

Inga Zotova

UZLABOTAS VEIKTSPĒJAS LIGNOCELULOZES IZOLĀCIJAS PLĀTNES UN TO IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJA

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte

Dizaina tehnoloģiju institūts

Inga Zotova

Doktora studiju programmas “Šķiedru materiālu zinātne” doktorante

**UZLABOTAS VEIKTSPĒJAS
LIGNOCELULOZES IZOLĀCIJAS PLĀTNES UN
TO IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJA**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
asociētais profesors *Dr. sc. ing.*
EDGARS KIRILOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Zotova I. Uzlabotas veiktspējas lignocelulozes izolācijas plātnes un to izgatavošanas tehnoloģija.
Promocijas darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība,
2023. – 101 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes “RTU P-02” 2023. gada 11. septembra lēmumu, protokols Nr. 0403-9.2.2/9.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda daļēju atbalstu projektā “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” Nr. 8.2.2.0/18/A/017.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Savienības
strukturāfundi un
Kohēzijas fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Promocijas darbs iesākts ERAF pēcdoktorantūras pētniecības atbalsta projektā “Viedo izolācijas materiālu struktūru un tehnoloģiju izstrāde iekštelpu mikroklimata nodrošināšanai” 1.1.1.2/VIAA/1/16/152, darbā iekļauti daļēji šī pētījuma rezultāti.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 28. novembrī plkst. 15.00 Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6, 206. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Uldis Spulle,
Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, Latvija

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Ramūnas Tupčiauskas,
Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūts, Latvija

Profesors *Dr. phys.* Juris Blūms,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi 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.

Inga Zotova

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 60 attēlu, 25 tabulas, kopā 101 lappuses. Literatūras sarakstā ir 177 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Mūsdienīgu ēkās arvien vairāk izmantoti inovātivi, vietējo resursu, ražošanas pārpalikumu un ātri atjaunojamu dabas resursu materiāli ar mērķi uzlabot ēku ilgtspējību un samazināt apbūvētās vides oglekļa pēdas nospiedumu. Pilnveidojot izolācijas materiālus, svarīgi ir uzlabot to funkcionālās īpašības, nepalielinot ēkas masu. Fāzmaiņas materiāli ir viena no jaunu materiālu grupām, kas ļauj samazināt kopējo ēkas enerģijas patēriņu gan apkurei, gan dzesēšanai, kā arī uzlabot dzīves un darba vidi, nodrošinot temperatūras autoregulāciju iekštelpās. Palielinoties energoresursu cenām, energoefektivitātes aspekti izvirzās priekšplānā kā mājāsaimniecībās, tā arī ražotnēs, brīvā laika/tūrisma objektos, pārvaldes struktūrās u. c.

Palielinoties mikroiekapsulēto fāzmaiņas materiālu (*PCM*) pieejamībai un samazinoties to izmaksām, rodas iespēja izstrādāt jauna tipa izolācijas materiālus latentā siltuma enerģijas uzkrāšanai. Apvienojot *PCM* ar tradicionālajiem izolācijas materiāliem, iespējams palielināt ēkas siltuma ietilpību līdz divām reizēm, praktiski, nepalielinot ēkas masu. Tas ir pētījumu virziens, kuram šobrīd vēl nav pievērsta pietiekoša uzmanība.

Darbā izstrādāti izolācijas plātņu prototipi no lauksaimniecības un kokapstrādes blakusproduktiem (kaņepju spaļiem un garenfrēzēšanas koka skaidām) un tehnoloģija to izgatavošanai. Zema blīvuma ($290 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) izolācijas plātnes iekštelpām veidotas, variējot to struktūru, un fāzmaiņu materiālu apjomu plātnē līdz 15 %, izmantojot karbamīdsveķu saistvielu aukstai presēšanai samazinās enerģijas patēriņš, iegūtajām plātnēm ir virkne priekšrocību salīdzinot ar pašlaik praksē lietotajām, tādas kā pie maza materiāla biezuma liela siltumietilpība, laba skaņas absorbcija un degamības klase.

Iegūtie plātņu prototipi izmantojami gan kā iekštelpu iekšējās apdares mikroklimata un termoregulācijas elementi, gan kā funkcionāli estētiski elementi interjera noformējumā.

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tā apjoms ir 101 lappuses, darbā ir 60 attēlu, 25 tabulas un literatūras saraksts, kas satur 177 avotus.

ABSTRACT

In modern buildings innovative materials, as well as materials from local resources, production surpluses and rapidly renewable natural resources are increasingly used with the aim of improving the sustainability of buildings and reducing the impact of carbon left-overs on the buildings in the environment. In improving the functional properties of the insulation materials it is important not to increase the mass of the building. One of the groups of new materials are phase change materials which allow reducing the total energy consumption of the building for both heating and cooling, as well as improving the living and working environment by providing self-regulation of indoor temperatures. With the increase expenditure of energy resources aspects of energy efficiency become extremely important in households, as well as in production plants, leisure/tourism facilities, administrative structures etc.

With the wider availability of microencapsulated phase change materials (*PCM*) and decrease of their price there is an opportunity to develop a new type of insulating materials for latent heat energy storage. Combination *PCM* with traditional insulation materials lends the possibility to increase the thermal capacity of the building up to two times practically without increasing the mass of the building. This is a direction of research that has not yet received sufficient attention.

In the present work prototypes of insulating boards from agricultural and woodworking by-products (hemp shives and longitudinally milled wood chips) and technology for their production were developed. Low-density ($290 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) insulation boards for indoor spaces were produced by varying their structure and the amount of phase change materials in the board up to 15 %. Usage of carbamide resin binder for cold pressing reduces energy consumption and the produced boards have a number of advantages compared to those currently used in practice, such as high heat capacity at low material thickness, good sound absorption, and flammability class.

The obtained board prototypes can be used both as microclimate and thermoregulation elements of indoor interior as well as functional aesthetic elements of interior design.

The thesis is written in Latvian, its volume is 101 pages, it contains 60 figures, 25 tables and bibliography containing 177 sources.

SATURS

IEVADS	12
1. LITERATŪRAS APSKATS	16
1.1. Atjaunojamie resursi	16
1.1.1. Atvieglotās plātnes.....	17
1.1.2. Atjaunojamo resursu izolācijas plātnes.....	17
1.2. Siltumietilpības paaugstināšana ar fāzmaiņu materiālu	21
1.2.1. Fāzmaiņas materiālu klasifikācija.....	22
1.2.2. Fāzmaiņu materiālu iestrādes iespējas	25
1.2.3. Materiāli ar mikroiekapsulētu fāzmaiņu materiālu	27
2. EKSPERIMENTU MATERIĀLI UN METODES	30
2.1. Izejmateriālu raksturojums	30
2.1.1. Kaņepju spaļi	30
2.1.2. Priedes koka garenfrēzēšanas skaidas.....	31
2.1.3. Izejmateriālu komponentu mitruma noteikšana	31
2.1.4. Izejmateriālu granulometriskā analīze	32
2.2. Izejvielu raksturojums	33
2.2.1. Saistvielas izvēle.....	33
2.2.2. Mikroiekapsulēts fāzmaiņu materiāls	33
2.3. Plātņu izgatavošana	35
2.3.1. Materiāla uzbūves struktūra un paraugu izgatavošanas plāns	35
2.3.2. Plātņu paraugu izgatavošanas tehnoloģija	38
2.3.3. Optimālā saistvielas apjoma noteikšana	39
2.4. Plātņu materiālu īpašības.....	40
2.4.1. Plātņu materiāla mitruma noteikšana un salīdzināšana	41
2.4.2. Materiālu paraugu blīvuma noteikšana	41
2.4.3. Materiāla ūdens uzsūktspējas un uzbriešanas novērtēšana	42
2.4.4. Skenējošā elektronu mikroskopija	42
2.5. Izolācijas plātnes ekspluatācijas īpašības.....	43
2.5.1. Termiskās īpašības	43
2.5.2. Fizikāli ķīmiskās īpašības	47
2.5.3. Akustiskās īpašības	49

2.5.4.	Mehāniskās īpašības.....	53
Nodaļas kopsavilkums.....		56
3. EKSPERIMENTU REZULTĀTI UN TO ANALĪZE		58
3.1.	Izejmateriālu raksturojums	58
3.1.1.	Izejmateriālu komponentu mitrums.....	58
3.1.2.	Izejmateriālu granulometriskā analīze	59
3.2.	Plātņu izgatavošana	60
3.2.1.	Plātņu eksperimentālo paraugu veidi un struktūras	60
3.2.2.	Saistvielas apjoma noteikšana un saistīto īpašību analīze	65
3.3.	Plātņu materiālu īpašības.....	67
3.3.1.	Plātņu materiāla mitruma noteikšana un salīdzināšana	67
3.3.2.	Blīvuma vienmērība plātnēs	69
3.3.3.	Materiāla ūdens uzsūktspējas un uzbriešanas novērtēšana	70
3.3.4.	Skenējošā elektronu mikroskopija	72
3.4.	Izolācijas plātnes ekspluatācijas īpašības	72
3.4.1.	Termiskās īpašības	73
3.4.2.	Fizikāli ķīmiskās īpašības	78
3.4.3.	Akustiskās īpašības	82
3.4.4.	Mehāniskās īpašības.....	84
3.5.	Īpašību salīdzinājums ar citiem izolācijas materiāliem.....	85
3.6.	Īss materiāla raksturojums un paredzamais lietojums.....	88
Nodaļas kopsavilkums.....		89
SECINĀJUMI.....		92
LITERATŪRAS SARAKSTS.....		94

ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att. <i>PCM</i> darbības princips [69–73].	22
1.2. att. Fāzmaiņu materiāla <i>PCM</i> iedalījums [72–73, 76–77].	23
1.3. att. Fāzmaiņu materiāla mikrokapsulas shematiskais attēls.	26
1.4. att. Salīdzinājums materiāla biežums pie vienādas siltumietilpības un materiālu uzglabātā enerģija uz vienu vienību [125].	27
2.1. att. Tradicionālā kaņepju šķiedru un spaļu iegūšanas metode.	31
2.2. att. a – koka garenfrēzēšanas skaidas; b – kaņepju spaļi.	31
2.3. att. Paraugu izvietojums žāvēšanas skapī.	32
2.4. att. a – Elektromagnētiskais sietu kratītājs; b – frakciju izņemšana no sietiem.	33
2.5. att. Paraugu izgatavošanas process.	35
2.6. att. Plātņu materiālu proporcijas.	36
2.7. att. Plātņu materiālu izgatavošanas tehnoloģijas shēma.	39
2.8. att. Precīza parauga biezuma noteikšanas shēma [165].	41
2.9. att. a – uz pamatnēm pielīmēti paraugi; b – iekārta paraugu pārklāšanai ar oglekļa pārklājumu.	42
2.10. att. SEM iekārtā “ <i>Tescan Vega</i> ”: a – iekārta; b – paraugi; c – programmatūra.	42
2.11. att. Siltumu testu noteikšana.	43
2.12. att. Koniskā kalorimetra shematiskā uzbūve [170].	47
2.13. att.: a – sagatavoti paraugi, b – paraugs rāmī, c – paraugs pēc testa.	48
2.14. att. Skaņas absorbcijas paraugi (no kreisās: a – HW; b – W; c – H).	49
2.15. att. Skaņas absorbcijas testa veikšana.	50
2.16. att. Akustiskās impedances un pārvades zuduma mērījuma komplekta sastāvdaļas [171].	51
2.17. att. Atsauces līkne svērtā skaņas absorbcijas koeficienta novērtēšanai [173].	52
2.18. att. Atsauces līkņu, kas ierobežo dažādas skaņas absorbcijas klases, ilustrācija [173].	53
2.19. att. Trīs punktu lieces testēšanas princips.	54
2.20. att.: a – paraugi, b – paraugu trīs punktu lieces tests.	54
2.21. att.: a – paraugi skrūvju aksiālajā testā; b – skrūvju aksiālā izraušana.	55
2.22. att. Skrūvju noturības materiālā testa noteikšanas princips [177].	55
3.1. att. Izejmateriālu sastāvs.	58
3.2. att. Kaņepju spaļu daļiņu izmērs pēc katra sieta.	59
3.3. att. Koka skaidu daļiņu izmērs pēc katra sieta.	59
3.4. att. Kaņepju spaļu un koka skaidu granulometriskās analīzes salīdzinoši rezultāti.	60
3.5. att. H paraugos putekļu un kaņepju šķiedru piejaukums.	61
3.6. att. Dažādu virsmu reljefu plātnes.	62
3.7. att. Dažādu virsmu reljefu plātnes, tonētas, apstrādātas ar antiseptiķi un finierētas.	63
3.8. att. Kaņepju spaļu apstrāde ar antiseptiķi: a – apstrādāti kaņepju spaļi, b – antiseptiķa iestrāde saistvielā, c – antiseptiķis saistvielā.	63
3.9. att. paraugi šķērsgrīzumā: a – H; b – HW un c – W.	64

