paraugu maisījuma dizains

Paraugs	M-SD-2	M-300-2	M-450-2	M-600-2	M-750-2	M-900-2	M-1050-2	M-1200-2
Ūdens masas daļas (pēc EN 196-3)	0,70	0,60	0,73	0,60	0,65	0,65	0,70	0,25

Paraugi tika izgatavoti, izmantojot *Hubert* automātisko maisītāju ar 140 apgriezieniem minūtē. 500 g materiāla tika sajaukts ar ūdeni (saskaņā ar EN 196-3 standartu) 2 minūtes, kam sekoja manuāla maisīšana ar karoti un vēl 2–3 minūšu maisīšana ar *Hubert* maisītāju līdz viendabīgai masai. Iegūtā java tika iepildīta *Vicat* aparāta gredzenos un 20 mm × 20 mm × 20 mm formās, kas pēc tam tika pārklātas ar plastmasas plēvi. Pēc divu dienu sākotnējās cietēšanas perioda paraugi tika atveidoti, marķēti un uzglabāti aiztaisāmos plastmasas maisiņos, lai turpinātu cietēšanu. Katrā testēšanas dienā tika testēti trīs paralēli paraugi.

Rezultāti

Koksnes vilnas cementa paneļu slīpputekļu termiskā uzvedība liecina par sarežģītiem gan lignocelulozes, gan cementa materiālu sadalīšanās procesiem. Termogravimetriskā (TG) analīze (300–900 °C) atklāj vairākus masas zuduma posmus, un atbilstošās DTA līknes parāda termiskos notikumus, kas attiecināmi uz konkrētām transformācijām (6.1. att.). Sākotnējā dehidratācijas stadijā (50–150 °C) vērojami ~ 10 % masas zudumi galvenokārt no saistītā ūdens iztvaikošanas [61, 62], tostarp adsorbētā ūdens no koksnes šķiedrām [62, 63], starpslāņu ūdens no C-S-H gela [64], ceolīta ūdens no AFm fāzēm [65] un ettringīta dehidratācija (90–120 °C) [66]. Endotermiskais DTA raksturs apstiprina šo procesu dehidratācijas raksturu.

Vidējas temperatūras apgabalā (150–400 °C) vērojama pakāpeniska masas samazināšanās, kas atbilst koksnes sastāvdaļu termiskajai degradācijai [67–69]. Tā sākas ar hemicelulozes sadalīšanos (220–315 °C) [67, 69–71], kam seko celulozes sadalīšanās sākums (315–400 °C) [67, 70, 72]. Lignīna sadalīšanās notiek pakāpeniski plašā temperatūras diapazonā (200–500 °C) [62, 66, 67, 69, 71, 73]. Cementa fāzes arī veicina masas zudumus šajā reģionā, dehidrējot ettringīta (AFt) fāzes aptuveni 120 °C un monosulfoalumināta (AFm) fāzes 180–200 °C diapazonā [74].

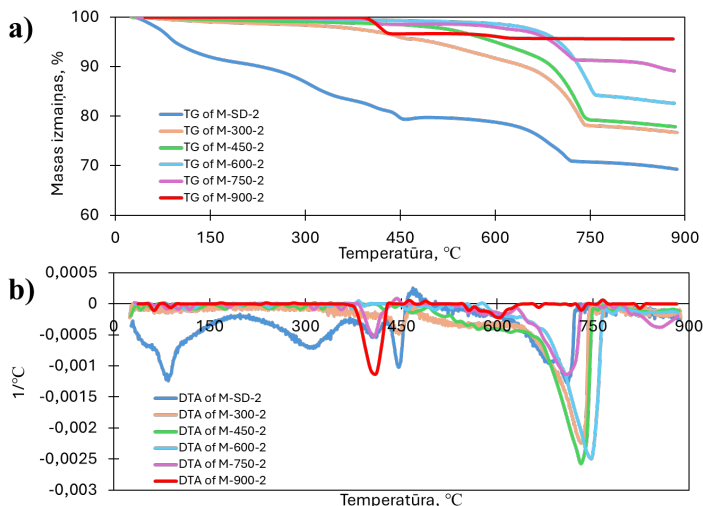
Ap 450 °C temperatūrā rodas izteikts endotermiskais pīķis, ko pavadā masas zuduma pakāpe, kas liecina par $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandīta) dihidroksilēšanu: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. Šī reakcija ir būtiska cementa ķīmijā un ietekmē materiāla turpmāko karbonizāciju [61, 62, 66–71, 73, 75–78].

Visizteiktākais endotermiskais pīķis parādās aptuveni 750 °C temperatūrā, kas sakrīt ar strauju 10–15 % masas zudumu, kas raksturo kalcija karbonāta dekarbonizāciju: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. CaCO_3 klātbūtne liecina vai nu par $\text{Ca}(\text{OH})_2$ karbonizāciju materiāla apstrādes/uzglabāšanas laikā, vai par kaļķakmens klātbūtni sākotnējā cementa sastāvā [79]. Karbonizācijas process cementa materiālu sastāvā noris pēc šādas reakcijas: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Šis process ir īpaši nozīmīgs tādām daļiņām kā slīpputekļi, jo to virsmas laukums ir liels [61, 62, 66, 68, 69, 71, 73, 76–78, 80].

Termiski apstrādātiem SD (300–900 °C) pakāpeniski samazinās masas zudumi zemākās temperatūrās, kas apstiprina termiskās sadalīšanās procesu neatgriezeniskumu. Tomēr dažu termisko notikumu saglabāšanās iepriekš karsētos paraugos liecina par vairākām iespējām:

- 1) nepilnīgas reakcijas sākotnējās sildīšanas laikā kinētisko ierobežojumu dēļ [81];
- 2) hidratu un karbonātu pārformācija dzesēšanas/uzglabāšanas laikā [82];
- 3) dažu fāžu aizsardzība kompozītmateriāla matricā [83].

Gala atlikuma masa 70–95 % robežās sniedz kvantitatīvu informāciju par kopējo gaistošo un sadalāmo saturu, atspoguļojot dehidratācijas, dihidroksilēšanas un dekarbonizācijas procesu kopējo ietekmi [84]. SD termiski apstrādājot līdz temperatūrai virs 750 °C, dzesēšanas vai uzglabāšanas procesā reformējās neliela daļa portlandīta fāzes [85, 86].



6.1. att. a) TG, b) DTA līknes izveidotajiem paraugiem.

Sadarbībā ar cementa ražotāju SIA “Schwenk” un tā laboratoriju tika noteikts materiālu elementu sadalījums un mineraloģiskais sastāvs. Dati par elementu sadalījumu apkopoti 6.2. tabulā. Palielinoties

temperatūrai, materiālā notiek fāžu izmaiņas un sadalīšanās reakcijas, ko sīkāk izskaidro 6.1. attēlā parādītais TG/DTA grafiks.

6.2. tabulā redzamas būtiskas izmaiņas koksnes vilnas cementa paneļu ražošanas atlikumu oksīdu sastāvā, tos karsējot no 0 °C līdz 1200 °C. Vislielākās izmaiņas ir vērojamas CaO satura pieaugumā no 51,1 % līdz 68,8 % maksimumam 1050 °C temperatūrā, ko izraisīja kalciju saturošu savienojumu, piemēram, kalcija karbonātu no hidratēta cementa, sadalīšanās, kā redzams no TG/DTA datiem 6.1. attēlā. Vienlaikus CO₂ saturs samazinās no 25,1 % līdz 2,3 % 1050 °C temperatūrā, kas arī liecina par karbonātu sadalīšanos. Līdzīgi CO₂ daudzumi pēc 900 °C liecina, ka visi karbonāti ir sadalījušies un atlikušais CO₂ ir kristāliski saistītais CO₂. SiO₂ pakāpeniski palielinās no 17,0 % līdz 22,1 %, kas saistīts ar masu koncentrāciju izmaiņām, sadaloties kalcija silikāta hidratētiem cementā un oksidējoties silīciju saturošiem savienojumiem koksnē. Al₂O₃ saturs nedaudz palielinās (no 2,5 % līdz 3,1 %), jo cementā notiek alumīniju saturošu fāžu dehidratācija.

6.2. tabula

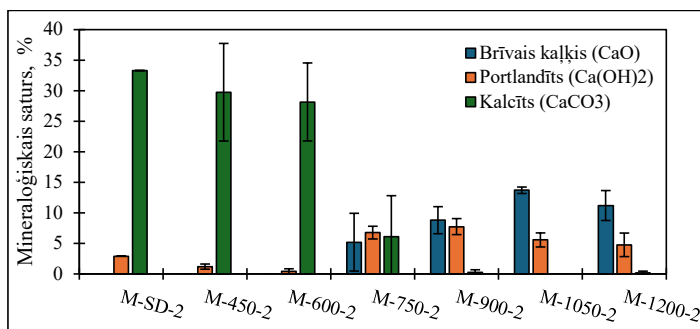
Elementu oksīdu sadalījums

Paraugs	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Cl	CO ₂	Na ₂ O ekv.
M-SD-2	17,02	2,49	0,60	51,11	1,70	1,33	0,16	0,16	0,10	0,17	0,03	0,03	25,12	0,26
M-450-2	18,28	2,72	0,67	56,96	1,79	1,56	0,19	0,19	0,11	0,17	0,03	0,03	19,72	0,31
M-600-2	18,95	2,70	0,64	59,08	1,76	1,53	0,19	0,16	0,10	0,19	0,03	0,02	16,71	0,30
M-750-2	20,01	2,91	0,68	63,60	1,81	1,56	0,19	0,17	0,11	0,19	0,04	0,02	8,70	0,30
M-900-2	21,53	3,00	0,68	67,66	1,86	1,64	0,19	0,16	0,12	0,21	0,04	0,02	3,75	0,29
M-1050-2	21,97	3,04	0,70	68,84	1,87	1,33	0,14	0,09	0,12	0,22	0,04	0,02	2,26	0,19
M-1200-2	22,05	3,13	0,70	67,65	1,88	1,23	0,10	0,06	0,12	0,22	0,04	0,01	3,19	0,14

Citiem oksīdiem, piemēram, Fe₂O₃, MgO un mazāk svarīgiem oksīdiem, šī pētījuma ietvaros karsēšanas procesa laikā tika novērotas salīdzinoši nelielas izmaiņas. SO₃ nedaudz palielinās līdz 900 °C, bet augstākā temperatūrā samazinās, kas liecina par sulfātu saturošu fāžu sadalīšanos [87]. Sārnu oksīdiem (Na₂O un K₂O) ir neliels pieaugums līdz 750 °C, kas saistīts ar koncentrācijas ietekmi, jo citi komponenti sadalās un pēc tam samazinās, jo cementa matricā augstā temperatūrā notiek iztvaikošana [88]. Šīs izmaiņas liecina par hidratēto cementa fāžu dehidratāciju un sadalīšanos, karbonātu sadalīšanos un cementa klinkerim raksturīgo kalcija, silīcija un alumīnija oksīdu veidošanos, paaugstinoties temperatūrai.

Šos datus sīkāk izskaidro XRD rezultāti, kas grafiski parādīti 6.2. un 6.3. attēlā. Koksnes vilnas cementa paneļu slīpputekļu XRD analīze sniedz visaptverošu priekšstatu par sarežģītajām mineraloģiskajām pārvērtībām, kas notiek, pakļaujot materiālu pieaugošai temperatūrai. Šai analīzei ir izšķiroša nozīme, lai izprastu materiāla uzvedību un potenciālo lietojumu otrreizējās pārstrādes vai atkārtotas izmantošanas stratēģijās.

Telpas temperatūrā M-SD-2 sastāvs atspoguļo saturošus karbonātus un karbonizācijas procesu, kas notiek cementa materiālu dzīves cikla laikā. Kalcīts (CaCO₃) ir dominējošā fāze, kas liecina par cementa fāžu karbonizāciju. Tā ir izplatīta parādība cementa materiālos, kas laika gaitā pakļauti atmosfēras CO₂ iedarbībai [89]. Neliels portlandīta (Ca(OH)₂) daudzums tika identificēts kā hidratācijas produkts. SD termiski apstrādājot līdz temperatūrai virs 750 °C, dzesēšanas vai uzglabāšanas procesā reformējas neliela daļa portlandīta fāzes [85, 86].