3.10. att. a – neviendabīga masa; b – gumijota masa; c – viendabīga masa.	64
3.11. att. Saistvielas apjoma ietekme uz plātņu mitruma žūšanu 120 h laboratorijas apstākļos.	67
3.12. att. Parauga masa uzreiz pēc presēšanas, pēc 24 h izturēšanas žāvēšanas skapī un 14 dienu periodā, izturot laboratorijas apstākļos.	68
3.13. att. Parauga masas izmaiņa pēc presēšanas 336 h laboratorijas apstākļos.	68
3.14. att. H, HW un W paraugu 24 h masas izmaiņas ūdenī.	70
3.15. att. H, HW un W paraugu 24 h biezuma izmaiņas ūdenī.	71
3.16. att. H, HW un W paraugu biezuma un masas izmaiņas 24 h ūdenī.	72
3.17. att. SEM attēlos <i>PCM</i> materiāla atrašanās vieta paraugos.	72
3.18. att. Siltumvadītspējas vidējie rezultāti paraugu grupām ar mainīgu <i>PCM</i> sastāvu. ...	74
3.19. att. Paraugu siltumietilpības izmaiņas pie dažāda <i>PCM</i> apjoma 25 °C un šo paraugu aprēķinātās siltumietilpības vidējās vērtības un standartnovirze.	75
3.20. att. Siltumpretestības rezultāti pie dažādām temperatūrām.	77
3.21. att. Siltumpretestības rezultāti pie dažādām temperatūrām.	77
3.22. att. Paraugu aizdegšanās laiks.	79
3.23. att. Paraugu dūmu daudzums.	79
3.24. att. Siltuma izdalīšanās ātrums.	79
3.25. att. Efektīvais sadegšanas siltums.	80
3.26. att. Īpatnējās izžušanas koeficients.	80
3.27. att. Masas zuduma koeficients.	81
3.28. att. Oglekļa dioksīda izdalīšanās.	81
3.29. att. Paraugu HW, W un H grupu vidējie absorbcijas koeficienta α 1/3 oktāvu frekvenču joslu rezultāti.	83
3.30. att. Robežstiprība liecē.	85
3.31. att. Pretestība skrūvju aksiālai izraušanai.	85
3.32. att. Siltumvadītspējas salīdzinošie dati.	86
3.33. att. Siltumietilpības salīdzinošie dati.	86
3.34. att. Robežstiprība liecē – salīdzinošie dati.	87

TABULU SARAKSTS

1.1. tabula Materiālu īpašības, kuru blīvums līdz 400 kg/m ³ [56]	19
1.2. tabula Dabas materiālu siltumizolācijas siltumvadītspēja [63–64]	21
1.3. tabula Pamatkritēriji izvēloties <i>PCM</i> [79].....	24
2.1. tabula Fāzmaiņu mikrokapsulu raksturlielumi	34
2.2. tabula Eksperimentālo plātņu veidi	36
2.3. tabula Paraugu izgatavošanas plāns	37
2.4. tabula Paraugu aprēķinātā masa	38
2.5. tabula Saistvielas daudzuma pievienošana paraugiem ar 4–14 %	40
2.6. tabula Organoleptisko novērtējumu kritēriji	40
2.7. tabula Paraugu dati termisko īpašību noteikšanai	43
2.8. tabula Paraugu dati ugunsreakcijas testam	47
2.9. tabula Paraugu dati skaņas absorbcijas noteikšanai	49
2.10. tabula Skaņas absorbcijas klases [173]	53
3.1. tabula Izejmateriālu komponentu mitrums	58
3.2. tabula Organoleptisko novērtējumu kritēriju rezultāti (punkti)	65
3.3. tabula Saistvielas apjoma ietekme uz biežumu un blīvumu.....	66
3.4. tabula Blīvuma vienmērība H , HW un W plātnēs.....	69
3.5. tabula Siltumvadītspējas rezultāti un paraugu grupu kļūdas pielāide	73
3.6. tabula Siltumietilpība	75
3.7. tabula HW un H paraugu siltumpretestība	76
3.8. tabula Materiālu ugunsreakcijas īpašības	78
3.9. tabula Skaņas absorbcijas koeficienti.....	82
3.10. tabula Vidējais skaņas absorbcijas koeficients dažādās frekvencēs.....	84
3.11. tabula Skaņas absorbcijas klase dažādās frekvencēs.....	84
3.12. tabula Ugunsreakcijas klases salīdzinošie dati.....	87

SKAIDROJUMI, SAĪSINĀJUMI

Saīsinājumi	
<i>PCM</i>	Mikroiekapsulēts fāzmaiņu materiāls
λ	Siltumvadītspējas koeficients
C_p	Siltumietilpība, J/(gK)
R	Siltumpretestība, m ² K/W
α	Absorbcijas koeficients
α_w	Vidējais skaņas absorbcijas koeficients
Skaidrojumi	
Intensifikācija	Intensitātes palielināšana vai palielināšanās; pastiprināšana; uzlabošana, kuras mērķis ir iegūt lielāku atdevi, labākus rezultātus; ražīguma kāpināšana; papildināšana. (<i>Latviešu literārās valodas vārdnīca. 1.–8. Rīga, Zinātne, 1972.–1996.</i>)
Disperģents	Vielā, kas domāta kādas citas vielas sašķelšanai un izkliedēšanai. (<i>Preses lasītāja svešvārdu vārdnīca. Rīga, Nordik, 2004.</i>)
Ilgtspēja	Spēja radīt apstākļus ilgstošai, līdzsvarotai pašattīstībai. (<i>Nūtiņa D. Moderna cilvēka valoda. Rīga, VVA, 2004.</i>)
Paraugu apzīmējumi	
H	Kaņepju spaļi / Kaņepju spaļu plātne
W	Koka garenfrēzēšanas skaidas / Koka garenfrēzēšanas skaidu plātne
HW	Kaņepju spaļu un koka garenfrēzēšanas skaidu plātne proporcijā 50:50
H_5%PCM	Kaņepju spaļu plātne ar 5 % <i>PCM</i>
H_10%PCM	Kaņepju spaļu plātne ar 10 % <i>PCM</i>
H_15%PCM	Kaņepju spaļu plātne ar 15 % <i>PCM</i>
HW_5%PCM	Kaņepju spaļu un koka garenfrēzēšanas skaidu plātne proporcijā 50:50 ar 5 % <i>PCM</i>
HW_10%PCM	Kaņepju spaļu un koka garenfrēzēšanas skaidu plātne proporcijā 50:50 ar 10 % <i>PCM</i>
HW_15%PCM	Kaņepju spaļu un koka garenfrēzēšanas skaidu plātne proporcijā 50:50 ar 15 % <i>PCM</i>

IEVADS

Eiropas Savienība un visa pasaule šobrīd saskaras ar klimata pārmaiņām, ko izraisa siltumnīcefekta gāzu emisijas [1]. Pašreizējā scenārijā līdz 2050. gadam globālais enerģijas pieprasījums ēkās vismaz dubultosies, kur lielāko enerģijas daļu patērējot apsildei un dzesēšanai, salīdzinot ar šodienas līmeni [2]. Klimata pārmaiņu starpvaldību padome (*Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC*) prognozē, ka līdz 2050. gadam vidējā zemes temperatūra paaugstināsies par 6 °C. Ņemot to vērā, ir jāatrod efektīvāki veidi, kā samazināt enerģijas patēriņu ēku sektorā un vienlaikus samazināt siltumnīcefekta gāzu emisiju apjomu [3]. Nosacījumus var izpildīt, izmantojot progresīvus materiālus. Dabas resursi nav neizsmeļami, tāpēc jāatrod jauni dabas materiālu salikumi, apvienojot primāros un atkārtoti lietojamos resursus un nodrošinot gan to veiktspēju, gan estētiku. Pieaugot globālajai vienprātībai, ka planētu var ietekmēt neatgriezeniskas klimata pārmaiņas, ekoloģijas un ilgtspējas prasības ir kļuvušas par normu jaunu produktu izstrādē. Aktuāla tēma ir plātņu izolācijas materiālu ražošana, pievēršot uzmanību vietējo ražošanas blakusproduktu un ātri atjaunīgo dabas resursu efektīvai izmantošanai. Lai produkts atbilstu ilgtspējības kritērijiem, pētniekiem ir jāattīsta savstarpēja sinerģija starp produkta īpašībām un tā ietekmi uz ekonomiku, sabiedrību un vidi [4].

Saskaņā ar Apvienoto Nāciju Organizācijas izstrādāto rīcības plānu “*Agenda 21*” attiecībā uz ilgtspējīgu attīstību par videi draudzīgām tehnoloģijām tiek uzskatītas tās, kas aizsargā un samazina nelabvēlīgu ietekmi uz vidi visā materiāla dzīves ciklā, sākot no izejvielu ieguves un beidzot ar produkta/materiāla turpmāku izmantošanu vai pārstrādi [5–6]. Virknē pētījumos veikta dažādu dabas resursu izmantojamības analīze plātņu materiālos [7–9]. Viens no ļoti svarīgiem mērķiem ir sasniegt labus īpatnējās siltuma jaudas raksturlielumus, izmantojot inovatīvas tehnoloģijas augstas lietderības nodrošināšanai, piemēram, iekļaujot sastāvā mikroiekapsulētus fāzmaiņas materiālus (*PCM*) [10–13]. Apvienojot kaņepju spaļu un koksnes garenfrēzēšanas skaidas siltumizolācijas materiālos ar *PCM*, var palielināt ēkas siltuma inerci, praktiski nepalielinot ēkas masu. Pamatojoties uz latentā siltuma izmantošanas lielo potenciālu, tas kļūst par iespējamu jauno tehnoloģiju izstrādes risinājumu, iekštelu mikroklimata auto regulācijai. Fāzmaiņas materiāli ir atzīti par efektīviem ēkas siltummasas palielināšanai un enerģijas pārvaldības uzlabošanai, tādējādi palielinot energoefektivitāti [14–18]. *PCM* var iestrādāt gan vieglajos [19], gan celtniecības materiālos [20–26].

PCM mūsdienās ir plaši pazīstami kā potenciālas piedevas ēku izolācijas materiāliem, kas nodrošina termiskās masas efektu, palīdzot taupīt enerģiju, un uztur komfortablu iekštelu temperatūru. Tajā pašā laikā *PCM* neaizstāj tradicionālos izolācijas materiālus. Līdz ar to iespējas apvienot *PCM* lietojumu ar tradicionālajiem izolācijas materiāliem ir svarīgs pētījumu virziens, kuram līdz šim nav pievērsta pietiekama uzmanība.

Promocijas darba pētījums ir vērsts uz eksperimentālu izpēti vieda siltumizolācijas materiāla prototipa un tehnoloģijas izveidei. Formulēts mērķis izveidot temperatūru stabilizējošu industriālo kaņepju spaļu un koksnes garenfrēzēšanas skaidu izolācijas materiālu, integrējot tajā mikroiekapsulētu fāzmaiņas materiālu (temperatūras regulācijas diapazons 23–28 °C) saturošu dispersiju īpatnējās siltumietilpības, siltuminerces un siltumvadītspējas

palielināšanai. Darba procesā veikti materiālu struktūru kombināciju meklējumi funkcionālo īpašību kopuma (konstruktīvā stabilitāte, izolācijas īpašības) nodrošināšanai, kā arī atbilstošu saistvielu apjoma un savienojumu fizikālo un mehānisko īpašību testi, optimizēti izgatavošanas procesa parametri, testētas iegūto prototipu īpašības, precizētas iespējamās lietojumu jomas un ierobežojumi, izstrādātas eksperimentālas tehnoloģijas un optimizēti to parametri. Eksperimentālie izolācijas materiāli izgatavoti no kaņepju spaļiem un koksnes garenfrēzēšanas skaidām, tieši masā iejaucot 5 %, 10 %, 15 % iekapsulētas *PCM* dispersijas. Plātņu ražošanai izmantota aukstā presēšana, lietojot urīnvielas formaldehīda (UF) sveķu līmi kā saistvielu. Eksperimentālie paraugi izgatavoti kā vienslāņa 25 mm biezi plātņu materiāli, to blīvums $290 \pm 20 \text{ kg/m}^3$, kas kvalificējas kā zema blīvuma plātnes.

Tēmas aktualitāte

Neskatoties uz jau esošiem pētījumiem par fāzmaiņas materiālu (*PCM*) lietojumu, jauno prototipu aktualitātes pamatā ir lielais latentā siltuma izmantošanas potenciāls. Integrējot mikroiekapsulētu fāzmaiņas dispersiju izolācijas kaņepju blakusproduktu plātnēs, iegūts risinājums jaunu tehnoloģiju attīstībai, kas saistīti ar iekštelpu mikroklimata regulēšanu nepalielinot ēkas masu.

Darba mērķis

Veikt kompleksus pētījumus kaņepju blakusproduktu bāzes iekštelpu apdares izolācijas plātņu veiktspējas uzlabošanai, integrējot to sastāvā mikroiekapsulētu bioloģiskas bāzes fāzmaiņu materiālu funkcionālo īpašību intensifikācijai.

Darba uzdevumi

- Publicēto un npublicēto materiālu analīzes apskats par atjaunojamu resursu izmantošanu izolācijas plātnēs apvienojumā ar mikroiekapsulētu fāzmaiņu materiālu lietojumu.
- Apzināt un izanalizēt esošo plātņu materiālu izgatavošanas metodes un tehnoloģijas.
- Izstrādāt tehnoloģiju mikroiekapsulētu fāzmaiņu materiālu iestrādei plātnes struktūrā.
- Izstrādāt eksperimentālo plātņu prototipu struktūru risinājumus ar un bez *PCM* no kaņepju spaļiem un koksnes garenfrēzēšanas skaidām.
- Veikt paraugu testēšanu, iegūto rezultātu analīzi un interpretāciju.
- Veikt salīdzinošu materiāla īpašību analīzi, formulēt rekomendācijas.

Darba zinātniskā novitāte

Iekapsulētu fāzmaiņu materiāla dispersijas lietojums un tehnoloģija to iestrādei kaņepju spaļu un garenfrēzēšanas koksnes skaidu bāzes izolācijas plātnes struktūrā.

Darba praktiskā nozīmība

Plātnes no lauksaimniecības un kokrūpniecības blakusproduktiem ar to sastāvā integrētām fāzmaiņu materiālu mikrokapsulām siltumenerģijas latentai uzkrāšanai nodrošina iespēju uzlabot mikroklimatu iekštelpās (gaisa temperatūra), paaugstināt ēkas siltumenerģijas energoefektivitāti kopumā, dodot pozitīvu ieguldījumu virzībā uz pasīvo māju un aprites bioekonomikas principu īstenošanu. Lauksaimniecības un kokrūpniecības blakusproduktu lietojums materiālu izstrādei ar augstu pievienoto vērtību būs nozīmīgs ieguldījums attiecīgo nozaru attīstībā un Latvijas tautsaimniecības attīstībā kopumā.

Aizstāvamā tēze

Izveidotie plātņu prototipi un to izgatavošanai atbilstošā tehnoloģija, izmantojot lauksaimniecības un kokrūpniecības pārstrādes blakusproduktus, ļauj iegūt ilgtspējīgus izolācijas materiālus ar 2,53 reizes augstāku veiktspēju ēku temperatūras regulācijas nodrošināšanai iekštelpās.

Darba aprobācija

Publikācijas

- Kirilovs E., **Zotova I.**, Kukle S., Pugovics K. “Low density hemp shive particleboards for latent thermal energy storage performance.” **In:** Journal of Energy Systems, 2021, 5 (1), pp. 1–9. (SCOPUS) DOI: doi.org/10.30521/jes.805791.
- Kirilovs E., **Zotova I.**, Gendelis S., Kukle S., Stramkale V. “Experimental study of using micro-encapsulated phase-change material integrated into hemp shive wallboard.” **In:** MDPI Journal Buildings, 2020, 10 (12), pp. 1–14. (SCOPUS) DOI: doi.org/10.3390/buildings10120228.
- Kirilovs E., Kukle S., Gusovius H.-J., **Zotova I.**, Stramkale V. “Development of wet-preserved hemp fibreboard with thermal and sound insulation properties.” **In:** International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2019, pp. 74–79. (SCOPUS) DOI: 10.5593/sgem2019/6.2/S26.010.
- Kirilovs E., Kukle S., **Zotova I.**, Nagle A. “Structures of sound absorbing and thermal conductivity composite from raw renewable materials.” **In:** International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, pp. 333–340. (SCOPUS) DOI: 10.5593/sgem2018/6.3/S26.044.

Konferences

- **Zotova I.**, Kukle S., Kirilovs E., Gutmane I. “Analysis of one-layer Hemp Shive and Wood Chips Insulation Wallboards.” Advanced Materials and Technologies 2020, Lithuania, Palanga, 24.08.20.–28.08.20.
- Kirilovs E., Kukle S., Gusovius H.-J., **Zotova I.** “Phase change material integrated in to indoor two-layer shive hemp wallboard.” Advanced Materials and Technologies 2020, Lithuania, Palanga, 24.08.20.–28.08.20.

- Kirilovs E., Gusovius H-J., **Zotova I.**, Kukle S. “Development of hemp shive wallboard with integrated phase change material” 8. European conference on renewable energy systems 2020, Turkey, Istanbul, 24.08.20.–25.08.20.
- Kirilovs E., Kukle S., Gusovius H-J., **Zotova I.** “Development of smart insulation materials with PCMs for indoor microclimate regulation” International Conference on Materials Engineering and Nanotechnology, ICMEN 2019, Kuala Lumpur, Malaysia, 2.12.19.–5.12.19.
- Kirilovs E., Kukle S., Gusovius H-J., **Zotova I.** “Development of Innovative Low Density Thermal Insulation from Wet-Preserved Hemp.” Advanced Materials and Technologies 2019. Lithuania, Palanga, 19.08.19.–23.08.19.
- Kirilovs E., Kukle S., Gusovius H-J., **Zotova I.**, Stramkale V. “Innovative board material development of raw material with different wet-preservation time.” 21st International Conference Materials, Methods & Technologies 2019, Burgas, Bulgaria, 1.07.19.–5.07.19.

1. LITERATŪRAS APSKATS

Veikts publicēto un nepublicēto materiālu apskats un analīze – ražošanas blakusproduktu lietojumam, fāzmaiņu materiāliem, izolācijas materiāliem un to izgatavošanas tehnoloģijām un metodēm.

1.1. Atjaunojamie resursi

Mūsdienās pētījumu objekts ir jaunu perspektīvu materiālu izstrāde, neradot negatīvu ietekmi uz vidi un vienlaikus ir ekonomiski un tiem piemīt nepieciešamās īpašības [27]. Galvenos izolācijas materiālus var iedalīt četrās kategorijās atkarībā no izejmateriāla: 1. no akmeņiem un izdedžiem, piemēram, akmens vates, stikla vates, uzpūsta perlīta, stikla pērlītēm, vermikulīta, plēnes, keramikas izstrādājumi utt.; 2. no naftas ķīmijas un ogļu ķīmiskajiem starpproduktiem, piemēram, polistirola, poliuretāna, polietilēna utt.; 3. no augiem, tostarp lauksaimniecības atkritumiem, mežsaimniecības un rūpniecības atkritumiem augu šķiedru atkritumi, piemēram, salmi, rīsu sēnālas, makulatūra, koka skaidas, kokvilna, kaņepes utt.; 4. no metāliem, piemēram, metāla atstarojoša plēve, cietmetāla vizieris, radiācijas plāksne u. c. Izteikta interese par bioizolāciju pieauga sākot no 2003. gada un, īpaši pēc 2010. gada pasaulē palielinājās pieprasījums pēc atjaunojamiem, videi draudzīgiem, lētiem un augstas siltumizturības izolācijas materiāliem [28]. Viens no veidiem, kā sasniegt šos mērķus, ir zaļo izolācijas materiālu izstrāde, lai aizstātu fosilos tradicionālos [29]. Visbiežāk izmantotie materiāli uz bioloģiskās bāzes ir koks, salmi, kaņepes, kukurūza vai aitu vilna. Pat ja koksne ir visattīstītākā un spēj konkurēt ar tradicionālajiem izolācijas materiāliem, arvien vairāk un vairāk tiek izmantoti citi materiāli, piemēram, celulozes vate vai kaņepju spaļu betons [28–30].

Mēbeļu ražošanā, būvniecībā, dažādu interjera sienu segumu ražošanā arvien tiek rasti jauni materiāli, ko iegūst no atjaunojamiem resursiem. Šis viss ļauj veidot ekoloģisku darba un dzīves vidi, kā arī jaunie materiāli ir energoefektīvi un bioloģiski noārdāmi [31]. Lai rastu jaunus risinājumus, arvien biežāk zinātnieki savos pētījumos pēta dažādu, netradicionālu materiālu savienojumus, izgatavojot izolācijas plātņu materiālus. Šie pētījumi īsteno ilgtspējības principus, radot arvien biežāk izcilus risinājumus, nekaitējot videi [32–33]. Kompozītmateriālu gadījumā, ko izmanto ēku siltumizolācijai, viens no izpētītajiem veidiem ir neorganisko minerālšķiedru aizvietošana ar dabiskajām šķiedrām no lauksaimniecības resursiem [34–35].

Lignocelulozes materiāli tiek izgatavoti no dažādu izmēru materiālu daļiņām/frakcijām un to orientācijas, variējot ar līmi un līmes apjomu, presēšanas tehnoloģiju, iegūstot dažāda biezuma un blīvuma plātnes. Ir izpētīts, ka garāku un plānu daļiņu izmantošana palielina mehāniskās īpašības, bet, piemēram, nelielās daļiņas uzlabo materiālu virsmas kvalitāti, kas dod gludumu, bet iekšējos slāņos satur slāņu atdalīšanos [36–37].

Siltumvadītspēja ir cieši saistīta ar materiāla porainību [38]. Siltumvadītspējas koeficients λ kompozītos palielinās līdz ar saistvielas saturu, ko apstiprina zinātnieku pētījumi [38–40]. Literatūrā norādīts, ka stiprības parametru nosaka saistvielas tips, saistvielas un pildvielas attiecība, spaļu daļa un maisījuma sablīvēšanas veids [38,41–42].

1.1.1. Atvieglotās plātnes

Kokšķiedru un kokskaidu plātnes tiek iedalītas pēc to blīvuma, lietošanas īpašībām, izgatavošanas tehnoloģijām un uzbūves īpašībām, kas noteikts *LVS EN 316* standartā [43].

Koksnes šķiedru plātnes iedalāmas divās pamatgrupās pēc to izgatavošanas tehnoloģijas. Tiek izšķirtas sausā un mitrā procesa plātnes. Sausā procesa plātņu iedalījums – Blīvās (*HDF*) $> 800 \text{ kg/m}^3$, Vidēji blīvās (*Light MDF*) līdz 650 kg/m^3 , Viegļās (*Ultra Light MDF*) līdz 550 kg/m^3 . Plātnes blīvums veidojas no saistvielas daudzuma un materiālu daļiņu izmēriem. Viegļās plātnes parasti ir porainākas pēc struktūras, blīvumā $180\text{--}320 \text{ kg/m}^3$, tās ir labas izolācijai – skaņas un siltuma izolācijas īpašībām [44]. Pildvielas un saistvielas proporcionālā attiecība ietekmē materiāla fizikālās un mehāniskās īpašības. Pie liela saistvielas daudzuma materiāls gan vizuāli, gan daļēji pēc īpašībām līdzinās plastikāta izstrādājumiem [37]. Mitrās tehnoloģijas kokšķiedru plātnes izgatavo līdzīgi kā kokskaidu plātnes: šķiedru masai pievieno saistvielas (UF, PF) un citas komponentes [31].

Izolācijas materiālus bieži vien aizvieto vieglās kokšķiedru plātnes, tāpēc svarīgi ņemt vērā, ka kokskaidu plātnēm ir dažādi iedalījumi, kā piem. vispārējās nozīmes, interjeram un mēbelēm, būvkonstrukcijām, mitrumizturīgām konstrukcijām un ar paaugstinātu noturību [45]. Atbilstoši šiem ekspluatācijas nosacījumiem LVS standartos ir izvirzītas prasības dažādiem fizikāli mehāniskiem un ķīmiskiem raksturlielumiem.

1.1.2. Atjaunojamo resursu izolācijas plātnes

Francijas un Apvienotās Karalistes pētnieki veikuši pārskatu par bioloģiskiem celtniecības materiāliem, kas izgatavoti ar augu pildvielu. Pildvielas, kādas izmantotas atvieglotā betona izgatavošanā citos pētījumos: kaņepes, lins, koksnes skaidas un šķiedras, saulespuķu stiebrī, kokosrieksti, korķis, sudrabzāle un rīsu sēnalas, lavandas, rapša salmiņi, cukurniedres, bambuss šķiedras u. c. [46].

Islandes un Kolumbijas zinātnieki veikuši pārskata pētījumu par atjaunojamo resursu izmantošanu izolācijas materiālu izgatavošanā un nonākuši pie secinājumiem, ka Eiropā iemesli, lai atgrieztos pie siltumizolācijas materiāliem un alternatīviem resursiem būvniecībā ir: tie ir atjaunojamie materiāli; to īpašības nodrošina cilvēkam nepieciešamo mājokļa mikroklimatu; samazinās to ražošanai nepieciešamās enerģijas daudzums; pēc dabiskās dzīves beigām ir iespējama šo produktu videi draudzīgāka pārstrāde; samazinās pašizmaksa; būvniecība tiks un tiek veikta ar pasīviem un zemākas enerģijas elementiem [47–49].

Polijā, Ļubļinas Tehnoloģiju universitātē zinātnieki pēta kompozītu – linu un kaņepju atlikumu lietojumu ar kaļķa saistvielu zema enerģijas patēriņa būvniecībā. Paraugus izgatavoja divos piegājienos ar dažādu sastāvu attiecību, kur paraugu sastāvā bija kaļķis 18–24 %; cements 2,5–11,8 %; māls 0–2,3 %; kaņepju spaļi 5,4–23,8 %; linu spaļi 0–18,9 %; smiltis 0–11,4 %; ūdens 39,5–55,6 %. Visi paraugi izgatavoti 50 mm biezumā. Izstrādātais materiāla blīvums svārstās robežās 356 līdz 476 kg/m^3 , porainība svārstās starp 78,3 un 81,8 %, ūdens uzsūktspēja 89,3–162,8 %, siltumvadītspēja 0,110–0,151 $\text{W/m}\cdot\text{K}$; spiedes stiprība 0,41–0,85 MPa; lieces izturība 0,05–0,24 MPa [38].

Merili Narep, students Tallinā savā maģistra darbā pētījis industriālo kaņepju izmantošanu izolācijas materiālos un tā īpašības. Izmantojīs pētījumā sauso un slapjo metodi presējot plātnes un saistvielu – *Achema KF-FE* karbamīdformaldehīda sveķiem un cietinātāju *Casco 2535*, presējot 110 °C. Daļu paraugu ārēji apstrādāja ar UF saistvielu un daļu pārklāja ar PVA. Rezultātā paraugiem iegūtas vidējās vērtības sausajā metodē ar biežumu 14,81 mm, blīvumu 547 kg/m³, bet slapjajā metodē biežumu 22,6 mm, blīvumu 186 kg/m³. Uzbriešana slapjās metodes paraugiem 8,8 %, bet ūdens uzūktspēja 476,8 %. Skrūvju tests sausās metodes paraugiem vidēji izturējis 12,09 N/mm, ar UF pārklājumu 20,07 N/mm, ar PVA un cepampapīra pārklājumu 26,65 N/mm, bet slapjās metodes paraugi 2,23 N/mm. Ar sausu metodi izgatavotas plātnes vidējā stiepes izturība ir 0,0147 N/mm², bet šķiedru plātņu stiepes izturība, kas izgatavota ar slapjo metodi, ir 0,0068 N/mm². Gaisa caurlaidība slapjajām plātnēm vidēji ir 1,85 L/min [50].