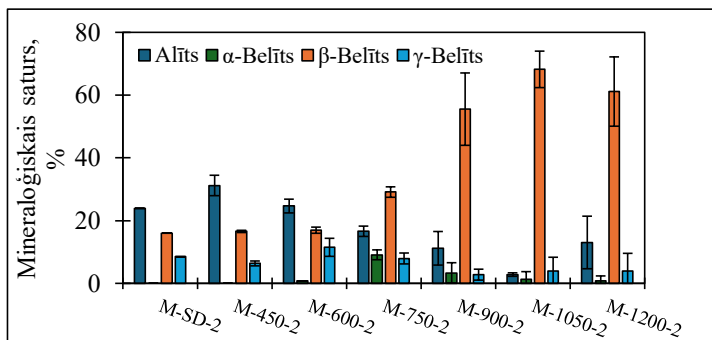


6.2. att. Brīvā kaļķa, portlandīta un kalcīta mineraloģiskā satura apkopojums.

Palielinoties temperatūrai, novērojamas sadalīšanās reakcijas un fāžu pārvērtības. Portlandīts sadalās aptuveni 450–600 °C temperatūrā, pārvēršoties par kalcija oksīdu un ūdens tvaiku. Tas saskan ar *Alarcon-Ruiz et al.* [90] secinājumiem, kuri atzīmēja, ka šī sadalīšanās cementa pastās parasti notiek 400–500 °C temperatūrā.

Vislielākās izmaiņas notiek kalcīta termiskajā sadalīšanās procesā, kas sākas ap 600–700 °C un būtībā ir pabeigts līdz 750 °C. Šis process, ko pārstāv reakcija $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$, ir atbildīgs par ievērojamo masas zudumu, kas novērots šajā temperatūras diapazonā. Šīs sadalīšanās kinētika un precīza temperatūra var atšķirties atkarībā no daļiņu lieluma, sildīšanas ātruma un CO_2 parciālā spiediena vidē [91].

Vienlaikus ar šiem sadalīšanās procesiem cementa klinkera fāzēs (C_3S un C_2S) notiek būtiskas pārvērtības. Īpaši jāatzīmē alīta (C_3S) un dažādu belīta (C_2S) polimorfu uzvedība. Alīta saturs samazinās, palielinoties temperatūrai, iespējams, tā termiskās nestabilitātes un iespējamās reakcijas ar sadalīšanās produktiem dēļ. Lai gan tīrs alīts parasti sadalās ap 1250 °C temperatūrā, tādās sarežģītās sistēmās, kā ir šī, tas var sākt pārveidoties zemākā temperatūrā [92].



6.3. att. Alīta un belīta fāžu mineraloģiskā satura apkopojums.

Belīta fāzēm piemīt vairākas polimorfas pārvērtības, kas ir ļoti svarīgas, lai izprastu materiāla mainīgās īpašības. Galvenā pāreja ir $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ pārvēršanās par $\beta\text{-C}_2\text{S}$, kas kļūst dominējoša virs 725 °C temperatūrā. Šī transformācija ir nozīmīga, jo $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ir reaktīvāks nekā $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, kas potenciāli palielina termiski apstrādāto SD hidraulisko aktivitāti [93]. Neliela $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ daudzuma parādīšanās augstākā temperatūrā (virš 750 °C) ir intriģējoša, un to var izraisīt šī augsttemperatūras polimora stabilizācija ar piemaisījumiem vai īpašiem dzesēšanas apstākļiem [94].

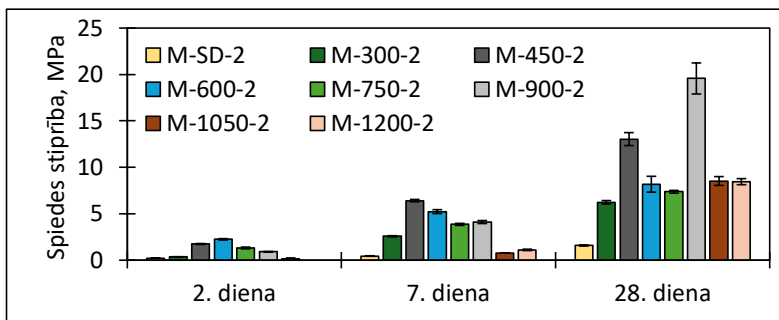
Šīm fāžu transformācijām ir svarīga ietekme uz materiāla iespējamo atkārtotu izmantošanu. Reaktīvo fāžu, piemēram, β -C₂S, palielināšanās augstākā temperatūrā liecina, ka termiskā apstrāde varētu uzlabot SD cementēšanas īpašības. Tas saskan ar *Shui et al.* pētījumiem [79], kas atklāja, ka dehidrētas cementa pastas var atgūt hidraulisko aktivitāti, potenciāli kalpojot par papildu cementējošo materiālu.

Vēl viens būtisks aspekts ir brīvā kaļķa (CaO) klātbūtne un attīstība, paaugstinoties temperatūrai (> 900 °C). Lai gan neliels brīvo kaļķu daudzums labvēlīgi ietekmē cementa reaktivitāti, pārmērīgs to daudzums var izraisīt sacietējušu cementa materiālu izplešanās un ilgizturības problēmas. Tāpēc ir rūpīgi jāizvērtē optimālā apstrādes temperatūra, lai līdzsvarotu reaktīvo fāžu veidošanos ar potenciālajiem riskiem, kas saistīti ar augstu brīvo kaļķu saturu [95].

Tika noteikts materiālu saistīšanās laiks un mehāniskās īpašības. References paraugam M-SD-2 bija visilgākais saistīšanās laiks – tas sāka saistīties pēc aptuveni 10 h un pilnībā sasaistījās pēc aptuveni 24 h. Palielinot apstrādes temperatūru, materiāls saistās ātrāk. M-300-2 parauga saistīšanās sākums tika piefiksēts pēc 5,5 stundām, bet saistīšanās beigas – pēc aptuveni 11 stundām. Palielinot temperatūru līdz 450 °C (M-450-2), saistīšanās laiks ievērojami samazinājās – saistīties sākās nedaudz vairāk nekā pēc stundas un beidzās pēc trīs stundām.

Vēl vairāk palielinot apstrādes temperatūru līdz 600 °C (M-600-2), saistīšanās laiks bija ar 40 minūšu nobīdi, salīdzinot ar M-450-2, saistīšanās sākums bija aptuveni stunda un 45 minūtes, bet beigas aptuveni trīs stundas un 45 minūtes. M-750-2 un M-900-2 paraugu saistīšanās sākums bija aptuveni piecas stundas, bet beigas – astoņas stundas. M-1050-2 paraugiem bija raksturīgs ilgs saistīšanās laiks, jo pēc 24 stundām tie bija vāji. M-1200-2 paraugi sāka saistīties pēc stundas un pilnībā sasaistījās pēc nedaudz vairāk par divām stundām. Tas izskaidrojams ar brīvā kaļķa daudzumu materiālā, kas, pievienojot ūdeni, izraisa kaļķa veldzēšanās reakciju un sasaistīšanos.

Paraugu spiedes stiprība liecina, ka izejvielu karsēšana ir ietekmējusi to stiprību. Apstrāde dažādās temperatūrās ierosina dažādas minerāloģiskās un ķīmiskās izmaiņas materiālā; koksnes piedevu gadījumā tā ir karsēšana 450 °C temperatūrā, kad koksnes daļiņas sadeg, veidojot kokogles, ko var uzskatīt par pucolānu piedevu. M-SD-2 cementa gadījumā karsēšana nozīmē veidojušos hidratu dehidratāciju, kā rezultātā notiek dehidratācija no hidratu kristāliem un savienojumi var no jauna saistīties ar ūdeni un veidot jaunus hidratācijas produktus. 6.4. attēlā redzami paraugiem iegūtie spiedes stiprības dati.



6.4. att. Paraugu spiedes stiprības apkopojums.

Paraugu spiedes stiprība palielinājās, tiem novecojot, kas atbilst cementa hidratācijas teorijai, kas nozīmē, ka hidratācija šiem paraugiem bija veiksmīga. Rezultātos, kas iegūti 2. dienā, var novērot, ka

M-600-2 uzrāda vislielāko spiedes stiprību, sasniedzot 2,2 MPa. Paraugiem novecojot, 7. dienā M-450-2 uzrādīja augstāko spiedes stiprību, sasniedzot 6,4 MPa, arī M-600-2 un M-900-2 uzrādīja paaugstinātus rezultātus, sasniedzot 5,2 MPa un 4,1 MPa. Kad paraugi izturēja līdz 28. dienai, visu paraugu spiedes stiprība palielinājās. M-1050-2 un M-1200-2 paraugiem laikā no 7. līdz 28. dienai spiedes stiprība strauji palielinājās attiecīgi no 0,8 MPa līdz 8,5 MPa un no 1,1 MPa līdz 8,5 MPa. M-450-2 un M-900-2 uzrādīja vislielāko spiedes stiprību, 28. dienā sasniedzot attiecīgi 13,0 MPa un 19,6 MPa.

6.2. Nodaļas kopsavilkums

Rezultāti skaidri norāda, ka termiskā apstrāde ir potenciāla metode, lai reaktivizētu slīpputekļus (*SD*) kā saistvielu. Pētījums parāda sarežģīto mijiedarbību starp termisko apstrādi un no tās izrietošajām fizikālajām, ķīmiskajām un mineraloģiskajām transformācijām *SD*, sniedzot kritiski svarīgu ieskatu šī atlikumu materiāla īpašību pielāgošanā, lai tās tuvinātu svaiga cementa īpašībām.

Termiski gravimetriskā (TG) analīze 300–900 °C temperatūras diapazonā atklāj sarežģītus sadalīšanās procesus, kas raksturīgi gan lignocelulozes, gan cementa materiāliem. Analīze izceļ atšķirīgus masas zuduma posmus (M-SD-2 zaudē 30 % masas) un termiskos notikumus, kas atbilst ķīmiskām un fizikālām izmaiņām, tostarp sākotnējo dehidratāciju līdz 200 °C temperatūrā, koksnes sastāvdaļu termisko degradāciju aptuveni 350 °C temperatūrā, Ca(OH)_2 dihidroksilēšanu 450 °C temperatūrā un kalcija karbonāta dekarbonizāciju, sākot no 650 °C temperatūras. Termiskā apstrāde ietekmē šos termiskos procesus, samazinot masu un mineraloģiski mainot *SD* sastāvu.

XRF dati liecina par ievērojamām *SD* oksīda sastāva izmaiņām, karsējot no 0 °C līdz 1200 °C temperatūrā. Galvenais novērojums ir CaO satura palielināšanās (no 0 % līdz 14 %) un CO_2 satura samazināšanās (no 25 % līdz 3 %), kas ir tieši saistīti ar kalciju saturošu savienojumu sadalīšanos. Oksīdu izmaiņas nepārprotami liecina par hidratēto cementa fāžu pārveidi un tādu savienojumu veidošanos, kas vairāk līdzinās cementa klinkeram.

XRD analīze sīkāk raksturo mineraloģiskās pārvērtības karsēšanas laikā. Telpas temperatūrā kalcīts ir dominējošā fāze ar 33,3 %. Temperatūrai paaugstinoties, notiek sadalīšanās reakcijas un fāžu pārvērtības, tostarp portlandīta un kalcīta sadalīšanās, kā aprakstīts iepriekš. Novērotas arī cementa klinkera fāžu pārvērtības. Šīs mineraloģiskās izmaiņas tieši ietekmē materiāla kā saistvielas atkārtotas izmantošanas iespējas.

Pētījums atklāj, ka apstrādes temperatūra būtiski ietekmē saistīšanās laiku un spiedes stiprību. Augstāka apstrādes temperatūra parasti nodrošina ātrāku saistīšanās laiku. Turklāt termiskā apstrāde acīmredzami ietekmē reaktivizētā *SD* spiedes stiprības attīstību, 28. dienā sasniedzot attiecīgi 13,0 MPa M-450-2 un 19,6 MPa M-900-2 gadījumā.