Francijas pētnieki pēta atjaunojamu resursu izolācijas materiālus no kaņepju un kukurūzu vāļišu atlikumiem. Izmanto 15 % saistvielu no masas svara un kā saistvielas izmantotas sešu veidu zaļās saistvielas, kā galvenā ir pašu lignocelulozes izejmateriālu viela, kura pie 200 °C izstrādā un veido hidrotermisko apstrādi. Izmantots arī ekstrakcijas process, kur šķīdina materiālu sārmu šķīdinātājā 90 °C. Polilaktātskābe PLA 90 – bioloģiski noārdāma termoplastika no atjaunojamiem resursiem. Un vēl trīs saistvielas rūpnieciski ražotas no bio saistvielām: melnais šķidrums (atkritumi no papīra rūpniecība), melase (cukura rūpniecības blakusprodukts) un komerciālais lignīns (blakusprodukts) no kokrūpniecības uzņēmuma *Biochoice R* pulveris, ko nodrošina *Domtar*). Izstrādāto kompozītmateriālu blīvums svārstās no 177–273 kg/m³ ar kaņepju šķiedru kā pildvielu, un svārstās no 457–557 kg/m³ ar kukurūzas vāļišu atlikumiem kā pildvielām. Kaņepju kompozītiem porainība 84,2 % līdz 87,5 % izņemot to, kas veikts ar PLA – 77,5 %. Kompozītiem no kukurūzu vāļišu atlikumiem 60,0 % līdz 65,5 %. Siltumvadītspēja svārstās no 67,5–147,9 mW/m·K [51].

Polijas pētnieki pēta kaņepju kaļķa kompozītu siltuma pārnēsī. Veidoti četru grupu kompozīti ar saistvielas un pildvielas attiecībām: 2:1; 1.83:1; 1,67:1 un 1,5:1. Kompozītu siltumvadītspējas koeficients ir robežās no 0,088 līdz 0,122 W/m·K. Analizētās ārējās sienas ar biežumu 430 mm, kas pildītas ar kaņepju-kaļķu kompozītiem ar λ vērtībām no 0,088–0,122 W/m·K, raksturo vidējais U koeficients diapazonā no 0,2–0,271 W/m²·K [52].

Latvijas pētnieku pētījuma mērķis bija noskaidrot vieglā betona, kas izgatavots no kaņepju spaiļiem, ar sapropeļa un ģipša saistvielu attiecībās 1:1; 1:3; 1:5 un 1:7. Siltumvadītspējas izmaiņas atkarībā no temperatūras nav novērotas paraugiem ar blīvumu 210 kg/m³ un 260 kg/m³, bet ar blīvumu 430 kg/m³ siltumvadītspējas koeficients palielinās, paaugstinoties izmērītajai temperatūrai. Sapropeļa un kaņepju šķiedru kompozītmateriāla siltumvadītspējas koeficients, kas noteikts pie blīvuma 180 kg/m³. Temperatūras diapazonā no – 10–50 °C siltumvadītspēja ir 0,046–0,065 W/m·K⁻¹. Kaņepju šķiedru un sapropeļa kompozīta materiāls nodrošina siltumvadītspējas koeficientu 0,046–0,065 W/m·K⁻¹ un siltumvadītspēju $U=0,19$ W/m·K⁻², kas ir piemērojams visu veidu ēku ārsienām. Konstrūkcijai ar 250 mm kompozītmateriālu ir siltumvadītspēja $U=0,19–0,23$ W/m·K⁻² un skaņas izolācijas indekss $R^{\circ}=30–35$ dB, kas ir pietiekams dzīvojamām, biroju un ražošanas ēkām [53].

Polijas zinātniekiem kaņepju-kaļķu kompozītu kopējā porainība bija no 79,8 līdz 80,5 % masas absorbcija 111,2–138,2 %, jau pirmajās 5 s sasniedz 58,7–67,9 % spiedes stiprība diapazonā no 0,21 līdz 0,37 MPa. [54]

Lietuvas zinātnieki pēta kaņepju spaļu kompozītmateriālu fizikālās īpašības, izmantojot vairākas saistvielas: cementu, mālu, hidratētu kaļķi, cieti. Minimālā siltuma vadītspēja, kas iegūta, izmantojot cietes saistvielu – 0,074 W/m·K ar blīvumu no 260 kg/m³; siltumvadītspēja 0,075 W/m·K ar blīvumu 351 kg/m³, tika iegūta ar cementu saistviela. Kaņepju spaļu kompozītu ar cietes saistvielu, spiedes stiprība ir 1913 kPa, blīvums 480 kg/m³; un ar cementa saistvielu spiedes stiprība 1553 kPa pie blīvuma 519 kg/m³. [55]

Zinātnieki pēta kokskaidu plātņu paņeļu izgatavošanu no lauksaimniecības izejvielām – no kaņepju spaļiem ražoti viena slāņa plātnes un saulespuķu, topinambūra (“Jeruzaleme artišoks”), kukurūzas un sudrabzāles. Plātnes ar 16 mm biezumu un izejvielu blīvumu 400 kg/m³ ražoti, izmantojot PMDI kā saistvielu (6 % cietvielu sveķi, kuru pamatā ir sausa izejviela). Zinātnieki plātņu sagatavošanā izmanto arī UF, PMDI un TF saistvielas. Viņi plātnes izgatavo ar blīvumu 440–632 kg/m³, izmantojot šīs saistvielas, iegūtas sekojošas īpašības (1.1. tab.).

1.1. tabula

Materiālu īpašības, kuru blīvums līdz 400 kg/m³ [56]

Izejmateriāls	Uzbriešana biezumā %	Ūdens absorbcija %	Robežstiprība stiepē perpendikulāri plaknei, MPa	Elastības modulis – MOE, MPa	3 punktu lieces stiprība, MPa
Saulespuķu stiebi	14,9	75,4	0,34	1057	4,5
Topinambūra stiebi	9,6	58,7	0,36	561	2,4
Kukurūzas stiebi	10,4	97,5	0,16	1274	6,2
Sudrabzāles stiebi	6,9	64,8	0,23	1045	5,7
Kaņepju spaļi	28,3	145,1	0,32	1221	6,3
Egles koksne	7,1	31,4	0,47	1091	5,6
Papeles koksne	6,6	36,5	0,37	1007	4,6

Slovākijas zinātnieki pētījuši kaņepju spaļu lietojumu kompozītmateriālos ar MgO saistvielu un cementu. Paraugi tika nocietināti dažādos laika periodos. Sacietēšanas laikam ir būtiska ietekme uz biokompozītu īpašībām, vislielākā spiedes stiprības vērtība 6,9 MPa ir biokompozītiem ar visilgāko sacietēšanas laiku un zemākās siltumvadītspējas koeficienta 0,065 W/m·K un ūdens uzsūktspējas vērtības 9,10 %, siltumvadītspējas koeficientu vērtības samazinās. [57].

Latvijas pētnieki veikuši testus, ar materiālu izveidi jaucot dažādos daudzumos sapropeļa saistvielu un divu izmēra kaņepju spaļus. Veidojuši plātnes ar blīvumu 112–196 kg/m³, spiedes stiprība 0,011 līdz 0,034 MPa, elastības modulis 0,007 līdz 0,031 MPa, secinot, ka izmantojot garākus spaļus uzlabojas siltuma vadītspēja, bet pasliktinās mehāniskās īpašības [58].

Itālijas zinātnieki veikuši pētījumu jaunu, ilgtspējīgu kaņepju bāzes kompozītu izmantošanu būvniecības nozarē: Fizikālais, termiskais un mehāniskais raksturojums. Izgatavoti dažādi blīvuma paraugi no dažādu izmēru kaņepju spaļiem un jaukts hibrīdorganisko – neorganisko saistvielu (balsfīta uz magnija oksīdu, kas reaģē, pievienojot magnija sulfāta ūdens šķīdumu un

reaktīvo augu olbaltumvielu). Veidoti trīs grupu paraugi un ievērojot proporcijas izejmateriāls ar saistvielu un veidojot biežumu – zema blīvuma 1:1 un 50 mm, vidēja 1:1 un 30 mm un augsta blīvuma kompozītmateriālus ar 1:1; 1:1,25 un 1:1,5 proporcijās ar 10 mm biežumu. Zema blīvuma materiāli ar blīvumu 330 kg/m^3 , laba siltumvadītspēja $0,078 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, diezgan laba uguns reakcija (“klase” *C-s2-d0*, saskaņā ar EN 13501-1) un salīdzinoši labas mehāniskās īpašības spiedes pretestība atbilst deformācijas $\epsilon=10\%$; $1,15 \text{ MPa}$, lieces izturība; $0,90 \text{ MPa}$, stiepes izturība perpendikulāra plaknei $=0,18 \text{ MPa}$, pretestība virzienā perpendikulāri paneļa plaknei $R_{s\perp}=2,9 \text{ N}$. Vidēja blīvuma paneļiem ar blīvumu 640 kg/m^3 bija augstāka siltuma vadītspēja $0,138 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Augsta blīvuma paneļiem blīvuma $1025\text{--}1280 \text{ kg/m}^3$ lieces izturība $10,08\text{--}17,47 \text{ MPa}$, stiepes izturība perpendikulāra plaknei $0,82\text{--}1,88 \text{ MPa}$, pretestība skrūvju aksiālajai izraušanai perpendikulāri plaknei $81,9\text{--}147,2 \text{ N}$. Ūdens uzbriešanas testā $10,1\text{--}28,3 \text{ wt}\%$ [59].

Latviešu pētnieki izgatavo četru paraugu variantus no kaņepju spaļiem un diva veida saistvielām – UF ar biežumiem 24, 32, 50 un 100 mm un atbilstošie blīvumi 243, 252 un $316 \pm 38 \text{ kg/m}^3$. Ieguvuši rezultātus $0,051$ līdz $0,063 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [60].

Igauņu zinātnieki izgatavoja plātnes no kaņepju spaļiem, koka skaidām, karbamīda-formaldehīda UF sveķu līmes. Veidotas dažāda savienojuma plātnes, kuras aplīmētas arī ar kraftpapīru. UF līme izmantota 11 % no masas un masas mitruma 7 %. Paraugus izgatavoja divos veidos – ar sauso metodi – 5 min $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ar spiedienu $1,2 \text{ MPa}$. Un slapjā metodē bez saistvielām hidrauliskā presē istabas temperatūrā pie $0,32 \text{ MPa}$ 5 min. Pēc tam tika žāvēti cepeškrāsnī $103 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā 24 h. Sausās metodes plātnēm vidējais blīvums 544 kg/cm^3 , bet pašreizējā eksperimentā ar slapjo metodi izgatavotās plātnes vidējais blīvums bija 185 kg/cm^3 . Ar slapjo metodi izgatavotās plātnes ūdens absorbcijas vidējais rezultāts $8,97\%$, vidējais rezultāts paraugiem $480,11\%$, bet sausās metodes paraugi izšķīda ūdenī. Vidējā izturība uz skrūvju izraušanu sausās metodes plātnēm bija 12 N/mm , bet slapjās metodes 2 N/mm , bet vairāki paraugi salūza. Stiepes izturību sausās metodes paraugi izturēja $0,0147 \text{ MPa}$, un no tā, ko izgatavoja slapjā metodē $0,0068 \text{ MPa}$ [61].

Linu un kaņepju spaļi kā alternatīva skaidu plātņu ražošanā. Galvenie šī eksperimenta interesējošie faktori bija atlikumu veida (koka skaidas, kaņepju un linu spaļi) un sveķu daudzuma ($2,5\%$, 5%) ietekme uz skaidu plātņu īpašībām. Visu plātņu ražošana tika balstīta uz masas aprēķiniem ar tādu pašu mērķa blīvumu 620 kg/m^3 un biežumu $12,7 \text{ mm}$. Katra plātnes blīvuma vidējais lielums tika aprēķināts no 12 paraugiem. Vidējais mitruma saturs tika aprēķināts no 12 paraugiem $2,5\%$ dēļiem un 11 paraugiem 5% paraugiem. Vidējais plātņu blīvums ar $2,5\%$ sveķiem bija no 532 līdz 555 kg/m^3 , bet mitrums $10,24\text{--}11,56\%$. Plātnēs ar 5% sveķiem plātņu blīvums $631\text{--}657 \text{ kg/m}^3$, ievērojami atšķirīgs plātņu tipiem, īpaši starp linu spaļu (mazākais) un kaņepju spaļu (augstākais). Vidējais mitruma saturs $10,22\text{--}10,86\%$. MOR pie $2,5\%$ saistvielas $4,07\text{--}12,40 \text{ MPa}$ un pie 5% saistvielas $7,06\text{--}18,24 \text{ MPa}$; MOE pie $2,5\%$ $1,06\text{--}2,14 \text{ GPa}$, bet pie 5% $1,50\text{--}3,29 \text{ GPa}$; ūdens absorbcija 24 h pie $2,5\%$ $26,75\text{--}48,47\%$, bet pie 5% saistvielas $33,51\text{--}39,48\%$ [62].