7. BIOKOMPOZĪTU AR REAKTIVIZĒTĀM SAISTVIELĀM RAKSTUROJUMS UN VEIKTSPĒJA

7.1. Biokompozīti ar mehāniski aktivizētu saistvielu

Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

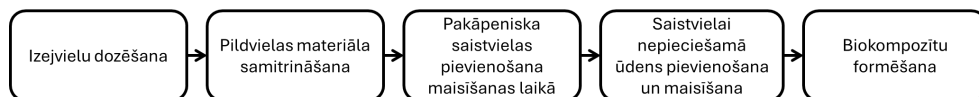
Šajā eksperimentā izmantotā saistviela ir 20 minūšu vibrācijas malti, sijāti slīpputekļi (V-20min), bet pildviela ir ražošanas līnijas atlikumi (*PLW*), kas aprakstīti 4.1. apakšnodaļā. Tika izgatavoti trīs biokompozītu sastāvi ar dažādu saistvielas saturu. Maisījumu sastāvs apkopots 7.1. tabulā.

7.1. tabula

Izstrādāto biokompozītu maisījumu dizains, masas daļas				
Paraugs	Saistviela		<i>PLW</i> (pildviela)	
	V-20min	Ūdens	Sausa	Ūdens mitrināšanai*
P1	10,0	7,0		
P2	5,0	3,5	10,0	1,0
P3	3,0	2,1		

* Pildviela pirms sajaukšanas tika samitrināta, lai pildviela neabsorbētu saistvielai paredzēto ūdeni.

Biokompozīta ražošanas procesa shēma redzama 7.1. attēlā. Viena masas daļa ūdens tika izmantota, lai samitrinātu 10 daļas ar pildvielas materiālu, lai atvieglotu saistvielas pievienošanu, ko pievieno pēc trīs minūšu pildvielas un ūdens maisīšanas. Pamatojoties uz maisījumu, mitrajam pildvielas materiālam pakāpeniski tika pievienotas 10, 5 un 3 masas daļas saistvielas un maisīja, tādējādi iegūstot viendabīgu maisījumu. Pēc tam maisījumam tika pievienots saistvielai nepieciešamais ūdens. Katram sastāvam tika izmantota *W/B* attiecība 0,7. Pēc tam maisījums tika atkārtoti samaisīts, lai veidotos viendabīgs sastāvs, un formēts 35 cm × 35 cm × 10 cm eļļotos veidņos.



7.1. att. Biokompozītu ražošanas procesa shēma.

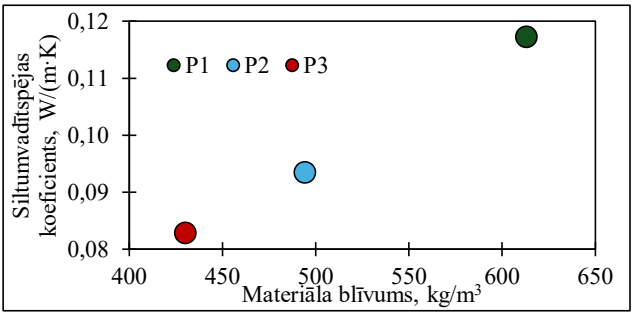
Pēc septiņām dienām biokompozīti tika atveidnoti, ietīti plastmasas plēvē, lai nodrošinātu minimālu mitruma zudumu atlikušajā sacietēšanas procesa laikā un cietināti 21 dienu istabas apstākļos (22 ± 2 °C, RH < 50 %). Pēc 28 dienu ilgas cietēšanas plastmasas plēve tika noņemta, un paraugi tika žāvēti žāvētā 45 °C temperatūrā līdz nemainīgai masai.

Rezultāti un diskusija

Paraugu materiāla blīvums ir no 430 kg/m³ līdz 613 kg/m³. P3 parauga blīvums ir viszemākais (430 kg/m³), P1 parauga blīvums – visaugstākais (613 kg/m³). Šo atšķirību iemesls ir atšķirīgais saistvielas saturs, kas izmantots paraugu izgatavošanas laikā, kā dokumentēts 7.1. tabulā. Blīvuma

vērtības sniedz būtiskas norādes materiālu izvēlei, ja svars ir kritiski svarīgs, piemēram, vieglajos konstrukcijas elementos vai siltumizolācijas sistēmās.

Paraugu siltumvadītspēja ir no 0,083 W/(m·K) līdz 0,117 W/(m·K). Šis parametrs nosaka siltuma plūsmas ātrumu caur materiālu, un tas ir svarīgs faktors, izstrādājot siltumizolācijas materiālus. Siltumvadītspējas atkarība no materiāla blīvuma ir vizualizēta 7.2. attēlā. Korelāciju starp materiāla blīvumu un siltumvadītspēju var redzēt Šahmenko [96] pētījumā, kurā tika testēti kaņepju betona paraugi, salīdzinot materiālu blīvumu un siltumvadītspēju. Tika konstatēts, ka, pat izmantojot dažādas saistvielas, salīdzinot Šahmenko pētījumu ar šajā pētījumā izstrādātajiem materiāliem, var secināt, ka šiem materiāliem ir zemāka siltumvadītspēja pie vienāda materiāla blīvuma. Tomēr spiedes stiprība ir zemāka, jo saistviela pati par sevi nav stipra.



7.2. att. Siltumvadītspējas atkarība no materiāla blīvuma P sērijas paraugiem.

Pamatojoties uz 7.2. tabulā sniegtajām lieces un spiedes stiprības vērtībām, var secināt, ka biokompozītiem piemīt vidējas vai zemas stiprības īpašības. Lieces stiprības vērtības svārstās no 0,06 MPa līdz 0,24 MPa, kas liecina, ka materiāls vāji iztur lieces spēkus. Arī spiedes stiprības vērtības ir mērenas, atkarībā no iestrādes virziena tās svārstās no 0,06 MPa līdz 0,47 MPa.

7.2. tabula

Izveidoto biokompozītu mehāniskās īpašības			
Paraugs	Lieces stiprība, MPa	Spiedes stiprība atkarībā no iestrādes virziena, MPa	
		Paralēli	Perpendikulāri
P1	0,24	0,47	0,33
P2	0,11	0,26	0,09
P3	0,06	0,18	0,06

Salīdzinot trīs izstrādātos biokompozītu prototipus, visaugstākās vērtības abos spiedes un lieces stiprības virzienos ir paraugam P1, sasniedzot 0,24 MPa lieces stiprības un 0,47 MPa un 0,33 MPa attiecīgi paralēli un perpendikulāri iestrādes virzienam spiedē. Vismazākās vērtības tika konstatētas paraugam P3, kas apstiprina, ka, izmantojot vismazāko saistvielas daudzumu, tiktu iegūta vismazākā lieces un spiedes stiprība. P3 uzrādīja 0,06 MPa lieces stiprību, 0,18 MPa un 0,06 MPa spiedes stiprību paralēli un perpendikulāri iestrādes virzienam. P2 paraugs sasniedza 0,11 MPa lieces stiprību un 0,26 MPa spiedes stiprību paralēli un 0,09 MPa perpendikulāri iestrādes virzienam. Izstrādātajiem biokompozītiem bija labas termiskās īpašības, salīdzinot ar citiem biokompozītiem. Biokompozītus ir

daudzsoļoši izmantot norobežojošo konstrukciju sistēmās kā vidējo slāni, pildot siltumizolācijas materiālu lomu.

7.2. Biokompozīti ar termiski apstrādātiem slīpputekļiem

7.2.1. Biokompozīti ar 450 °C temperatūrā karsētiem slīpputekļiem

Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

Kā saistviela tika izmantota 450 °C temperatūrā termiski apstrādāti slīpputekļi (M-450-2). Kā pildviela tika izmantoti ražošanas līnijas atlikumi (*PLW*), kas aprakstīti 4.1. apakšnodaļā. Tika izveidoti trīs dažādi biokompozītu sastāvi, katrs ar atšķirīgu saistvielas daudzumu. 7.3. tabulā apkopots sastāvu dizains.

7.3. tabula

Ar 450 °C termiski apstrādātiem slīpputekļiem izgatavoto biokompozītu maisījumu dizains, masas daļas

Paraugs	Saistviela		<i>PLW</i> (pildviela)	
	M-450-2	Ūdens	Sausa	Ūdens mitrināšanai*
H12	1,00	0,60	2,00	0,60
H13	0,67	0,40		
H14	0,50	0,30		

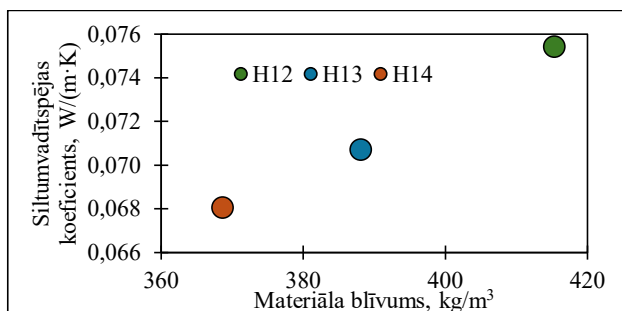
* Pildviela pirms sajaukšanas tika samitrināta, lai pildviela neabsorbētu saistvielai paredzēto ūdeni.

Paraugu izgatavošana tika veikta saskaņā ar 7.1. attēlā redzamo plūsmas diagrammu. Kad paraugs bija izveidots, uz tā tika uzlikta plāksne, lai nodrošinātu spiedienu un gludāku virsmas struktūru. Lai uzlabotu saistvielas un koksnes šķiedru saķeri, paraugiem tika piemērots sākotnējais spiediens 571 Pa. Pēc sākotnējā spiediena pielikšanas uz 60 sekundēm paraugiem tika pielikts atsvars, lai to sacietēšanas laikā uzturētu sekundāru 65 Pa spiedienu. Pēc septiņām dienām paraugi tika atveidoti un ietīti plastmasas plēvē, lai nodrošinātu pēc iespējas mazāku mitruma zudumu, un tie tika cietināti 21 dienu istabas apstākļos (22 ± 2 °C, RH < 50 %).

Rezultāti

Tika novērtēta izveidoto biokompozītu siltumvadītspēja un mehāniskās īpašības. Mehāniskās īpašības ietver lieces un spiedes izturību. Pirms siltumvadītspējas testēšanas paraugi tika izžāvēti žāvakapī 45 °C temperatūrā, līdz masa nemainījās (aptuveni nedēļa).

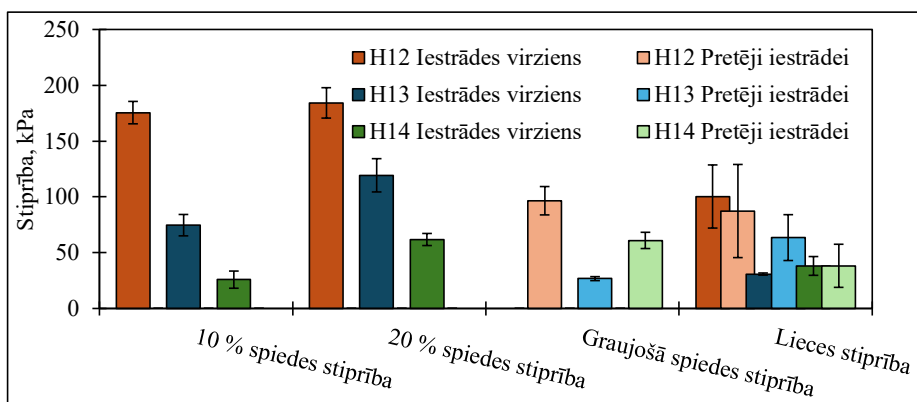
Materiāla blīvums un siltumvadītspēja apkopota 7.3. attēlā. Šajā attēlā redzama pozitīva korelācija starp materiāla blīvumu un siltumvadītspēju biokompozītmateriālos ar mainīgu saistvielas un pildvielas attiecību. Abām īpašībām ir skaidra augšupejoša tendence, mainoties attiecībai no 1 : 4 (H14) līdz 1 : 2 (H12). H14 paraugs ar lielāko pildvielas saturu uzrāda zemākās vērtības ar aptuveni 370 kg/m³ materiāla blīvumu un 0,068 W/(m·K) siltumvadītspējas koeficientu. H13 (attiecība 1 : 3) abas īpašības palielinās attiecīgi līdz aptuveni 390 kg/m³ un 0,071 W/(m·K). H12 paraugam ar visaugstāko saistvielas saturu (attiecība 1 : 2) ir visaugstākās vērtības – aptuveni 415 kg/m³ un 0,075 W/(m·K).



7.3. att. Siltumvadītspējas atkarība no materiāla blīvuma H sērijas paraugiem.

Šī tendence liecina, ka, samazinot pildvielas saturu (vai palielinot saistvielas relatīvo saturu), tiek iegūti blīvāki materiāli ar augstāku siltumvadītspēju [97]. Šī sakarība tiek skaidrota ar to, ka saistviela, iespējams, veido viendabīgāku matricu ar mazāku tukšumu skaitu, kā rezultātā rodas labāka siltumplūsma caur materiālu [98]. Tomēr jāpiemin, ka šī ir relatīvi lineāra sakarība, kas liecina par saistvielas un pildvielas attiecības konsekventu ietekmi uz biokompozītu fizikālajām un termiskajām īpašībām [99]. Šāda izpratne varētu būt vērtīga, lai pielāgotu materiāla īpašības konkrētiem lietojumiem.

Paraugu H12, H13 un H14 (7.4. att.) spiedes un lieces stiprības analīze liecina par mehānisko īpašību atšķirībām. H12 sasniedza 175 ± 10 kPa (10 % deformācija), 184 ± 14 kPa (20 % deformācija) un 100 ± 28 kPa lieces stiprība formēšanas virzienā; perpendikulārā iestrādes virzienā stiprība ir mazāka (attiecīgi 97 ± 13 kPa un 87 ± 42 kPa). H13 uzrāda zemāku spiedes stiprību (75 ± 10 kPa un 119 ± 15 kPa iestrādes virzienā; 27 ± 2 kPa perpendikulāri iestrādes virzienam) un lieces stiprību (31 ± 1 kPa un 64 ± 21 kPa). H14 spiedes stiprība ir lielāka perpendikulāri iestrādes virzienam pie 10 % deformācijas (61 ± 7 kPa pret 26 ± 8 kPa), bet tas mainās pie 20 % deformācijas (62 ± 5 kPa). H14 lieces stiprība ir 38 ± 8 kPa. Testēšanas virziens ietekmē paraugu mehāniskās īpašības. Labāka datu vizualizācija redzama 7.4. attēlā, kurā apkopotas visas mehāniskās īpašības.



7.4. att. Mehānisko īpašību apkopojums.

7.2.2. Biokompozīti ar 600 °C temperatūrā karsētiem slīpputekļiem

Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

Kā saistviela tika izmantota 600 °C temperatūrā termiski apstrādāti slīpputekļi (M-600-2). Saistvielas īpašības ir raksturotas 6.1. apakšnodaļā. Ražošanas līnijas atlikumi (*PLW*) un kaņepju spaļi bija izmantoti kā pildvielas. Kaņepju spaļi tika izmantoti, lai noskaidrotu, cik zems var būt siltumvadītspējas koeficients, lai gan tika izvirzīta hipotēze, ka tā konsekvētais rezultāts būs zema spiedes stiprība. Ar 600 °C temperatūrā karsētu *SD* izgatavoto biokompozītu maisījumu dizains apkopots 7.4. tabulā.

7.4. tabula

Biokompozītu, kas izgatavoti ar 600 °C temperatūrā karsētu *SD*, maisījumu dizaini, masas daļas

Paraugs	Saistviela		Pildviela		
	M-600-2	Ūdens	Sausa		Ūdens mitrināšanai*
			<i>PLW</i>	Kaņepju spaļi	
PLW12	1,00	0,60	2,00		1,00
Hemp12				2,00	2,40
Mix12			1,00	1,00	1,80
PLW21	2,00	1,20	2,00		0,50
Hemp21				2,00	1,20
Mix21			1,00	1,00	0,85

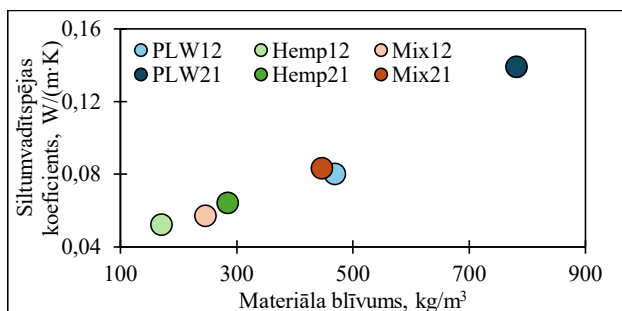
* Pildviela pirms sajaukšanas tika samitrināta, lai pildviela neabsorbētu saistvielai paredzēto ūdeni.

Lai samitrinātu kaņepju spaļus, tika izmantots vairāk ūdens, jo tie uzsūc vairāk nekā *PLW*. Ūdens daudzums, kas tika pievienots saistvielai, visiem paraugiem bija vienāds – 0,6 masas daļas no saistvielas. Šī attiecība tika izvēlēta, pamatojoties uz rezultātiem, kas parakstīti 6. nodaļās. Paraugu izgatavošanas procesa shēma redzama 7.1. attēlā. Pēc maisījuma ieviešanas virsma tika nogludināta ar plāksni, tai uzliktot atsvaru, lai iegūtu labākas virsmas īpašības. Paraugi ar plāksni un slodzi tika atstāti cietēt pirmās septiņas dienas, līdz paraugi tika atveidnoti un ietīti plastmasas plēvē, lai nezaudētu mitrumu paraugos. Biokompozīti tika cietināti vēl 14 dienas. Paraugi tika žāvēti 45 °C temperatūrā, līdz tika iegūta nemainīga parauga masa. Materiāla raksturošanai tika izmantoti tikai sausi paraugi.

Rezultāti

Tika izgatavoti seši dažādi biokompozīti – trīs paraugiem saistvielas un pildvielas masas attiecība bija 1 : 2, pārējo trīs paraugu saistvielas un pildvielas masas attiecība bija 2 : 1. Eksperimentālajos pētījumos tika noteiktas galvenās materiāla fizikālās un mehāniskās īpašības, tostarp struktūra, materiāla blīvums, siltumvadītspēja, kā arī spiedes un lieces stiprība.

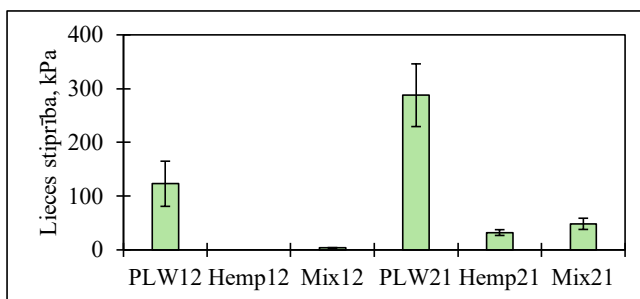
Visos paraugos pastāv skaidra pozitīva korelācija starp materiāla blīvumu un siltumvadītspēju (7.5. att.). *PLW21* paraugs izceļas ar ievērojami augstākām abu īpašību vērtībām (materiāla blīvums 782 kg/m³ un siltumvadītspēja 0,139 W/(m·K)), kas liecina, ka ražošanas līnijas atlikumi ar attiecību 2 : 1 rada blīvāku un siltumvadāmāku materiālu. Turpretī *Hemp12* uzrāda zemākās vērtības (171 kg/m³ un 0,052 W/(m·K)), kas norāda, ka kaņepju spaļi ar attiecību 1 : 2 rada vieglāku, siltumizolējošāku materiālu.



7.5. att. Siltumvadītspējas atkarība no materiāla blīvuma PLW, Hemp un Mix sērijas paraugiem.

Paredzams, ka Mix paraugi (Mix12 un Mix21) koncentrējas vidējā diapazonā (aptuveni 247–447 kg/m³ un 0,057–0,083 W/(m·K)), kas liecina, ka abu pildvielu kombinēšana vai *PLW* izmantošana ar zemāku attiecību rada materiālus ar optimālām īpašībām. Hemp21 uzrāda nedaudz augstākas vērtības nekā Hemp12, bet, salīdzinot ar *PLW* paraugiem, tām joprojām ir mazāks materiāla blīvums, parādot, ka kaņepju spaļi konsekventi veicina vieglāku kompozītu veidošanos neatkarīgi no attiecības. Šīs īpašību atšķirības atkarībā no pildvielas veida un attiecības nodrošina elastību biokompozītu pielāgošanā dažādiem lietojumiem, sākot no siltumizolācijas (*Hemp paraugi*) līdz mazas slodzes nesošiem konstrukciju materiāliem (*PLW paraugi*).

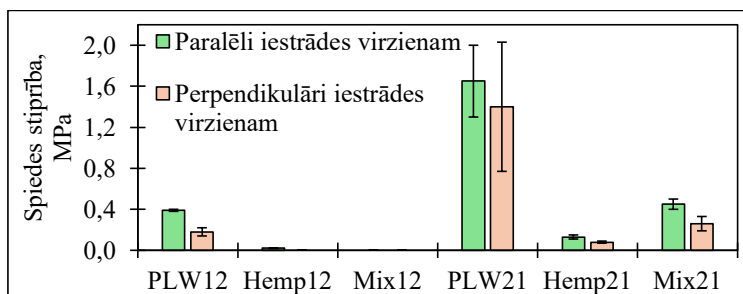
7.6. attēlā redzami izgatavoto biokompozītu stiepes izturības rezultāti. Atkarībā no sastāva biokompozīti uzrāda lieces stiprību līdz 288 kPa.



7.6. att. Lieces stiprības apkopojums PLW, Hemp un Mix sērijas paraugiem.

Rezultāti liecina, ka kaņepju spaļu klātbūtne materiālā ievērojami samazina lieces stiprību. Tas ir saistīts ar to, ka kaņepju spaļu biokompozītiem ir relatīvi slikta kontaktzonu saķere, kas samazina kopējo stiprību.

Spiedes stiprība tika pārbaudīta pie 10 % deformācijas visiem paraugiem un pie PLW21 parauga kritiskās slodzes, jo tas bija vienīgais paraugs, kura slodzes/deformācijas līknes liecināja par izteiktu kritiskās slodzes sasniegšanu. 7.7. attēlā redzami iegūto biokompozītu spiedes stiprības rezultāti. Paralēli formēšanas virzienam izgatavoto biokompozītu spiedes stiprība svārstās no 0,02 MPa līdz 1,65 MPa atkarībā no izmantotās pildvielas un saistvielas/pildvielas attiecības. Mix12 paraugiem nebija iespējams veikt spiedes stiprības testu, jo materiāls bija pārāk trausls.



7.7. att. Biokompozītu spiedes stiprība pie 10 % deformācijas.

Salīdzinot ar tirdzniecībā pieejamajiem koksnes vilnas cementa paneļiem, PLW12 parauga īpašības ir līdzīgas komerciālajiem koksnes vilnas cementa paneļiem ar spiedes stiprību paralēli formēšanas virzienam 0,3 MPa. Jāatzīmē, ka komerciālie koksnes vilnas cementa paneļi tiek ražoti viendabīgāk, tāpēc eksperimentālos rezultātus varētu uzlabot, mainot izgatavošanas tehnoloģiju. PLW21 paraugs uzrāda vairāk nekā divas reizes lielāku spiedes stiprību nekā PLW12 paraugs, lai gan šo biokompozītu materiāla blīvums atšķiras mazāk kā divas reizes.

Paraugu spiedes stiprība ir perpendikulāra iestrādes virzienam, un visos gadījumos tā ir aptuveni divas reizes mazāka nekā paralēli iestrādes virzienam. Tas liecina, ka visi izgatavotie biokompozīti ir anizotropi un to mehāniskās īpašības būtiski atšķiras atkarībā no pildvielas orientācijas materiālā un iestrādes virziena.

Ņemot vērā pētījuma mērķi izpētīt koksnes vilnas cementa paneļu ražošanas atlikumu izmantošanu, abi izgatavotie biokompozīti (PLW12 un PLW21) tika salīdzināti ar komerciāli pieejamām akustiskajām koksnes vilnas cementa plātnēm, ko ražo SIA “Cewood”, un tika veikta to salīdzināšana. Salīdzinājums apkopots 7.5. tabulā.