Dabas materiālu siltumizolācijas siltumvadītspēja [63–64]

Materiāli	Siltumvadītspēja, W/m·K
Kokšķiedru plātnes	0,040–0,090
Kokskaidu plātnes	0,055–0,100
Salmu ķīpas	0,038–0,072
Lini	0,037–0,045
Kaņepju spaļi	0,039–0,050
Celulozes izolācija	0,045–0,055
Kokosriekstu šķiedra	0,040–0,050
Jūraszāle	0,040–0,045
Kukurūzas stiebrs	0,045–0,055
Bambusa šķiedras	0,080–0,340
Palmu šķiedras	0,041
Saulespuķu stiebrī	0,064–0,085

Holandes uzņēmums jau kopš 1956. gada izgatavo plātnes no linu spaļiem. Šajās plātnēs kā saistviela izmantoti karbamīda sveķi. Plātnes izmanto kā termo un akustikas izolācijas materiālus – tās ir 100 % biodegradējamās, blīvums variē robežās 320–560 kg/m³ atkarībā no biežuma, kas tiek piedāvāts robežās no 16 līdz 50 mm [65].

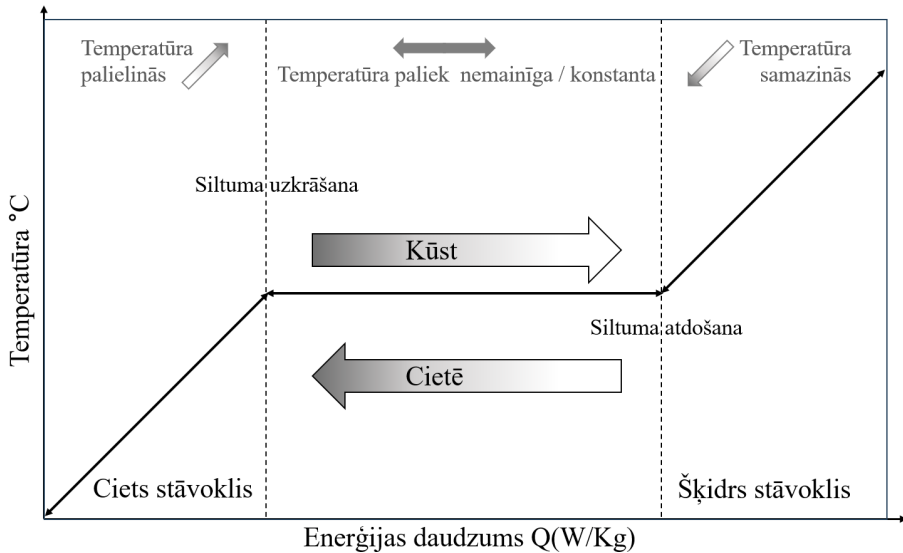
1.2. Siltumietilpības paaugstināšana ar fāzmaiņu materiālu

Fāze ir makroskopiskas fizikālās sistēmas stāvokļu kopums, kam ir relatīvi vienāds ķīmiskais sastāvs un fizikālās īpašības (t. i., blīvums, kristāla struktūra, refrakcijas indekss utt.).

Fāzes maiņa ir termodinamiskās sistēmas pārveide no vienas fāzes uz otru. Fāzes pārejas atšķirīgā pazīme ir pēkšņas vienas vai vairāku fizikālo īpašību, īpaši siltumietilpības izmaiņas ar nelielām izmaiņām termodinamikā, piemēram, temperatūrā.

Fāzmaiņas materiāls kūstot un sacietējot noteiktā temperatūrā spēj uzglabāt vai izdalīt lielu daudzumu enerģijas. Fāzmaiņas materiāli ir ideāli produkti siltuma pārvaldības risinājumiem, jo tie uzglabā un atbrīvo siltumenerģiju kušanas un sacietēšanas procesā (pārmaiņas no vienas fāzes uz otru). Kad šāds materiāls sacietē, tas atbrīvo lielu daudzumu enerģijas latentā saplūšanas siltuma vai kristalizācijas enerģijas veidā. Un otrādi, kad materiāls ir izkusis, no tiešās vides tiek absorbēts vienāds enerģijas daudzums, pārejot no cietas uz šķidru konsistenci (1.1. att.). Šo *PCM* īpašību var izmantot vairākos veidos, piemēram, siltumenerģijas uzglabāšanā, kas var nodrošināt siltumu vai vēsumu vienā procesā vai laika posmā un var tikt izmantots vēlāk vai citā vietā. *PCM* ir arī ļoti noderīgi, nodrošinot siltuma barjeras vai izolāciju, piemēram, transportējot ar kontrolētu temperatūru. Piemēram, ledus kausēšana ūdenī vai ūdens vārīšana tvaikos tiek klasificēta kā fāzes maiņas process. Fāzes maiņas laikā molekulas pārkārtojas, izraisot materiālās sistēmas entropijas (haotiskas) izmaiņas. Termodinamikā ir nepieciešams, lai materiāls absorbētu vai izdalītu siltumenerģiju vai silda šo entropijas izmaiņu dēļ, un šis siltums, kas saistīts ar materiāla masas vienību, tiek definēts kā materiāla latentais siltums. Ūdens sasaldēšanas temperatūra ir fiksēta pie 0 °C (32 °F), kas padara to nepiemērotu

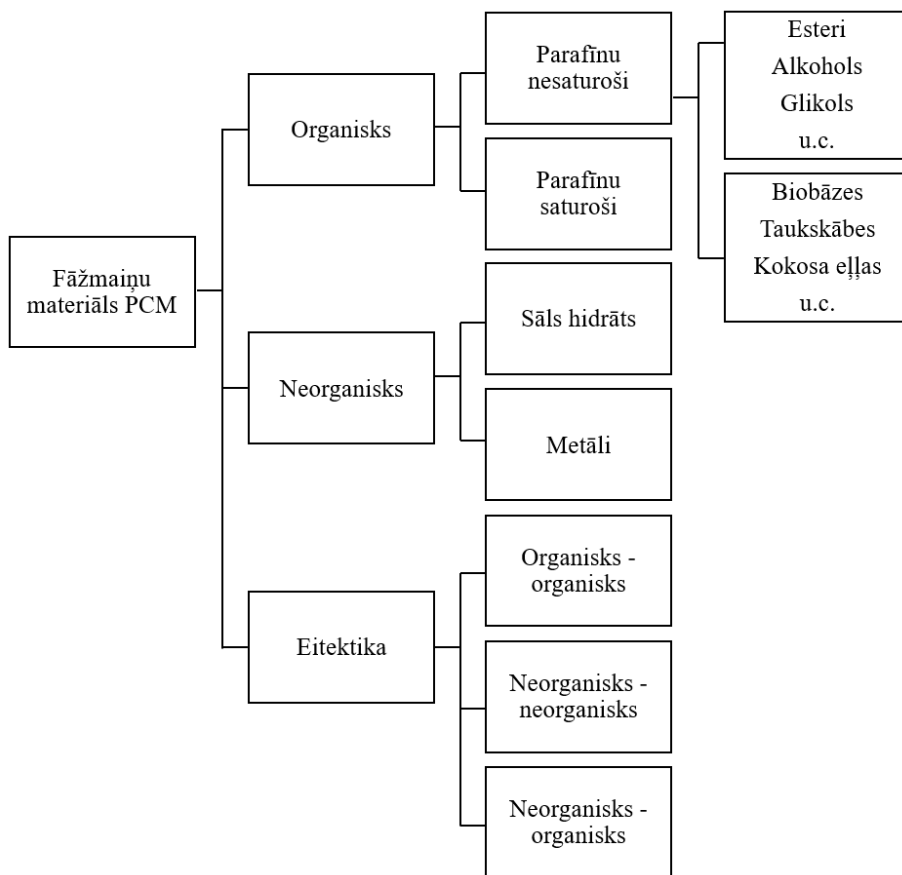
lielākajai daļai enerģijas uzkrāšanas lietojumu. Tāpēc ir identificēti un izstrādāti vairāki dažādi materiāli, lai piedāvātu produktus, kas sasilst un kūst kā ūdens/ledus, bet temperatūrā no kriogēnas līdz vairākiem simtiem grādu pēc Celsija [66–68]. Fāzes maiņas laikā materiāla temperatūra paliek nemainīga. Fāzes maiņas process ietver lielu siltuma pārneši nemainīgā temperatūrā, un abas ir pozitīvas īpašības apkures, dzesēšanas un temperatūras stabilizācijas procesā. Materiāls, kuram piemīt šīs īpašības ir definēts kā fāzmaiņas materiāls. *PCM* ir atradis lietojumu daudzās jomās, piemēram, siltumenerģijas uzglabāšanā, ēku energoefektivitātē, pārtikas produktu dzesēšanā, kosmosa kuģu siltuma sistēmās, saules elektrostacijās, mikroelektronikas termiskajā aizsardzībā.



1.1. att. *PCM* darbības princips [69–73].

1.2.1. Fāzmaiņas materiālu klasifikācija

Fāzmaiņu materiālus var klasificēt, pamatojoties uz to fizikālā stāvokļa izmaiņām. Ēkās galvenokārt izmanto divas *PCM* grupas: ciets-šķidrums un ciets-ciets stāvoklis. Cieta-šķidra stāvokļa *PCM* ir lielāks latentais fāzes pārejas siltums nekā ciets-ciets stāvokļa *PCM* [74]. Lietojot materiālos un jo īpaši to integrēšanai sienās un sienu paneļos izmantoti tikai ciets-šķidra stāvokļa fāžu *PCM*, un tie ir pieejami tirgū ar plašu fāzmaiņas temperatūru diapazonu [75]. *PCM* ir klasificēti trīs kategorijās (1.2. att.): organiskā, neorganiskā un eitektiskā [69].



1.2. att. Fāžmaiņu materiāla *PCM* iedalījums [72–73, 76–77].

Parasti neorganiskajiem savienojumiem ir gandrīz divreiz lielāka latentā siltuma uzkrāšanas spēja ($250\text{--}400\text{ kg/dm}^3$) nekā organiskajiem savienojumiem ($128\text{--}200\text{ kg/dm}^3$). Neorganiskajiem savienojumiem enerģijas uzkrāšanai ir arī augstāka siltumvadītspēja nekā organiskajiem. Tomēr neorganiskie ir vairāk korodējoši pret metāliskiem materiāliem (kuģu konteineriem), uguns nedrošāki un sliktā dzesēšana var nelabvēlīgi ietekmēt to fāzmaiņas īpašības. No otras puses, organiskie savienojumi ir daudzsoļi kā zemas temperatūras *PCM*, jo tie ir ķīmiski stabili, nekorodē un uzrāda reproducējamu kušanas un kristalizācijas fāzmaiņu pēc liela skaita termisko ciklu. Eitektika ir divu vai vairāku komponentu minimālais kušanas sastāvs, no kuriem katrs kūst un sasilst vienādi. Kristalizācijas fāzē veidojas komponentu maisījums, kas darbojas kā viens komponents. Komponenti sasilst līdz ciešam kristālu maisījumam un izkūst vienlaikus bez atdalīšanās. Eitektika var būt organisku un/vai neorganisku savienojumu maisījumi.

Biobāzes *PCM* ir atjaunojama un zaļa alternatīva parafīna *PCM*. Šādas bāzes *PCM* iegūti no dzīvnieku taukiem, palmu eļļas, kokosriekstu eļļas, sojas pupiņām u. c. Tie nav toksiski un tos var pārstrādāt tūkstošiem ciklu bez materiāla noārdīšanās. Tie ir hidroģenēti ogļūdeņraži ar

piesātinātu elektronisko konfigurāciju, tāpēc tie ir ķīmiski stabili un var kalpot gadu desmitiem. Turklāt *PCM* uz tauku un eļļas bāzes piedāvā līdzīgu vai uzlabotu veiktspēju un lielāku ugunsizturības pakāpi, un tie ir salīdzinoši lētāki.

Materiāliem, kas izmantojami fāzmaiņas siltumenerģijas uzglabāšanas sistēmās (TES) [78] jābūt kušanas/sacietēšanas temperatūrai praktiskā lietojuma diapazonā, un tiem jābūt ar augstu latentu saplūšanas siltumu un augstu siltumvadītspēju. Turklāt, lai *PCM* izmantotu TES sistēmu projektēšanā, tiem vajadzētu būt vēlamām termofizikālām, kinētiskām, ķīmiskām un ekonomiskām īpašībām. *PCM* vajadzētu nodrošināt noteiktās vides īpašības, lai samazinātu TES sistēmu ietekmi uz vidi to dzīves cikla laikā. Galvenie *PCM* atlases kritēriji ir apkopoti 1.3. tabulā.

1.3. tabula

Pamatkritēriji izvēloties *PCM* [79]

Termālās un fizikālās īpašības	<ul style="list-style-type: none"> • Piemērota fāzmaiņas temperatūra vēlamajā režīmā. • Augsta siltumvadītspēja. • Augsts latentais fāzes pārejas siltums uz masas vienību. • Augsts īpatnējais siltums un augsts blīvums. • Noteikta kušanas un ilgtermiņa termiskā stabilitāte. • Labvēlīgs fāzes līdzsvars un bez sadalīšanās. • Nelielas apjoma izmaiņas fāzmaiņas gadījumā. • Mazs tvaika spiediens darba temperatūrā.
Kinētiskās īpašības	<ul style="list-style-type: none"> • Augsts kodolu veidošanās ātrums un neliela vai vispār nav šķidrās fāzes pārdzesēšanas. • Augsts kristalizācijas ātrums.
Ķīmiskās īpašības	<ul style="list-style-type: none"> • Pilnīgi atgriezeniski kušanas/sacietēšanas cikli. • Ilgtermiņa ķīmiskā stabilitāte bez noārdīšanās pēc daudziem kausēšanas/sacietēšanas cikliem. • Nav korozijas saskarē ar celtniecības materiāliem. • Netoksisks, neuzliesmojošs un nesprādzienbīstams.
Ekonomiskās īpašības	<ul style="list-style-type: none"> • Neierobežoti pieejams. • Rentabls.
Vides īpašības	<ul style="list-style-type: none"> • Zema iemiestotā enerģija. • Atdalīšanas iespēja no citiem materiāliem un otrreizējās pārstrādes potenciāls. • Zema un nepiesārņojoša ietekme uz vidi.