7.5. tabula

Izgatavoto biokompozītu un SIA “Cewood” koksnes vilnas cementa paneļu īpašību salīdzinājums

Raksturlielums	“Cewood” akustiskais panelis	PLW12	PLW21
Šķiedras platums, mm	1,5	1,5	1,5
Produkta biezums, mm	25	40	31
Materiāla blīvums, kg/m ³	420	470	780
Siltumvadītspējas koeficients (λD), W/(m·K)	0,066	0,080	0,139
Lieces stiprība (EN 12089), kPa	≥ 1300	≥ 75	≥ 220
Spiedes stiprība (EN 826), kPa	≥ 300	≥ 380	≥ 1500

Kā redzams 7.5. tabulā, pētījumā iegūtajiem biokompozītiem ir zemāka lieces izturība (≥ 220 kPa PLW21 un ≥ 75 kPa PLW12) un augstāka spiedes izturība (≥ 1500 kPa PLW21 un ≥ 380 kPa PLW12) nekā tirdzniecībā pieejamajiem materiāliem. Lai gan komerciālie koksnes vilnas cementa paneļu izstrādājumi tiek izgatavoti no svaiga cementa un garākām koksnes šķiedrām, šī pētījuma rezultātus var uzskatīt par apmierinošiem. PLW21 nav piemērots vizuālā ziņā, savukārt PLW12 ir salīdzināms ar “Cewood” ražotajiem materiāliem.

7.3. Biokompozīti ar CEM II/A-LL 42,5 N

Maisījuma dizains un paraugu izgatavošana

Lai salīdzinātu biokompozītu īpašības ar to biokompozītu īpašībām, kas izgatavoti ar izstrādātajām saistvielām, kā saistviela tika izmantots CEM II/A-LL 42,5 N. Izmantojot komerciāli pieejamu saistvielu, var novērtēt izstrādāto saistvielu efektivitāti.

Ražošanas līnijas atlikumi (*PLW*) tika pētīti kā pildviela biokompozītu ražošanai. Tika pārbaudīta un novērtēta saistvielas un pildvielas attiecības ietekme. Biokompozītus izgatavoja ar dažādām CEM II/A-LL 42,5 N un *PLW* attiecībām (7.6. tab.). CEM II/A-LL 42,5 N un *PLW* attiecība bija 1 : 2, 1 : 3 un 1 : 4. Palielinoties *PLW* saturam maisījuma sastāvā, palielinājās ūdens un pildvielas (*W/F*) attiecība. Maisījumā ar attiecību 1 : 2 *W/F* attiecība bija 0,7. Maisījumā 1 : 3 tā palielinājās līdz 1,3; maisījumā 1 : 4 *W/F* attiecība palielinājās līdz 1,6. Iepriekšējos pētījumos ūdens varēja sasniegt un pārsniegt pildvielas satura attiecību 1 : 1 [100–102].

Lai samazinātu biokompozītu materiāla blīvumu, tika novērtēta daļēja *PLW* aizstāšana ar kaņepju spaļiem (*HS*). Iepriekšējie pētījumi parādīja, ka *HS* pievienošana ļauj iegūt biokompozītus ar materiāla blīvumu no 200 kg/m³ līdz 400 kg/m³ [103]. Tika pieņemts, ka 25 %, 50 % un 75 % no *PLW* masas aizstāj ar *HS* (7.6. tab.). CEM II/A-LL 42,5 N un pildvielas masas attiecība palika 1 : 2. *HS* tilpummasas blīvums ir ievērojami mazāks nekā *PLW* (100 kg/m³ *HS*, salīdzinot ar 300 kg/m³ *PLW*).

7.6. tabula

Ar CEM II/A-LL 42,5 N izgatavoto biokompozītu maisījumu dizains, masas daļas

Paraugs	Saistviela		Pildviela	
	CEM II/A-LL 42,5 N	Ūdens	Sausa	Ūdens mitrināšanai*
			<i>PLW</i> Kaņepju spaļi	
I			2,0	0,7
II			3,0	1,3
III	1,0	0,4	4,0	1,6
H25			1,5	0,5
H50			1,0	1,0
H75			0,5	1,5

* Pildviela pirms sajaukšanas tika samitrināta, lai pildviela neabsorbētu saistvielai paredzēto ūdeni.

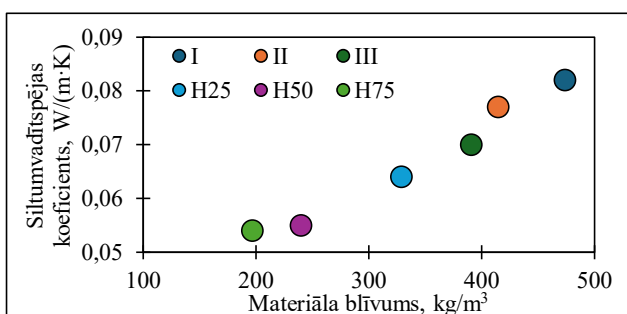
Visas sausās sastāvdaļas tika nosvērtas, bet pirms sajaukšanas (7.8. a att.) pildvielas tika sajauktas ar ūdeni un maisītas divas minūtes, lai samitrinātu virsmu (7.8. b att.). Sajaukšanai tika izmantots elektriskais maisītājs *RubiMix*. Pēc pildvielas samitrināšanas tika pievienots CEM II/A-LL 42,5 N, un turpināts maisīt divas minūtes (7.8. c att.). Kad maisījums bija homogēns, tas tika ievaidnots (7.8. d att.). Tālākai testēšanai tika sagatavoti paraugi, kuru izmērs bija no 35 cm × 35 cm, augstums – no 5 cm līdz 10 cm.



7.8. att. Biokompozītu izgatavošanas procedūra: a) *PLW* pildviela; b) pildvielas samitrināšana, samaisīšana; c) saistvielas iestrādāšana maisījumā; d) biokompozīta formēšana.

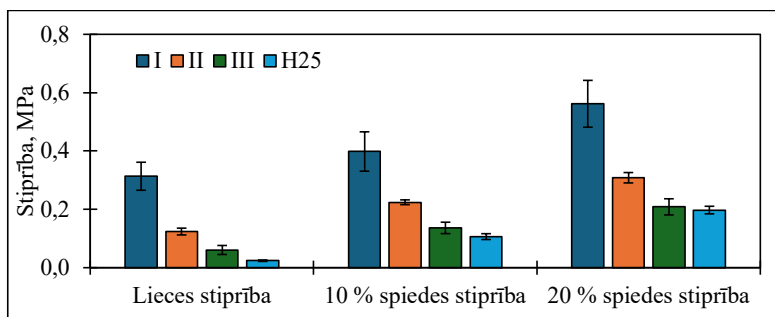
Rezultāti un diskusija

Aplūkojot 7.9. attēlu, redzama skaidra pāreja materiāla uzvedībā. Paraugi I, II un III (ar *PLW* kā pildvielu) uzrāda lielāku materiāla blīvumu ($391\text{--}474\text{ kg/m}^3$) un augstāku siltumvadītspēju ($0,070\text{--}0,082\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). Palielinoties kaņepju spaļu procentuālajam daudzumam no 0 % līdz 75 %, materiāla blīvums un siltumvadītspēja sistemātiski samazinās, un H75 uzrāda zemākās vērtības – 197 kg/m^3 un $0,054\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Šo tendenci var skaidrot ar kaņepju vieglo svaru un šūnu struktūru, kā to dokumentējuši Arnaud un Gourlay [104].



7.9. att. Siltumvadītspējas atkarība no materiāla blīvuma CEM II sērijas paraugiem.

Mehāniskās stiprības dati redzami 7.10. attēlā. H50 un H75 bija pārāk trausli, lai tos testētu, tāpēc tika secināts, ka šie paraugi nav izmantojami promocijas darba mērķiem. Lielākais CEM II/A-LL 42,5 N daudzums biokompozītā (paraugs I) uzrāda $0,31\text{ MPa}$ lieces stiprību un $0,56\text{ MPa}$ spiedes izturību pie 20 % deformācijas. Samazinot CEM II/A-LL 42,5 N (paraugs II), stiprība samazinājās līdz $0,12\text{ MPa}$ lieces stiprībai un $0,31\text{ MPa}$ spiedes stiprībai pie 20 % deformācijas. III parauga lieces stiprība sasniedza $0,06\text{ MPa}$ un spiedes stiprība – $0,21\text{ MPa}$ pie 20 % deformācijas. Tomēr viszemākā stiprība bija biokompozītiem ar HS. Bija iespējams pārbaudīt tikai H25, H50 un H75 bija par trauslu, lai testētu, un tā lieces stiprība bija $0,02\text{ MPa}$, savukārt spiedes stiprība sasniedza $0,20\text{ MPa}$ pie 20 % deformācijas.



7.10. att. Biokompozītu mehāniskās stiprības apkopojums.

7.4. Biokompozītu demonstrēšana

Ar mehāniski aktivizētu saistvielu (V-20min) izgatavotā biokompozīta aprobācija un lietošanas iespējamība tika praktiski apstiprināta reālos ekspluatācijas apstākļos. Tika izveidots eksperimentāls stends (7.11. att.), kurā tika izmantoti divi izstrādāto biokompozītu sastāvi. Izmantotā saistviela bija ar vibrāciju malšanu malts *SD*, kas tika malts 20 minūtes. Vibrācijas dzirnavas tika izmantotas, jo ar tām var samalt lielāku materiāla daudzumu nekā ar planetārajām dzirnavām. Kā pildviela tika izmantots *PLW* (4.1. att.), kas tika savākts no *WWCP* ražotnes dažas dienas pirms stenda būvēšanas. Eksperimentālā stenda izgatavošana aizņēma divas dienas.



7.11. att. Eksperimentālā stenda koka karkass.

Kopumā ar izveidoto biokompozītu tika aizpildītas divas sienas. Abām sienām bija nelielas sastāva atšķirības, lai iegūtu dažādus rezultātus. Pirmajā dienā tika veikti materiālu mērījumi, lai vēlāk palielinātu darba efektivitāti. Sausās vilnas blīvums tika noteikts, izmantojot noteikta tilpuma spaini, kurā tika ielikta koksnes vilna, tā tika nosvēra, un tika aprēķināts tās blīvums. Kopējais blīvums bija aptuveni 70 kg/m^3 , bet, kad materiāls tika saspiests (imitējot starpsienas aizpildījumu), blīvums bija aptuveni 200 kg/m^3 . Blīvums mainās atkarībā no tā, vai vilna ir mitra vai sausa, mitras vilnas gadījumā blīvums var sasniegt 270 kg/m^3 . Gan saistviela, gan pildviela tika nosvērta pirms katras sajaukšanas.

Koka karkasa iekšējo un ārējo sienu veidoja brāķētas *WWCP*, kura vidusdaļa tika aizpildīta ar izstrādāto biokompozītu.

Pildviela tika iebērta betona maisītājā, un, lai samitrinātu koksnes vilnu, tika pievienots ūdens 15 % apmērā no pildvielas masas. Pēc tam tika pievienota saistviela 25–30 % no pildvielas masas, un viss tika samaisīts. Kad saistviela bija izmaisīta mitrajā pildvielā, tika pievienots vēl ūdens (60 % no saistvielas masas). Viss tika sajaukts divas minūtes un, nedaudz sablīvējot, iepildīts sienā.

Uzbūvējot šo eksperimentālo stendu, tika izgatavoti mazāki laboratorijas mēroga paraugi, kuru izmēri bija 600 mm × 600 mm × 180 mm (7.12. att.). Laboratorijas paraugi tika izgatavoti no diviem bojātiem *WWCP*, kas piestiprināti pie koka rāmja abām pusēm, un augšējā daļa arī bija *WWCP*. Paneļa vidējo slāni veidoja izstrādātais materiāls. Tika pārbaudīts paneļu blīvums un siltumvadītspēja. Laboratorijas paraugu sastāvs bija tāds pats kā eksperimentālajam stendam, un tas bija tuvs 7.1. apakšnodaļā aprakstītajam P3 paraugam. Visa paneļa blīvums bija 323 kg/m³, siltumvadītspēja – 0,0709 W/(m·K). Pēc tam no veidnes tika izņemts vidējais slānis un testēts atsevišķi. Tā blīvums bija 245 kg/m³, siltumvadītspēja 0,0796 W/(m·K).



7.12. att. Eksperimentālā stenda laboratorijas paraugs.

Pēc sienu aizpildīšanas un sensoru izvietojanas eksperimentālais stends izskatījās tā, kā redzams 7.13. attēlā. Pēc tam tika turpināta eksperimentālā stenda būvniecība, pievienojot jumtu, durvis, fasādi un apkures sistēmu. Patlaban stends joprojām tiek izmantots.



7.13. att. Eksperimentālā stenda vizuālais izskats pēc daudzslāņu paneļu iestrādes pabeigšanas.

7.5. Nodaļas kopsavilkums

Šajā pētījumā tika pētīti biokompozīti ar dažādām saistvielām ilgtspējīgai būvniecībai. Mehāniski aktivizēti slīpputekļi (V-20min) parādīja, ka lielāks saistvielas saturs palielina blīvumu (613–430 kg/m³) un uzlabo mehāniskās īpašības, sasniedzot līdz 236 kPa lieces un 469 kPa/330 kPa spiedes stiprību (paralēli/perpendikulāri iestrādes virzienam). Turpretī mazāks saistvielas saturs uzlaboja siltumizolācijas koeficientu (līdz 0,083 W/(m·K)), un starp stiprību un siltumtehnikajām īpašībām bija novērojama apgrieztā sakarība starp visām saistvielām.

Biokompozītiem ar 450 °C temperatūrā apstrādātu *SD* bija līdzīga blīvuma (369–415 kg/m³) un siltumvadītspējas (0,068–0,075 W/(m·K)) korelācija. Blīvākiem paraugiem bija augstāka mehāniskā izturība, un visiem paraugiem bija raksturīga anizotropiska uzvedība. Ar 600 °C temperatūrā apstrādātiem *SD* biokompozīti uzrādīja potenciālu, bet kaņepju spaļu maisījumiem tika novērota slikta

kontaktzonas izveide un pildvielas saķere ar saistvielām. Kaņepju spaļi uzlaboja termiskās īpašības (līdz $0,052 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) uz mehāniskās stiprības rēķina. Portlandcimenta biokompozīti, kuros izmantota pārstrādāta koksnes vilna, sasniedza $391\text{--}511 \text{ kg/m}^3$ materiāla blīvumu. Kaņepju pievienošana samazināja blīvumu (līdz 197 kg/m^3) un uzlaboja siltumtehniskās īpašības ($0,054 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), iegūstot pašnesošu siltumizolācijas materiālu.

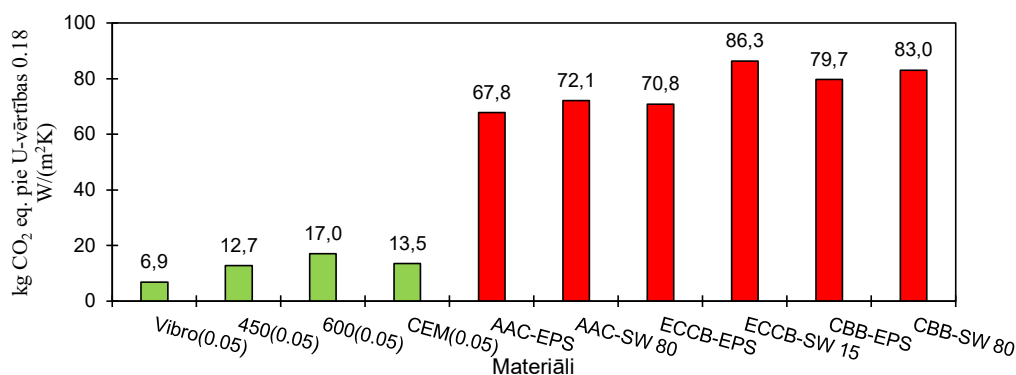
Dažādām saistvielām zemāks blīvums uzlaboja termiskās īpašības (kaņepju spaļu maisījumi sasniedza $0,052\text{--}0,054 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), savukārt lielāks materiāla blīvums palielināja mehānisko stiprību; bieži bija vērojama anizotropiska uzvedība. Mehāniski aktivizēts *SD* nodrošina līdzsvarotu īpašību attiecību. Kaņepju spaļu piedeva ir piemērota zemāka siltumizolācijas koeficienta sasniegšanai. Pārstrādātiem koksnes vilnas cementa kompozītmateriāliem piemīt aprītes ekonomikas potenciāls. Šie biokompozīti ir alternatīva lietojumiem, kam nepieciešama līdzsvarota stiprība un izolācija, piemēram, nenesošām sienām un siltumizolācijas materiāliem. Eksperimentālā stendā tika apstiprināta mehāniski aktivizētu saistvielu biokompozītu iestrādājamība. Turpmākajos darbos tiks optimizētas materiālu īpašības, novērtēta ilgtermiņa veiktspēja un ietekme uz vidi, kā arī mērogamības palielināšana.

8. IZVEIDOTO BIOKOMPOZĪTU DZĪVES CIKLA NOVĒRTĒJUMS

Izstrādātie biokompozīti ar ierosināto spiedes stiprību 0,05 MPa, kas iestrādāti norobežojošās konstrukciju sistēmās, tika salīdzināti ar komerciāli izmantojamiem sienas pīrāgiem. Komerciālās sienas pīrāgi ietvēra gāzbetonu (*AAC*), keramzītcementa blokus (*ECCB*) un keramiskos celtniecības blokus (*CBB*) kā nesošos materiālus un putupolistirolu (*EPS*), akmens vati (*SW*) 15 un 80 kā siltumizolācijas materiālus. Visas salīdzinātās norobežojošo konstrukciju sistēmas nodrošina U vērtību 0,18 W/(m²·K). Sistēmai, kurā izmantoti izstrādātie biokompozīti, ir liela siltuma inerce, tāpēc salīdzinājums tika veikts ar līdzīgiem materiāliem.

LCA dati redzami 8.1. attēlā, un tie parāda, ka, salīdzinot ar tradicionālajām ēku norobežojošo konstrukciju sistēmām, izstrādātie biokompozīti sniedz ievērojamas vides aizsardzības priekšrocības. Četriem biokompozītu variantiem (*Vibro*(0,05), 450(0,05), 600(0,05) un *CEM*(0,05)) ir ievērojami zemākas CO₂ emisijas, kas svārstās no 6,9 kg CO₂ ekv. līdz 17,0 kg CO₂ ekv., no kuriem *Vibro*(0,05) uzrāda vismazāko ietekmi uz vidi – tikai 6,9 kg CO₂ ekv.

Turpretī komerciāli izmantojamajās norobežojošās konstrukciju sistēmas rada lielākas CO₂ emisijas. *AAC-EPS* sistēma rada 67,8 kg CO₂ ekv., savukārt *AAC-SW 80* un *ECCB-EPS* – attiecīgi 72,1 kg CO₂ ekv. un 70,8 kg CO₂ ekv. Vislielākās emisijas ir saistītas ar *ECCB-SW 15* – 86,3 kg CO₂ ekv., kam seko *CBB-SW 80* (83,0 kg CO₂ ekv.) un *CBB-EPS* (79,7 kg CO₂ ekv.).



8.1. att. Emisiju salīdzinājums ar tradicionālajām ēku norobežojošo konstrukciju sistēmām.

Šis salīdzinājums liecina, ka biokompozīti, kas izstrādāti no koksnes vilnas cementa paneļu ražošanas un ražošanas līnijas atlikumiem, nodrošina CO₂ emisiju samazinājumu par aptuveni 75–90 %, salīdzinot ar komerciālām sistēmām. Pat visaugstāko emisiju biokompozīta sistēma (600(0,05) ar 17,0 kg CO₂ ekv.) joprojām rada tikai aptuveni 25 % oglekļa emisiju no videi visnekaitīgākās parastās sistēmas (*ACC-EPS* ar 67,8 kg CO₂ ekv.).

Šie biokompozīti ir daudzsoļš sasniegums ilgtspējīgu būvmateriālu jomā. To spēja sasniegt nepieciešamās siltumtehnikās īpašības (U vērtība 0,18 W/m²·K), vienlaikus ievērojami samazinot CO₂ emisijas, padara tos īpaši vērtīgus zema oglekļa satura ēku iniciatīvās. Aprites ekonomikas pieeja – ražošanas atlikumu plūsmu atkārtota izmantošana par saistvielu un pildvielu – lieliski atbilst pieaugošajām nozares prasībām samazināt atlikumu daudzumu un uzlabot resursu efektivitāti.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā pētīta koksnes vilnas cementa paneļu (*WWCP*) atlikumu otrreizējā pārstrāde, izmantojot atlikumu reaktivizāciju un biokompozītu izstrādi, pārveidojot rūpnieciskos atlikumus par potenciāliem būvniecības izejmateriāliem, izmantojot mehānisku vai termisku apstrādi.

Tika pētītas trīs malšanas metodes:

- malšanas ar dezintegratoru rezultātā tika iegūta saistviela ar spiedes stiprību līdz 5 MPa 180 dienās (1,7 MPa 28 dienās);
- planetārā lodīšu malšana uzlaboja slīpputekļu cementējošās īpašības; augsta mitruma un ūdens cietināšanas rezultātā tika iegūta attiecīgi 1,9 MPa un 2,2 MPa spiedes stiprība, optimāla ūdens un saistvielas attiecība bija 0,6–0,8. Malšana 15 minūtes četrkāšoja spiedes stiprību līdz 6,50 MPa 28. dienā;
- optimālais apstrādes laiks vibrācijas malšanai bija 15 minūtes, lai nodrošinātu iestrādājamību, bet 20 minūtes ļāva sasniegt 1,6 MPa spiedes stiprību 28 dienās.

Tika analizētas divas termiskās apstrādes metodes:

- apstrādes mufelkrāsnī optimālā temperatūra bija 450 °C un 900 °C, 28. dienā sasniedzot 13,0 MPa un 19,6 MPa spiedes stiprību;
- apstrāde rotācijas krāsnī 450 °C un 900 °C temperatūrā uzlaboja stiprību (13,8 MPa un 18,6 MPa 180 dienās, ~10 MPa 28. dienā abiem sastāviem), salīdzinot ar neapstrādātu materiālu (2,5 MPa 180. dienā un 1,0 MPa 28. dienā).

Mehāniskā aktivizācija nodrošināja vidēju stiprību (5–15 MPa 28. dienā), bet termiskā apstrāde, īpaši apstrāde mufelkrāsnī 900 °C temperatūrā, deva vislielāko spiedes stiprību (19,6 MPa 28. dienā).

Biokompozīti uzrādīja apgrieztu sakarību starp termiskajām un mehāniskajām īpašībām – lielāks saistvielas saturs (P1) nodrošināja labākas mehāniskās īpašības (236 kPa lieces, 469/330 kPa spiedes stiprība) pie 613 kg/m³. Salīdzinājumam, mazāks saistvielas saturs (P3) nodrošināja labāku siltumizolācijas koeficientu (0,083 W/(m·K)) pie 430 kg/m³. Kaņepju spaļu aizvietošana uzlaboja siltumtehnikās īpašības, samazinot siltumvadītspēju līdz 0,054 W/(m·K).

Šis pētījums demonstrē iespēju pārveidot *WWCP* atlikumus vērtīgos materiālos, līdzsvarojot siltumtehnikās un mehāniskās īpašības, kā arī veicinot aprites ekonomikas principus.