Fāzmaiņu materiāla pētījumiem pievērsta liela uzmanība, kopš pirmo reizi pieminēti 20. gadsimta 40. gados, īpaši 70. gadu beigās un 80. gadu sākuma enerģētikas krīzes dēļ. Līdz šim ir daudz pārskatu, kas saistīti ar *PCM* izstrādi, tostarp ģeometriju un konfigurācijām, matemātisko modelēšanu, sagatavošanu un raksturošanu, siltuma pārnese paņēmieniem un dažādiem lietojumiem [80–92].

Lielākā daļa pētījumu ir parādījuši, ka *PCM* termiskās uzglabāšanas veiktspējai ir pozitīva ietekme uz ēkas siltuma pārvaldību. Kopš 1980. gada *PCM* tiek izvēlēti ēku siltuma pārvaldībai, ieviešot to *PCM* ģipša plātnēs, apmetumā, betonā vai citos sienu pārklājuma materiālos. Ēkas konstrukcija un materiāls, durvju un logu tips, gaisa kondicionētājs, ledusskapis un mājas dators ir cieši saistīti ar enerģijas patēriņu un tādējādi uzlabo *PCM* lietojuma attīstību ēkā. Tirgū pieejami plašs *PCM* klāsts jebkurā vajadzīgajā temperatūras diapazonā, kas ietilpst šādās trīs

kategorijs: neorganiskās, organiskās un metāliskās vai metalizētās atstarojošās membrānas. Pirmkārt, lai nodrošinātu atbilstošu *PCM* ēkas siltuma pārvaldībai, *PCM* ir nepieciešams atbilstošs kušanas temperatūras diapazons. Tas nozīmē, ka var izmantot tikai tādas *PCM*, kuru fāzes pāreja ir tuvu cilvēka komforta temperatūrai (~20 °C). Ieteicamais *PCM* kušanas temperatūras diapazons materiālos parasti ir no 20 līdz 32 °C [93–94].

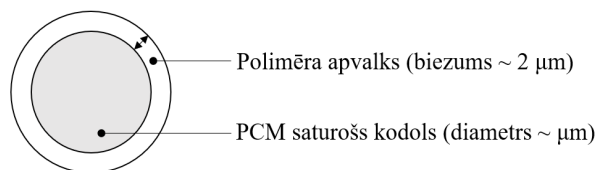
Veikti pētījumi, lai analizētu dažādu dabas resursu izmantojamību kompozītmateriālos [95–97]. Viens no ļoti svarīgiem mērķiem ir iegūt labus siltumvadītspējas parametrus, kur, lai sasniegtu augstu lietderību, tiek izmantotas inovatīvas tehnoloģijas – makro iekapsulēts fāzmaiņas materiāls. Pētījumi par fāzmaiņas materiālu kā latentu siltumenerģijas akumulatoru (*TES*) ir veikti jau vairāk nekā 50 gadus, taču zemās enerģijas cenas un augstās izejvielu izmaksas nemotivēja uzsākt produkta projektēšanu [98–101]. Šobrīd situācija ir būtiski mainījusies, jo samazinās *PCM* izmaksas un pieaug enerģijas cenas; to izmantošana kā latentā siltumenerģijas krātuve iekštelpu mikroklimata pašregulācijai atkarībā no vides temperatūras svārstībām gan gada aukstākajā laikā, gan karstākajā periodā kļūst arvien populārāka [102]. Visā pasaulē notiek pētījumi, galvenokārt izvēloties vietējās izejvielas, kas ne tikai veicinās vietējās ekonomikas attīstību, bet arī samazinās izejvielu piegādes izmaksas. Eko dizainā ir arī tendence, izvēloties saistvielas, kuras var raksturot ar bioloģiski noārdāmām īpašībām [103–106].

Ar *PCM* ir iespēja veikt inovāciju tradicionāliem izolācijas materiāliem – latentā siltuma enerģijas uzkrāšanai un atdošanai, izmantojot ar mikro kapsulām papildinātu fāzmaiņu materiālu un iestrādājot to dažādu struktūru siltuma un skaņas izolācijas materiālos. Šīs kapsulas iestrādā jau plātnēs, tās izgatavojot, vai pēc tam pārklāj, visbiežāk kopā ar ģipša klājumu. Ja izvēlās dabīgu materiālu, tad var radīt labvēlīgu iekštelpu klimatu. Kombinējot *PCM* ar grafiņa plāksnēm un izveidojot to iestrādes tehnoloģiju industriālo kaņepāju spaļu siltumizolācijas plātnēs, iegūtais viedais siltumizolācijas materiāls nodrošinās efektīvu latentā siltuma uzkrāšanu/atdošanu reaģējot uz vides temperatūras izmaiņām, dodot iespēju projektēt ēkas iekštelpu mikroklimata autoregulācijas tehnoloģiju.

1.2.2. Fāzmaiņu materiālu iestrādes iespējas

Izvēloties *PCM* lietošanai ēkas iekštelpu siltuma pārvaldībai, galvenokārt ņemot vērā lietojuma temperatūras amplitūdu un to termofizikālās īpašības, ir svarīgi novērtēt, kā tos iespējams iestrādāt pasīvajās *TES* sistēmās (būvniecības materiāli vai ēku elementi). Tiešā iestrāde materiālā, un fāzmaiņas materiāla iekapsulēšana ir daudzsoļīgākas metodes, lai iestrādātu *PCM* lietotajos būvniecības materiālos. Piesūcināšanas metode ir visvienkāršākā un lētākā, jo ir nepieciešams ļoti maz papildu procesa iekārtu. Šķidrā vai pulverveida *PCM* iejaukts ar būvniecības materiālu (ģipsis, betons) izgatavošanas laikā. Tomēr tādas problēmas kā *PCM* noplūde un iespējamā nesaderība ar dažiem materiāliem var notikt, tāpēc pētnieki meklēja jaunas iespējas *PCM* iestrādāšanai materiālos. Piesūcināšanas metodē porainie materiāli, tādi kā ģipša plātnes, ķieģeli vai betona bloki tiek iemērkti šķidrā *PCM*, absorbējot to. Izmantojot šo metodi, noplūde joprojām var būt problēma daudzu gadu laikā. Jaunākais pētījums, kad *PCM* impregnē dažos mikrostruktūras atbalsta materiālos, lai sagatavotu stabilas formas kompozītmateriālu, ko var saukt par mikroiekapsulētu *PCM*.

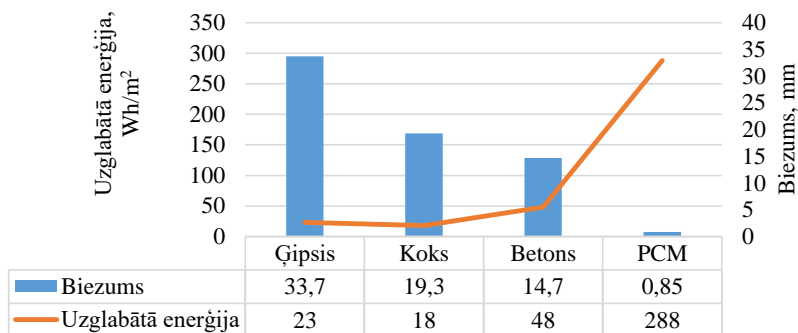
PCM var tikt iekapsulēts (1.3. att.) pirms iestrādes materiālos. Iekapsulētus *PCM* iedala trīs grupās atkarībā no daļiņu lieluma – Nano-iekapsulēts *PCM* robežas no 1 nm līdz 1000 nm; Mikroiekapsulēts *PCM* robežas no 1 līdz 100µm; Makroiekapsulēta *PCM* daļiņas izmērs ir lielāks par 1 mm. *PCM* ierobežošana nodrošina atbilstību stiprumam, fleksibilitātei, korozijas noturībai un termālai stabilitātei, kā arī darboies kā barjerai, lai aizsargātu *PCM* no saskares ar vidi, nodrošināt pietiekošu virsmu siltuma vadīšanai un nodrošināt strukturālu stabilitāti un vienkāršu lietojumu. Pētnieki ir veikuši daudzus darbus, lai optimizētu sagatavošanas un norobežošanas tehnoloģijas un uzlabotu siltuma pārnesei veikspēju. Kā minēts iepriekš, ir divu veidu iekapsulēšanas: mikro un makro iekapsulēšana. Pamatojoties uz pētnieku veikto analīzi, mikroiekapsulētais *PCM* piesaistījis lielu uzmanību lietojumam materiālos. Mikroiekapsulēšana ir tehnoloģija, kurā *PCM* daļiņas tiek iekļautas plānā, noslēgtā un augstas molekulasmasas polimēra apvalkā, saglabājot formu un novēršot *PCM* noplūdi fāzmaiņas procesa laikā. Pārklātās daļiņas pēc tam var iestrādāt jebkurā matricā, kas ir saderīga ar iekapsulēšanas apvalku. No tā izriet, ka apvalkam jābūt saderīgam gan ar *PCM*, gan ar matricu. Mikroiekapsulētos *PCM* ir vieglāk un ekonomiski izdevīgāk iestrādāt materiālā [107–118].



1.3. att. Fāzmaiņu materiāla mikrokapsulas shematisks attēls.

Būtiskākā mikrokapsulu iezīme: to mikroskopisks izmērs, kas pieļauj lielu siltuma absorbcijas un desorbcijas virsmas laukumu, piemēram, kopējais virsmas laukums 1 mm dobām mikrokapsulām ar diametru 0,1 mm ir noteikts aptuveni 60 m², kopējais virsmas laukums ir apgriezti proporcionāls diametram; uzlabo fāzes cikla stabilitāti, jo fāžu atdalīšana ir ierobežota līdz mikroskopiskam attālumam [119–121].

Ja telpa nav kondicionēta, tad iekštelpu temperatūru nosaka āra gaisa temperatūra, kā arī esošo būvmateriālu un to konstrukciju siltumietilpība. Taču vieglās konstrukcijas ēku siltumietilpība ir zema, un tās tiek klasificētas kā zemas siltuminerces ēkas. Būtiskākā *PCM* kvalitāte ir augstā siltuma uzglabāšanas jauda, kas pret materiāla biežumu ir vairākas reizes augstāka nekā tradicionāli lietotiem būvniecības materiāliem (1.5. att.). Lai nodrošinātu tādu pašu siltuma jaudu kā 10 mm biežam *PCM* slānim, ir nepieciešama 110 mm bieža ķieģeļu siena. Kombinējot tradicionālos būvmateriālus ar mikroiekapsulētu *PCM*, tiek palielināta ēkas siltuma inerces, praktiski nepalielinot ēkas masu. Matemātiskās modelēšanas rezultāti ir parādījuši, ka maksimālās temperatūras var samazināt par 2 līdz 3°C karstās dienās, kad tiek izmantota mikrokapsulēts *PCM*. Pēdējos gados veiktie pētījumi ir pierādījuši, ka, izmantojot mikrokapsulētu *PCM*, var panākt līdz pat 15 līdz 20 % enerģijas samazinājumu gaisa dzesēšanas un kondicionēšanas iekārtām [122–124].



1.4. att. Salīdzinājums materiāla biezums pie vienādas siltumietilpības un materiālu uzglabātā enerģija uz vienu vienību [125].

Kad mikroiekapsulēts *PCM* tiek izkliedēts disperģentā, piemēram, ūdens bāzes šķīdumā, iegūta suspensija – mikroiekapsulēta fāzmaiņas materiāla dispersija [126–127]. Ražošanas procesā atbilstošs daudzums virsmaktīvo vielu parasti izmanto, lai palīdzētu *PCM* labi izkliedēties nesējšķīdumā un palielinātos *PCM* kalpošanas laiks. Dispersija parasti tiek izmantots kā nesējšķīdums, jo tam nav acīmredzama negatīva ietekme uz MPCs izgatavošanu, un to ir lēti iegūt, lai gan pārvadātājs šķīdumam jābūt ar augstu siltumvadītspēju un lielu īpatnējo siltuma jaudu. Salīdzinot parasto fāzmaiņas materiālu dispersija, labāko siltuma pārnese veikspēju var sasniegt salīdzinoši lielā virsmas laukuma pret mikroiekapsulētu *PCM* tilpuma dēļ. Tāpēc mikroiekapsulētu *PCM* var izmantot gan kā siltumenerģijas uzglabāšanu, gan siltumenerģiju pārsūtīšanas datu nesēju [128].

1.2.3. Materiāli ar mikroiekapsulētu fāzmaiņu materiālu

Francijas zinātnieku grupa 2019. gadā veica pētījumu par pulverveida mikroiekapsulēta fāzmaiņu materiāla iestrādi cementā. Pētījumā izmantotā *PCM* izmērs bija 5–25 mikroni, kušanas temperatūra 23–27 °C, sacietēšanas temperatūra diapazons 18–23 °C, latentais siltums 160 J/g. Eksperimentāli izgatavotas četru grupu plātnes katrā grupa trīs paraugi ar mainīgu *PCM* sastāvu plātnē, saglabājot nemainīgu izejmateriāla masu, 0 %, 10 %, 20 % un 30 % izmērā 350 × 350 × 30 mm. Siltumvadītspējas mērījumi veikti pēc septiņu dienu žūšanas un iegūti sekojoši rezultāti: 0 % – 0,7 W/m·K, 10 % – 0,6 W/m·K, 20 % – 0,56 W/m·K, 30 % – 0,53 W/m·K. Siltumvadītspējas koeficients samazinās, palielinoties *PCM* apjomam plātnē [129].

Norvēģijas un Spānijas zinātnieku pētījuma rezultātā veikta salīdzinoša analīze divu veidu betoniem ar blīvumu 1250 kg/m³, kuros iestrādātas atšķirīgs *PCM* daudzums robežās no 0 līdz 3,2 %. izmērā 200 × 200 × 25,3 mm. Šajā *PCM* kā fāzmaiņu materiāls izmantots parafīns, kura kušanas temperatūra ir 26,5 °C, cietēšanas temperatūra 24,5 °C, latentais siltums 189 kJ/kg. Siltumvadītspēja noteikta izmantojot karsto platu metodi iegūstot sekojošus rezultātus 0 %–1,3 W/m °C, 1,3 %–1 W/m °C, 2,7 % – 0,7 W/m °C [130].

ASV zinātniskā grupa jau kopš 2002. gada veic pētījumus par šķiedru izolācijas maisījumu ar iestrādātu *PCM*. Izgatavošanas procesā šķiedru izejmateriāls tiek sajaukts ar 30 %

mikroiekapsulētu *PCM* pulveri, kur pulvera frakciju izmērs ir robežas no 5–50 μm , *PCM* materiāls taukskābju esterī, kušanas temperatūra robežas no 25–29 $^{\circ}\text{C}$, latentais siltums 120 J/g. Izgatavojot 51 mm biezu paraugu ar blīvumu 33,6 kg/m^3 iespējams iegūt 0,0388 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ siltumvadītspējas koeficientu [131].

Vācu zinātnieka *P. Schossig* vadītās zinātnieku grupas pētījumā izgatavotas 15 un 6 mm biezas ģipša plātnes iekštelpu apdarei 20 un 40 % mikroiekapsulētu *PCM* sastāvā, kur mikrokapsulu daļiņu vidējais izmērs ir 8 μm , kušanas temperatūru robežas no 24 –26 $^{\circ}\text{C}$. Pētījuma rezultāti parādīja, ka telpā ar apdari plātnēm ar *PCM* temperatūra bija vidēji par 6 $^{\circ}\text{C}$ zemāka, kā telpā ar apdari plātnēm bez *PCM* [132].

Pētījumā, ko veikuši Apvienotās karalistes pētnieki izgatavoja 13 mm biezas māla plātnes iekštelpu apdarei. Izgatavošanas procesā māla masā ieaucā 21 % *Micronal PCM* mikrokapsulu veidā. Izstrādātās plātnes pozicionētas, kā alternatīvs materiāls ģipša plātnēm. Izgatavoto plātņu testēšana veikta laboratorijas apstākļos veidotā kamerā ar klimata variācijas iespējām. Testa rezultāti uzrādīja, ka lietojot 21 % mikroiekapsulētu *PCM*, telpas temperatūru vasaras laikā iespējams samazināt par 3 $^{\circ}\text{C}$ [133].

Pētnieki *Abdellatef Y.*, *Kavgic M.* izstrādājuši astoņas kaņepju spaļu betona paraugu grupas, izmantojot divu ražotāju (*Micronal* un *Nextek*) mikroiekapsulētu *PCM* ar četrām atšķirīgām kušanas temperatūrām (*Micronal* 23 $^{\circ}\text{C}$ un 25 $^{\circ}\text{C}$; *Nextek* 18 $^{\circ}\text{C}$ un 24 $^{\circ}\text{C}$), un divām *PCM* koncentrācijām 9 % un 18 %. Izgatavoto paraugu izmērs ir 200 × 200 × 55 mm un blīvums starp 300 un 500 kg/m^3 . Paraugi no veidņa izņemti pēc septiņām dienām un žūšanas process nodrošināts 21 līdz 28 dienām, līdz sasniegts parauga līdzsvara mitrums un iespējams uzsākt testēšanas procesu. Labākā siltumvadītspēja iegūta paraugiem ar 9 % *PCM* koncentrāciju 0,082 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ *PCM* esot cietā stāvoklī un 0,88 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ *PCM* esot šķidrā stāvoklī. Izvērtējot siltumietilpības rādītājus, secināts, palielinoties *PCM* koncentrācijai palielinās arī siltumietilpība, bet rezultāts ir mainīgs starp ražotājiem. Augstāko siltumietilpību sasniedz ar *Micronal* 18% koncentrāciju 7457 J/kgK [134–135].

Pētnieku grupa no Nīderlandes un Grieķijas ir realizējuši pētījumu par termālo īpašību uzlabošanu betonam pievienojot 1 %, 3 % un 5 % mikroiekapsulētu parafīna *PCM* un variējot ar smilts daļiņu izmēriem. Pētījuma rezultātā secinot, ka palielinot *PCM* apjomu, palielinās betona siltumietilpība pie 5 % *PCM* apjoma sasniedzot 6800 J/K temperatūras diapazona no 24 līdz 26 $^{\circ}\text{C}$. Kā arī 5 % *PCM* piejaukums betonam 48h enerģijas patēriņu samazina par 12 % [136].

Polijas pētnieki izstrādājuši trīsslāņu kaņepju spaļu bloku ar mainīgu blīvumu slāņos un izmēros 600 × 400 × 480 mm ar iestrādātiem deviņiem sensoriem. Bloka pirmais slānis ar blīvumu 400–450 kg/m^3 , biežumu 50 mm un masā iejauktu dispersiju ar 10 % mikroiekapsulētu *PCM*, vidējais slānis ar biežumu 280 mm un blīvumu 200–250 kg/m^3 un trešais slānis ar blīvumu 400–450 kg/m^3 un biežumu 50 mm. Izvēlēta mikroiekapsulētā *PCM* kušanas temperatūra ir 23–27 $^{\circ}\text{C}$, kā *PCM* materiāls lietots *MikroCAPCPCM25-S50* parafīna vasks, mikroiekapsulētā *PCM* sastāvs dispersijā 41–45 %. Bloka izgatavošanai lietota magnija saistviela. Veicot siltumpārnēses testu izgatavotajam blokam, secināts, ka slānis ar 10 % mikroiekapsulēto *PCM* kušanas temperatūras amplitūdā, novērotas bloka dinamisko īpašību novirze [137].

Lielbritānijas un Ķīnas pētnieki izstrādāja ģipša plātņi $400 \times 400 \times 10$ mm sastāvā iejaucot 5 %, 10 %, 15 % *PCM* parafīna pulveri *Micronal DS5040X* ar kušanas temperatūru 23 ± 1 °C. Paraugš tika žāvēts 28 dienas, līdz tas sasniedz līdzsvara mitrumu, un bija iespējams veikt pārbaudes. Pētnieki secināja, ka iejaucot masā *PCM* pulveri samazinājās blīvums, jo *PCM* ir mazāks daļiņu izmērs nekā ģipša daļiņas un aizpildās poras starp ģipša daļiņām, plātnē ar 15 % *PCM* tas bija 1549 kg/m^3 . *PCM* koncentrācijas palielināšanās samazina siltumvadītspēju, jo *PCM* ir zemāka siltumvadītspēja un tas samazina parauga kopējā siltumvadītspēju plātnē ar 15 % *PCM*, tā bija $0,139 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ [138].

Spānijā pētnieku grupa izgatavoja divas telpas $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ m, kur vienas telpas sienas veidoja, izmantojot ģipša plātnes ar mikroiekapsulētu *PCM* (kušanas temperatūra 22 °C), bet otrā telpā plātnes bez *PCM*. Telpā ar *PCM* temperatūru karstākajā dienas laikā izdevās samazināt par 2 °C. Veicot ugunsizturības testu plātnei ar *PCM* tika sasniegta B klase, kas ir līdzvērtīga standarta ģipša plātnei. Testa veikšanas laikā secināts, ka apsildot iespējams ietaupīt 10–15 % enerģijas, bet 30 % dzesējot telpu, lietojot plātnes ar *PCM* [139].

Pētnieki G. Baumanis un D. Bajāre no Latvijas veikuši pētījumu par *PCM* apjoma ietekmi uz kaņepju betona termisko masu. Pētījuma laikā izgatavoti kaņepju betona paraugi, kā saistvielu izmantojot ģipsi, izmērā $200 \times 200 \times 40$ mm un blīvumu $366\text{--}392 \text{ kg/m}^3$. Parauga masā iejaukta 5 %, 10 % un 20 % mikroiekapsulēta *PCM* dispersija ar *PCM* kušanas temperatūru robežas 23–27 °C. Parauga siltumietilpība pieauga proporcionāli *PCM* apjomam palielinoties *PCM* 5 par 16,7 %, *PCM* 10 par 31,8 % un *PCM* 20 par 70,4 % kas ir $1,901 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$. *PCM* saturs kaņepju betonā neietekmēja siltumvadītspēju, saglabājot rezultātu robežās no 0,098 līdz $0,102 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Spiedes stiprība materiālam samazinājās par 25–30 % pie *PCM* apjoma 10–20 % [140].

2. EKSPERIMENTU MATERIĀLI UN METODES

Nodaļā apkopota informācija par materiālu izvēli paraugu izgatavošanai, izgatavošanas tehnoloģiju, testēšanā lietotajām metodēm un paraugu sagatavošanu atbilstoši standartiem. Izolācijas materiāliem ir svarīgas īpašības – siltuma vadītspēja, siltumietilpība, skaņas absorbcija, uguns noturība, tas ir drošs videi un cilvēkam, ilgtspējīgs un izturīgs. Lai nodrošinātu iepriekš minētās īpašības, izveidotajam plātņu materiālam veiktas atbilstošas pārbaudes.

Plātņu paraugu izgatavošanai nepieciešamas četras dažādas sastāvdaļas – kaņepju spaļi, koksnes garenfrēzēšanas skaidas, saistviela un mikroiekapsulēts fāzmaiņu materiāls. Sastāvdaļas izvēlētas ņemot vērā šādus kritērijus: vietējā pieejamība, funkcionālā atbilstība un ietekme uz vidi (iegūšana, ražošana, izmantošana).

2.1. Izejmateriālu raksturojums

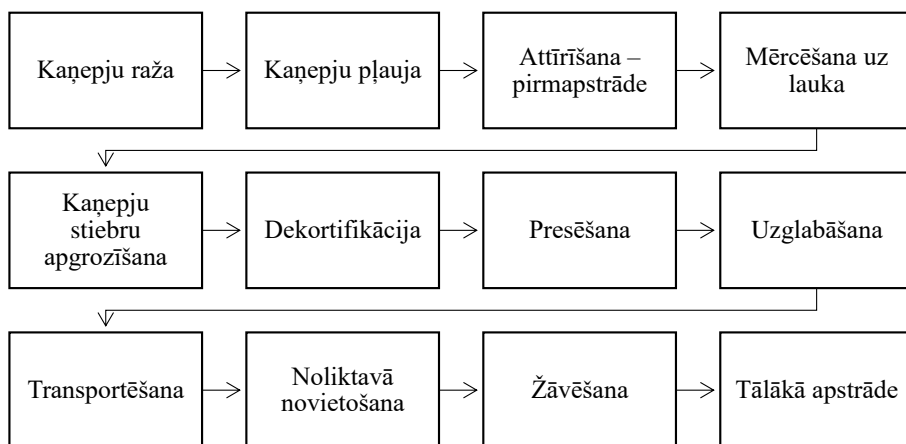
Visi izejmateriāli paraugu izgatavošanai iegūti Latvijā. Kaņepju spaļi un priedes garenfrēzēšanas skaidas ir ražošanas blakus produkti, kurus bieži vien turpmākajā ražošanas procesā neizmanto (labākajā gadījumā kā pakaišus vai kurināmo).

2.1.1. Kaņepju spaļi

Materiāls plātņu izgatavošanai izmantots no Latgales Lauksaimniecības zinātnes centra eksperimentālā parauglaukuma; iegūtais materiāls ir izmēros <50 mikroni līdz 70 mm ar lielu šķiedru un putekļu maisījumu. Rūpnieciskā kaņepju šķirne *Bialobrzeskie* ir Polijas šķirne, kuras īpašnieks ir Dabisko šķiedru un ārstniecības augu institūts. Starp citām Eiropas valstīm lauksaimniecības apstākļos *Bialobrzeskie*, audzēta arī Viļānos, Latvijā. *Bialobrzeskie* ir ļoti perspektīvs augs, kas Latvijas augsnes un klimatiskajos apstākļos ļauj iegūt augstu kaņepju stiebru ražu, kā arī ir augsni atjaunojošs augs. Ražas novākšana un materiāla sagatavošana veikta 2017. gada augustā. Kaņepju stiebru pārstrādei, lai iegūtu spaļus (2.2. att.), izmantota tradicionālā pārstrādes metode – ražas novākšana, tilināšana, presēšanas, pirmreizējā griešana, šķiedras un spaļu atdalīšanas procedūras (2.1. att.).

Kaņepju spaļi ir rūpniecisko kaņepju stumbra kokainā daļa. No viena kultivēšanas hektāra var iegūt 6–9 t kaņepāju stiebrus, no kuriem ~75 % ir stiebra kokainā serde jeb spaļi. Kaņepēm augšanai nepieciešams liels daudzums oglekļa dioksīda. Viena tonna kaņepju raža var uzglabāt 1000–2900 kg CO₂ [141]. Kaņepju spaļi no atmosfēras absorbē oglekļa dioksīdu, kas ir dabisks process, kas dod mums iespēju kontrolēt oglekļa dioksīda emisijas. Šajā gadījumā izgatavotās plātnes, kuru galvenais izejmateriāls ir kaņepju spaļi, nodrošina iespēju uzkrāto oglekli saglabāt plātnes struktūrā [142–149].