IZMANTOTIE LITERATŪRAS AVOTI

1. Moschen-Schimek, J.; Kasper, T.; Huber-Humer, M. Critical Review of the Recovery Rates of Construction and Demolition Waste in the European Union – An Analysis of Influencing Factors in Selected EU Countries. *Waste Management* **2023**, *167*, 150–164, doi: 10.1016/J.WASMAN.2023.05.020.
2. APlanet European Green Deal: Objectives and Initiatives for a Sustainable Future Available online: <https://aplanet.org/resources/european-green-deal-objectives-and-initiatives-for-a-sustainable-future/> (accessed on 7 January 2025).
3. Rueda Raya, S.; Tolentino-Zondervan, F.; van Winden, W.; van Hemert, P. *CURE+ Baseline Study: City of Riga, Latvia*.
4. Klimata un enerģētikas ministrija *Latvijas Nacionālais Enerģētikas un Klimata Plāns 2021.–2030. gadam*; Rīga, 2024.
5. European Commission A New Circular Economy Action Plan Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN#footnote33> (accessed on 2 January 2025).
6. Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M.; Bolio, H. Sustainable Cement Production—Present and Future. *Cem Concr Res* **2011**, *41*, 642–650, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2011.03.019.
7. Wu, M.; Zhang, Y.; Ji, Y.; Liu, G.; Liu, C.; She, W.; Sun, W. Reducing Environmental Impacts and Carbon Emissions: Study of Effects of Superfine Cement Particles on Blended Cement Containing High Volume Mineral Admixtures. *J Clean Prod* **2018**, *196*, 358–369, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.079.
8. Argalis, P.P.; Sinka, M.; Bajare, D. A Preliminary Study of Mechanical Treatments' Effect on the Reactivation of Hydrated Cement Paste. *J Phys Conf Ser* **2023**, *2423*, 012008, doi: 10.1088/1742-6596/2423/1/012008.
9. Gholizadeh-Vayghan, A.; Meza Hernandez, G.; Kingne, F.K.; Gu, J.; Dilissen, N.; El Kadi, M.; Tysmans, T.; Vleugels, J.; Rahier, H.; Snellings, R. Thermal Reactivation of Hydrated Cement Paste: Properties and Impact on Cement Hydration. *Materials* **2024**, *Vol. 17*, Page 2659 **2024**, *17*, 2659, doi: 10.3390/MA17112659.
10. Yang, H.; Che, Y.; Leng, F. Calcium Leaching Behavior of Cementitious Materials in Hydrochloric Acid Solution. *Scientific Reports* **2018**, *8*, 1–9, doi: 10.1038/s41598-018-27255-x.
11. Cordoba, G.; Paulo, C.I.; Irassar, E.F. Towards an Eco-Efficient Ready Mix-Concrete Industry: Advances and Opportunities. A Study of the Metropolitan Region of Buenos Aires. *Journal of Building Engineering* **2023**, *63*, 105449, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.105449.
12. Joseph, H.S.; Pachaiappan, T.; Avudaiappan, S.; Maureira-Carsalade, N.; Roco-Videla, Á.; Guindos, P.; Parra, P.F. A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete. *Sustainability* **2023**, *Vol. 15*, Page 4932 **2023**, *15*, 4932, doi: 10.3390/SU15064932.
13. Puskás, A.; Corbu, O.; Szilágyi, H.; Moga, L.M. Construction Waste Disposal Practices: The Recycling and Recovery of Waste. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* **2014**, *191*, 1313–1321, doi: 10.2495/SC141102.
14. Ahmad, Z.; Wee, L. siong; Fauzi, M.A. Mechanical Properties of Wood-Wool Cement Composite Board Manufactured Using Selected Malaysian Fast Grown Timber Species. *ASM Science Journal* **2011**, *5*, 27–35.
15. Mordor Intelligence *Cement Board Market – Share & Size*; 2024.
16. Gibbs, M. J.; Soyka, P.; Conneely, D. CO₂ EMISSIONS FROM CEMENT PRODUCTION.
17. Wang, P.; Ryberg, M.; Yang, Y.; Feng, K.; Kara, S.; Hauschild, M.; Chen, W.-Q. Efficiency Stagnation in Global Steel Production Urges Joint Supply- and Demand-Side Mitigation Efforts. *Nat Commun* **2021**, *12*, 2066, doi: 10.1038/s41467-021-22245-6.
18. Andrew, R. M. Global CO₂ Emissions from Cement Production., doi: 10.5281/zenodo.831454.

19. Eurostat Employment by Main Industry Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_a10_e_custom_5685302/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=cb2322c2-810c-4ae0-84e3-dacb1c60ca75 (accessed on 8 April 2025).
20. Official statistics of Latvia *Forests of Latvia*; Riga, 2024.
21. Central Statistical Bureau Extraction of Raw Materials for Building Materials 2023.
22. European Investment Bank Riga Water Company Modernises the Water Infrastructure in the Capital Available online: <https://www.eib.org/en/stories/riga-water-infrastructure-sustainable> (accessed on 2 January 2025).
23. Tamma, P.; Schaart, E.; Gurzu, A. Europe's Green Deal Plan Unveiled Available online: <https://www.politico.eu/article/the-commissions-green-deal-plan-unveiled/> (accessed on 2 January 2025).
24. GRESB Establishing an Embodied Carbon Strategy in the EU Market Available online: <https://www.gresb.com/nl-en/establishing-an-embodied-carbon-strategy-in-the-eu-market/> (accessed on 2 January 2025).
25. Liselotte, J. *Latvia's Climate Action Strategy*; 2024.
26. Latvian Saeima *Būvniecības Likums*; Saeima, 2014.
27. Enterprise Agency, N. *The Circularity in Construction Sector in Latvia Opportunities and Obstacles for Dutch Entrepreneurs Commissioned by the Netherlands Enterprise Agency*;
28. Wolff, G. *Resource Efficient Use of Mixed Wastes Improving Management of Construction and Demolition Waste – Final Report*; 2017.
29. ISM waste & recycling What Is the Waste Hierarchy? Available online: <https://ismwaste.co.uk/help/what-is-the-waste-hierarchy> (accessed on 3 January 2025).
30. Gibbs, M. J.; Soyka, P.; Connely, D. CO₂ Emissions from Cement Production. In *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*; 2021; pp. 175–182.
31. Irish Green Building Council Level(s) - EU Sustainable Buildings Framework Available online: <https://www.igbc.ie/certification/levels-eu-sustainable-buildings-framework> (accessed on 7 January 2025).
32. European Environment Agency *Circular Economy Country Profile-Latvia*.
33. Myronycheva, O.; Karlsson, O.; Sehlstedt-Persson, M.; Öhman, M.; Sandberg, D. Distribution of Low-Molecular Lipophilic Extractives beneath the Surface of Air- and Kiln-Dried Scots Pine Sapwood Boards. *PLoS One* **2018**, *13*, e0204212, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0204212.
34. Bumanis, G.; Argalis, P.P.; Sinka, M.; Korjakins, A.; Bajare, D. The Use of Recycled Cement-Bonded Particle Board Waste in the Development of Lightweight Biocomposites. *Materials* **2024**, *17*, 5890, doi: 10.3390/ma17235890.
35. Cewood CEWOOD – Wood Wool Panels Available online: <https://www.cewood.com/downloads-eng> (accessed on 15 January 2025).
36. Argalis, P. P.; Sinka, M.; Bajare, D. Recycling of Cement–Wood Board Production Waste into a Low-Strength Cementitious Binder. *Recycling* **2022**, *7*, 76, doi:10.3390/recycling7050076.
37. Bumanis, G.; Argalis, P. P.; Sinka, M.; Korjakins, A.; Bajare, D. The Use of Recycled Cement-Bonded Particle Board Waste in the Development of Lightweight Biocomposites. *Materials* **2024**, *17*, 5890, doi: 10.3390/ma17235890.
38. Suarez-Riera, D.; Restuccia, L.; Falliano, D.; Ferro, G. A.; Tuliani, J. M.; Pavese, M.; Lavagna, L. An Overview of Methods to Enhance the Environmental Performance of Cement-Based Materials. *Infrastructures* **2024**, *Vol. 9, Page 94* **2024**, *9*, 94, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES9060094.
39. Kaptan, K.; Cunha, S.; Aguiar, J. A Review of the Utilization of Recycled Powder from Concrete Waste as a Cement Partial Replacement in Cement-Based Materials: Fundamental Properties and Activation Methods. *Applied Sciences* **2024**, *Vol. 14, Page 9775* **2024**, *14*, 9775, doi: 10.3390/APP14219775.

40. Seghir, N. T.; Benaïmeche, O.; Krzywinski, K.; Sadowski, L. Ultrasonic Evaluation of Cement-Based Building Materials Modified Using Marble Powder Sourced from Industrial Wastes. *Buildings* **2020**, *Vol. 10*, Page 38 **2020**, *10*, 38, doi: 10.3390/BUILDINGS10030038.
41. Burmeister, C. F.; Kwade, A. Process Engineering with Planetary Ball Mills. *Chem Soc Rev* **2013**, *42*, 7660–7667, doi: 10.1039/c3cs35455e.
42. Tiwari, P. *SIZE REDUCTION*; 2023.
43. Alpha Grinding Media What Is a Ball Mill Machine? Its Types and Uses Available online: <https://alphagrindingmedia.com/what-are-ball-mill-machines-and-why-do-i-use-them/> (accessed on 13 December 2024).
44. Tantawy, M. A. Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* **2017**, *05*, 33–48, doi: 10.4236/MSCE.2017.511004.
45. Ebben, A.; Carlson, C. Top Applications for Rotary Kilns Available online: <https://feeco.com/top-applications-rotary-kilns/> (accessed on 13 December 2024).
46. Choi, H.; Lim, M.; Choi, H.; Kitagaki, R.; Noguchi, T.; Choi, H.; Lim, M.; Choi, H.; Kitagaki, R.; Noguchi, T. Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. *J Environ Prot (Irvine, Calif)* **2014**, *5*, 583–596, doi: 10.4236/JEP.2014.57060.
47. Barbhuiya, S.; Kanavaris, F.; Das, B. B.; Idrees, M. Decarbonising Cement and Concrete Production: Strategies, Challenges and Pathways for Sustainable Development. *Journal of Building Engineering* **2024**, *86*, doi: 10.1016/J.JOBE.2024.108861.
48. Dunant, C. F.; Joseph, S.; Prajapati, R.; Allwood, J. M. Electric Recycling of Portland Cement at Scale. *Nature* **2024**, *629*, 1055–1061, doi: 10.1038/s41586-024-07338-8.
49. Ho, H. J.; Iizuka, A.; Shibata, E. Chemical Recycling and Use of Various Types of Concrete Waste: A Review. *J Clean Prod* **2021**, *284*, 124785, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124785.
50. Marmier, A. Decarbonisation Options for the Cement Industry.; 2000.
51. Lam, L.; Wong, Y. L.; Poon, C. S. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compression and Fracture Behaviors of Concrete. *Cem Concr Res* **1998**, *28*, 271–283, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00269-X.
52. epd-norge *Environmental Product Declaration*; 2024.
53. Zorica, J.; Sinka, M.; Sahmenko, G.; Vitola, L.; Korjakins, A.; Bajare, D. Hemp Biocomposite Boards Using Improved Magnesium Oxychloride Cement. *Energies (Basel)* **2022**, *15*, doi: 10.3390/EN15197320.
54. ASTM International Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards* **2011**, 5–9.
55. Zimele, Z.; Sinka, M.; Bajare, D.; Jakovics, A. Life Cycle Assessment for Masonry Exterior Wall Assemblies Made of Traditional Building Materials. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* **2019**, *660*, doi: 10.1088/1757-899X/660/1/012042.
56. Shi, Y.; Wang, T.; Li, H.; Wu, S. Exploring the Influence Factors of Early Hydration of Ultrafine Cement. *Materials* **2021**, *14*, 5677, doi: 10.3390/MA14195677.
57. Lv, L.; Luo, S.; Šavija, B.; Zhang, H.; Li, L.; Ueda, T.; Xing, F. Effect of Particle Size Distribution on the Pre-Hydration, Hydration Kinetics, and Mechanical Properties of Calcium Sulfoaluminate Cement. *Constr Build Mater* **2023**, *398*, 132497, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132497.
58. Rajczakowska, M.; Nilsson, L.; Habermehl-Cwirzen, K.; Hedlund, H.; Cwirzen, A. Does a High Amount of Unhydrated Portland Cement Ensure an Effective Autogenous Self-Healing of Mortar? *Materials* **2019**, *Vol. 12*, Page 3298 **2019**, *12*, 3298, doi: 10.3390/MA12203298.
59. Gholizadeh-Vayghan, A.; Meza Hernandez, G.; Kingne, F. K.; Gu, J.; Dilissen, N.; El Kadi, M.; Tysmans, T.; Vleugels, J.; Rahier, H.; Snellings, R. Thermal Reactivation of Hydrated Cement Paste: Properties and Impact on Cement Hydration. *Materials* **2024**, *17*, 2659, doi: 10.3390/ma17112659.
60. Shui, Z.; Xuan, D.; Wan, H.; Cao, B. Rehydration Reactivity of Recycled Mortar from Concrete Waste Experienced to Thermal Treatment. *Constr Build Mater* **2008**, *22*, 1723–1729, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012.

61. Ermilova, E.; Kamalova, Z. The Influence of Complex Additives Based on Calcined Clays and Carbonate Fillers on Hydration Products Composition of Blended Cement Stone. *E3S Web of Conferences* **2021**, 274, 04004, doi: 10.1051/e3sconf/202127404004.
62. Ye, G.; Liu, X.; De Schutter, G.; Poppe, A. M.; Taerwe, L. Influence of Limestone Powder Used as Filler in SCC on Hydration and Microstructure of Cement Pastes. *Cem Concr Compos* **2007**, 29, 94–102, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003.
63. Poletto, M.; Zattera, A. J.; Santana, R. M. C. Thermal Decomposition of Wood: Kinetics and Degradation Mechanisms. *Bioresour Technol* **2012**, 126, 7–12, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2012.08.133.
64. Brandt, A. M.; Marks, M. Optimization of the Material Structure and Composition of Cement Based Composites. *Cem Concr Compos* **1996**, 18, 271–279, doi: 10.1016/0958-9465(96)00018-2.
65. Scrivener, K.; Snellings, R.; Lothenbach, B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials / Edited by Karen Scrivener, Ruben Snellings, Barbara Lothenbach. **2016**, 420–442.
66. Boualleg, S.; Bencheikh, M.; Belagraa, L.; Daoudi, A.; Chikouche, M. A. The Combined Effect of the Initial Cure and the Type of Cement on the Natural Carbonation, the Portlandite Content, and Nonevaporable Water in Blended Cement. *Advances in Materials Science and Engineering* **2017**, 2017, doi: 10.1155/2017/5634713.
67. Fraga, L. G.; Silva, J.; Teixeira, S.; Soares, D.; Ferreira, M.; Teixeira, J. Influence of Operating Conditions on the Thermal Behavior and Kinetics of Pine Wood Particles Using Thermogravimetric Analysis. *Energies (Basel)* **2020**, 13, 2756, doi: 10.3390/en13112756.
68. Mohsen, A.; Aiad, I.; El-Hossiny, F. I.; Habib, A. O. Evaluating the Mechanical Properties of Admixed Blended Cement Pastes and Estimating Its Kinetics of Hydration by Different Techniques. *Egyptian Journal of Petroleum* **2020**, 29, 171–186, doi: 10.1016/j.ejpe.2020.03.001.
69. Santos, T. A.; De Oliveira Silva, G. A. E.; Ribeiro, D. V. Mineralogical Analysis of Portland Cement Pastes Rehydrated. *Journal of Solid Waste Technology and Management* **2020**, 46, 15–23, doi: 10.5276/JSWTM/2020.15.
70. Ifguis, O.; Moutcine, A.; Laghlimi, C.; Ziat, Y.; Bouhdadi, R.; Chtaini, A.; Moubarik, A.; Mbarki, M. Biopolymer-Modified Carbon Paste Electrode for the Electrochemical Detection of Pb(II) in Water. *J Anal Methods Chem* **2022**, 2022, doi: 10.1155/2022/5348246.
71. Alonso, C.; Fernandez, L. Dehydration and Rehydration Processes of Cement Paste Exposed to High Temperature Environments. *J Mater Sci* **2004**, 39, 3015–3024, doi: 10.1023/B:JMSE.0000025827.65956.18.
72. Kim, H. S.; Kim, S.; Kim, H. J.; Yang, H. S. Thermal Properties of Bio-Flour-Filled Polyolefin Composites with Different Compatibilizing Agent Type and Content. *Thermochim Acta* **2006**, 451, 181–188, doi: 10.1016/J.TCA.2006.09.013.
73. Angelescu, N.; Stanciu, D.; Barroso de Aguiar, J.; Abdelgader, H. S.; Bratu, V. Role of Superplasticizer Additives Upon Hydration Process of Cement Pastes. *Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics* **2016**, 14, 23–26, doi: 10.1515/bsmm-2016-0004.
74. Santhanam, M.; Cohen, M. D.; Olek, J. Sulfate Attack Research - Whither Now? *Cem Concr Res* **2001**, 31, 845–851, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00510-5.
75. Kucharczyk, S.; Zajac, M.; Deja, J. The Influence of Limestone and Al₂O₃ Content in the Slag on the Performance of the Composite Cements. *Procedia Eng* **2015**, 108, 402–409, doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.164.
76. Habte, L.; Shiferaw, N.; Mulatu, D.; Thenepalli, T.; Chilakala, R.; Whan Ahn, J. Synthesis of Nano-Calcium Oxide from Waste Eggshell by Sol-Gel Method. *Sustainability* **2019**, 11, 2–10.
77. Zhang, Q.; Ye, G. Dehydration Kinetics of Portland Cement Paste at High Temperature. *J Therm Anal Calorim* **2012**, 110, 153–158, doi: 10.1007/s10973-012-2303-9.
78. Zhang, Z.; Scherer, G. W. Evaluation of Drying Methods by Nitrogen Adsorption. *Cem Concr Res* **2019**, 120, 13–26, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.02.016.

79. Shui, Z.; Xuan, D.; Chen, W.; Yu, R.; Zhang, R. Cementitious Characteristics of Hydrated Cement Paste Subjected to Various Dehydration Temperatures. *Constr Build Mater* **2009**, *23*, 531–537, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.10.016.
80. Ermilova, E.; Kamalova, Z.; Ravil, R. Influence of Clay Mineral Composition on Properties of Blended Portland Cement with Complex Additives of Clays and Carbonates. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* **2020**, *890*, doi: 10.1088/1757-899X/890/1/012087.
81. Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Aggelakopoulou, E. Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural and Artificial Pozzolans by Thermal Analysis. *Thermochim Acta* **2004**, *420*, 135–140, doi: 10.1016/J.TCA.2003.11.059.
82. Castellote, M.; Alonso, C.; Andrade, C.; Turrillas, X.; Campo, J. Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes upon Heating, as Studied by Neutron Diffraction. *Cem Concr Res* **2004**, *34*, 1633–1644, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00229-1.
83. REAL, C. Hydration Products in Two Aged Cement Pastes. *J Therm Anal Calorim* **2005**.
84. A Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars — the University of Bath's Research Portal Available online: <https://researchportal.bath.ac.uk/en/studentTheses/a-study-of-carbonation-in-non-hydraulic-lime-mortars> (accessed on 22 October 2024).
85. Ji, X.; Ji, D.; Yang, Z.; Wang, G.; Huang, X.; Ma, S.; Li, W. Study on the Phase Composition and Structure of Hardened Cement Paste during Heat Treatment. *Constr Build Mater* **2021**, *310*, 125267, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125267.
86. Guzhan, O.; Glu, C. Revealing the Dark Side of Portlandite Clusters in Cement Paste by Circular Polarization Microscopy. *Materials* **2016**, *Vol. 9*, Page 176 **2016**, *9*, 176, doi: 10.3390/MA9030176.
87. Tosun, K. Effect of SO₃ Content and Fineness on the Rate of Delayed Ettringite Formation in Heat Cured Portland Cement Mortars. *Cem Concr Compos* **2006**, *28*, 761–772, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2006.06.003.
88. Tran, T. T.; Kwon, H. M. Influence of Activator Na₂O Concentration on Residual Strengths of Alkali-Activated Slag Mortar upon Exposure to Elevated Temperatures. *Materials* **2018**, *Vol. 11*, Page 1296 **2018**, *11*, 1296, doi: 10.3390/MA11081296.
89. Thiery, M.; Villain, G.; Dangla, P.; Platret, G. Investigation of the Carbonation Front Shape on Cementitious Materials: Effects of the Chemical Kinetics. *Cem Concr Res* **2007**, *37*, 1047–1058, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2007.04.002.
90. Alarcon-Ruiz, L.; Platret, G.; Massieu, E.; Ehrlicher, A. The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste. *Cem Concr Res* **2005**, *35*, 609–613, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2004.06.015.
91. Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Aggelakopoulou, E. The Effects of Limestone Characteristics and Calcination Temperature to the Reactivity of the Quicklime. *Cem Concr Res* **2001**, *31*, 633–639, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00490-7.
92. Taylor, H. F. W. *Cement Chemistry*; Thomas Telford Publishing, 1997; ISBN 0-7277-3945-X.
93. Ghosh, S. N.; Rao, P. B.; Paul, A. K.; Raina, K. The Chemistry of Dicalcium Silicate Mineral. *J Mater Sci* **1979**, *14*, 1554–1566, doi: 10.1007/BF00569274/METRICS.
94. Jelenić, I.; Bezjak, A.; Bujan, M. Hydration of B₂O₃-Stabilized α' - and β -Modifications of Dicalcium Silicate. *Cem Concr Res* **1978**, *8*, 173–180, doi: 10.1016/0008-8846(78)90006-6.
95. Cruz, T. A. M. da; Henrique Geraldo, R.; Damasceno Costa, A. R.; Rândello Dantas Maciel, K.; Pereira Gonçalves, J.; Camarini, G. Microstructural and Mineralogical Compositions of Metakaolin-Lime-Recycled Gypsum Plaster Ternary Systems. *Journal of Building Engineering* **2022**, *47*, 103770, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.103770.
96. Sahmenko, G.; Sinka, M.; Namsone, E.; Korjaks, A.; Bajare, D. Sustainable Wall Solutions Using Foam Concrete and Hemp Composites. *Environmental and Climate Technologies* **2021**, *25*, 917–930, doi: 10.2478/rtuect-2021-0069.
97. Collet, F.; Pretot, S. Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content. *Constr Build Mater* **2014**, *65*, 612–619, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.05.039.

98. Gurunathan, T.; Mohanty, S.; Nayak, S. K. A Review of the Recent Developments in Biocomposites Based on Natural Fibres and Their Application Perspectives. *Compos Part A Appl Sci Manuf* **2015**, *77*, 1–25, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2015.06.007.
99. Ardanuy, M.; Claramunt, J.; Toledo Filho, R. D. Cellulosic Fiber Reinforced Cement-Based Composites: A Review of Recent Research. *Constr Build Mater* **2015**, *79*, 115–128, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.035.
100. Collet, F.; Prétot, S.; Lanos, C. Hemp-Straw Composites: Thermal and Hygric Performances. *Energy Procedia* **2017**, *139*, 294–300, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.211.
101. Brzyski, P.; Gładcki, M.; Rumińska, M.; Pietrak, K.; Kubiś, M.; Łapka, P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. *Materials* **2020**, *13*, 1–17, doi: 10.3390/MA13235383.
102. Abdellatef, Y.; Khan, M. A.; Khan, A.; Alam, M. I.; Kavgić, M. Mechanical, Thermal, and Moisture Buffering Properties of Novel Insulating Hemp-Lime Composite Building Materials. *Materials* **2020**, *Vol. 13, Page 5000* **2020**, *13*, 5000, doi: 10.3390/MA13215000.
103. Bumanis, G.; Sinka, M.; Irbe, I.; Bajare, D. *Physical, Mechanical and Biodeterioration Properties of Hempcrete Based on Gypsum and Phosphogypsum*.
104. Arnaud, L.; Gourlay, E. Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes. *Constr Build Mater* **2012**, *28*, 50–56, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.07.052.



Pauls Pāvils Ārgalis dzimis 1996. gadā Rīgā. 2018. gadā Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu (2018) un inženierzinātņu maģistra grādu (2021) materiālzinātnē. RTU strādā kopš 2020. gada, sākotnēji ieņemot Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes Vispārīgās ķīmijas tehnoloģijas institūta zinātniskā asistentu amatu, patlaban ir Būvniecības un mašīnzinību fakultātes Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūta pētnieks. Strādājis kā projektu asistents uzņēmumā "*KV Consulting*" SEG emisiju aprēķinu un biometāna ražošanas iekārtu optimizācijas jomā. Zinātniskās intereses saistītas ar cementa saistvielas reaktivizāciju, ilgtspējīgu būvmateriālu un aprites ražošanu.