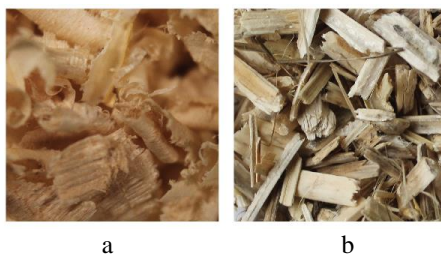
Materiāli uz kaņepju spaļu bāzes atbilst augstas kvalitātes vides standarta prasībām un tiem ir zema kopējā ietekme uz vidi oglekļa dioksīda uzglabāšanas dēļ [150]. Uzglabājot oglekli kaņepes var uztvert līdz divām tonnām CO₂ uz tonnu šķiedras, kas padara spaļu izmantošanu materiālos par īpaši pievilcīgu izejmateriālu [151].



2.1. att. Tradicionālā kaņepju šķiedru un spaļu iegūšanas metode.

2.1.2. Priedes koka garenfrēzēšanas skaidas

Kokrūpniecība Latvijā ir viena no lielākajām pārstrādes nozarēm. Arvien vairāk tiek ražots galapatēriņa produktu – būvniecības un mēbeļu ražošanas izejvielas. Kokapstrādes rezultātā rodas koksnes blakusprodukti [152–153]. Analizējot no turpmākās izmantošanas viedokļa, to pārstrāde kurināmā resursu ražošanā nav izdevīga. Ņemot vērā faktu, ka mēbeļu ražošanas uzņēmumi un galdniecības galvenokārt izmanto izejmateriālu ar $8 \pm 2\%$ mitruma saturu, blakusprodukti ir piemēroti tālākai lietošanai/pārstrādei. Izmantojot koksnes skaidas kā vienu no sastāvdaļām, ir iespējams vieglāk integrēt jauno plātņu ražošanas tehnoloģiju esošajā kokskaidu plātņu ražošanas tehnoloģiju līnijā. Pēc priekšizpētes paraugu pārbaudēm var secināt, ka skaidas nodrošina lielāku plātnes stabilitāti, veicot ūdens uzsūkšanas testu, ļaujot tam ilgāk saglabāt formu. Paraugu izgatavošanai izmantotas skaidas (2.2. att.) no garenfrēzēšanas apstrādes procesiem, kur kā griezējinstrumentu izmantota vārpsta ar segmenta veida asmeņiem.



2.2. att. a – koka garenfrēzēšanas skaidas; b – kaņepju spaļi.

2.1.3. Izejmateriālu komponentu mitruma noteikšana

Mitruma saturs lignocelulozes izejmateriālu maisījuma materiālos noteikts saskaņā ar LVS EN 322 [154] standartu, izmantojot masas metodi.

Pārbaudītais materiāls ir priedes koka garenfrēzēšanas skaidas un kaņepju spaļi. Katra veida izejmateriālu sagatavo trīs atsevišķos alumīnija traukos, paraugu ņemot no uzglabāšanas maisa

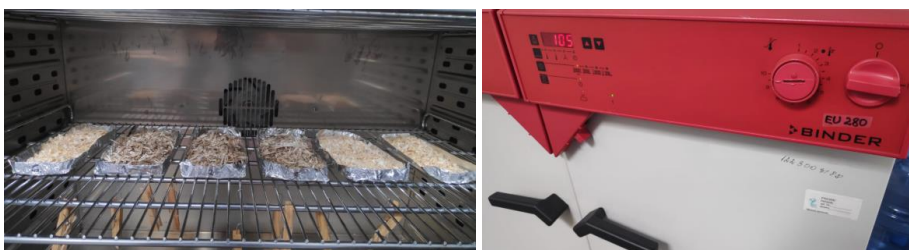
virspuses, vidus un apakšējās daļas. Traukus secīgi sanumurē, nosver ar digitālajiem svāriem “Kern EMB 600-2” (ar precizitāti 0,01 g) un ievieto žāvēšanas skapī (*Binder KBF 115*) (2.3. att.) uz 24 h 105 ± 2 °C grādos atbilstoši standartam. Pēc noteiktā laika no žāvēšanas skapja izņem paraugus un nosver, nosakot masas izmaiņas. Mitruma saturu izejmateriālā aprēķina ņemot vērā parauga masu pirms un pēc žāvēšanas atbilstoši vienādojumam (1.1.):

$$W_{\bar{u}} = \frac{m_t - m_o}{m_o} * 100\% \quad (1.1.)$$

kur $W_{\bar{u}}$ – ūdens absorbcija, %;

m_t – parauga masa pirms žāvēšanas, g;

m_o – parauga masa pēc žāvēšanas, g.



2.3. att. Paraugu izvietoējums žāvēšanas skapī.

2.1.4. Izejmateriālu granulometriskā analīze

Birstoša izejmateriāla analizēšanai ar dažādu izmēru daļiņu izkliedi izmantota sijāšanas metode, smalkākās daļiņas atdalot no lielākajām [155], atbilstoši *LVS EN 933* standartam [156–157]. Ar šo metodi var attēlot daļiņu izmēru sadalījumus izejmateriālā un veikt salīdzinošo analīzi starp materiāliem. Sijāšanas process veikts ar digitāli vadāmu elektromagnētisko sietu kratītāju “*Matest A059-01 KIT*” ar sietu diametru 200 mm un deviņu sietu kolonnu, kur sieta acu atvērums izmēri ir robežās no 90 μm līdz 5600 μm un sieti izkārtoti izmēriem augošā secībā. Siets ar lielāko acu atvērums 5600 μm atrodas sietu kolonnas augšā un tajā ievietots sijājama izejmateriāla paraugs.

Katram izejmateriāla veidam sijāšana veikta divām paraugu grupām. Izejmateriāla parauga materiāls ņemts no izejmateriāla uzglabāšanas maisa virspuses, vidus un apakšas, lai varētu novērtēt un salīdzināt izejmateriāla daļiņu izmērus visā uzglabāšanas maisā. Pirms sijāšanas materiālu, ko liek augšējā sietā, nosver ar digitālajiem svāriem “Kern EMB 600-2” (ar precizitāti 0,01 g).

Sijāšana veikta, izmantojot pārtraukto ciklu ar 58 s vibrācijas laiku un 2 s pārtraukumu, kopējais katra parauga sijāšanas cikls ilgst 9 min. Vibrācijas intensitāte – 80 W/m². Pēc sijāšanas procesa no iekārtas ņem pa vienam sietus, katru sietu izber metāla traukā, ar 25 mm platas otiņas palīdzību iztīra materiāla atlikumus no sieta un veic attiecīgā sieta daļiņu svēršanu. Rezultātus atspoguļo kā īpatnību procentos no katras acs atvērums sieta (2.4. att.).



2.4. att. a – Elektromagnētiskais sietu kratītājs; b – frakciju izņemšana no sietiem.

2.2. Izejvielu raksturojums

Izejvielas izvēlētas pēc to funkcionālajām īpašībām, analizējot literatūru un izgatavošanas (iestrādes) iespējas.

2.2.1. Saistvielas izvēle

Saistvielas pēc *LVS EN 923* standarta ir nemetāliski, plastiski, šķidri vai cieti materiāli, kas var saistīt cietas savienojuma daļas ar virsmas sasaisti (adhēziju) un iekšēju izturību (kohēziju), būtiski nemainot saistāmo materiālu īpašības un uzbūvi. Šķiedru plātņu ražošanā saistvielām cieši jāsaista šķiedras, lai plātnēm piešķirtu stabilitu, izturīgu formu un vajadzīgās īpašības [158].

Plātņu izgatavošanai izmantota saistviela – pulverveida karbamīda sveķu līme (UF) ar cietinātāju aukstai presēšanai, kas izvēlēta pamatojoties uz tās fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām, kā arī lietojuma iespējām. Sastāvā ir pulverveida urīnvielas sveķi ar cietinātāju, tos sajaucot ar ūdeni, iegūst viskozu vielu.

UF līmes ir lielākās aminosveķu klasē un ir visplašāk izmantotā saistviela iekštelpu šķiedru plātņu ražošanā [159]. UF sveķu līmes pozitīvie aspekti: zema cena – tā ir nedegoša, gaišs tonis, ātra vulkanizācija. Negatīvie aspekti: nav ūdens izturīga, var izdalīties formaldehīds [160]. Svarīgākais faktors saistvielas izvēlei ir tās izmantošana aukstās presēšanas tehnoloģijas vajadzībām, jo *PCM* materiāla pilnvērtīgai funkcionēšanai nedrīkst izmantot silto vai karsto presēšanas tehnoloģiju. Tā kā mikrokapsulas ar *PCM* materiālu atrodas ūdens emulsijā, bija būtiski ūdenī šķīstošas saistvielas izvēle. Saistviela tiek piegādāta balta pulvera veidā. Lai to lietotu līmēšanas procesā, to nepieciešams sajaukt ar ūdeni attiecībā 2:1 vai attiecīgi pret izejmateriāla mitrumu un struktūru. Saistvielas sagatavošanu nosaka ražotāja tehniskā datu lapa [161], kur daļa no nepieciešamā ūdens ir no *PCM* ūdens, emulsijas un pārējais nepieciešamais ūdens daudzums pievienots papildus. Presēšanas laiks 20 °C temperatūrā ir 270 min, kaņepju spaļu materiāla mitruma saturam jābūt 8–10 % robežās, saistvielas tilpums plātnē 10 % no sausās izejmateriāla masas.

2.2.2. Mikroiekapsulēts fāzmaiņu materiāls

Izvērtējot tirgū pieejamos rūpnieciski ražotos fāzmaiņu materiālus mikrokapsulās, izveidojās laba sadarbība ar uzņēmumu *MikroCaps*. *MikroCaps* ir Slovēnijā bāzēts uzņēmums,

kurš pamatā nodarbojās ar fāzmaiņu materiāla mikroiekapsulēšanu. *PCM* saņemts no uzņēmuma *Rubitherm Technologies*, kurš ir viens no senākajiem *PCM* ražojošajiem uzņēmumiem un atrodas Berlīnē, Vācijā.

Izvērtējot lietojuma temperatūras amplitūdu, termofizikālās īpašības un iestrādes iespējas, pēc konsultācijām ar MikroCaps uzņēmuma zinātniekiem, ir izvēlēti divi fāžu maiņas materiālu mikrokapulu produkti *PCM-50* un *PCM-28*, kas pirmo reizi iestrādāti izolācijas materiālu prototipos. Izvēlēto mikrokapulu īpašības sakopotas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Fāzmaiņu mikrokapulu raksturlielumi

<i>PCM-S50</i>	<i>PCM-28</i>
Veids: Mikroiekapsulēta fāzmaiņas materiāla dispersija ūdenī Apvalka materiāls: Poliuretāns (bez formaldehīda satura) PCM materiāls: Biobāzes	Veids: Ūdens dispersijā fāzmaiņu materiāls mikrokapulu veidā Apvalka materiāls: Melamīna – formaldehīds PCM materiāls: Parafīna vaski
PCM sastāvs kapsulā: 75–80 w% Kapsulu sastāvs dispersijā: 49–53 w% PCM kušanas temperatūra: 23–28 °C Siltuma uzglabāšanas jauda: 160–180 J/g pH: 6,0–9,0 Blīvums: 900–970 g/L Viskozitāte (pie 25°C): 100–1000 cPs Izskats: balta ūdens bāzes dispersija Vidējais kapsulas izmērs: 1–15 μm	PCM sastāvs kapsulā: 75–80 % Kapsulu sastāvs dispersijā: 35–38% PCM kušanas temperatūra: 25–29 °C Siltuma uzglabāšanas jauda: 55–75 J/g Siltuma uzglabāšanas jauda: 160–185 J/g pH: 7,0–9,0 Blīvums: 900–970 g/L Viskozitāte (pie 25 °C): 10–500 cPs Izskats: balta dispersija Vidējais kapsulas izmērs: 2–10 μm
Lietošanas ilgums: 6 mēneši	Lietošanas ilgums: 24 mēneši

Uzsākot eksperimentālo daļu, testēti abi *PCM* materiāli dažādās plātņu izgatavošanas tehnoloģijās. *PCM-28* (tā sastāvā ir parafīns) tika testēts dažādos tehnoloģiskos iemaisīšanas veidos, bet neizdevās sasniegt viendabīgu līmes masu, jaucot ar UF pulveri. Maisīšanas procesā veidojās dažādas materiāla struktūras; varēja novērot, kā veidojas nesaderība starp materiāliem – ūdeni, UF saistvielu un veidojot viskozu gumijotu masu. Tika meklēti dažādi risinājumi, bet iznākums visos mēģinājumos bija viens – viskoza gumijotu masa. Šajos izmēģinājumos izkristalizējās pieņemamākais variants – sausā izejmateriāla masā iejaukt *PCM* un tad saistvielas pulverveida masu, bet arī šajā variantā ar laiku varēja novērot materiālu nesaderību, vietām izveidojoties lielākai baltai masai, kuru neiespējami bija vienmērīgi iemaisīt kopējā masā. Šo izmēģinājumu rezultātā pieņemts lēmums darbu turpināt ar rūpnieciski izgatavotu *MikroCaps PCM-50* mikrokapulu ūdens dispersijas materiālu, jo materiālu savstarpējā saderība bija nevainojama. Būtisks faktors attīstīt plātņu materiālu ar *PCM-50* mikrokapulām ir kapsulas apvalka materiāls Poliuretāns (bez formaldehīda satura) un bioloģiskas izcelsmes fāzmaiņu materiāls, ko uzņēmums neizpauž. Ūdens dispersija ar mikroiekapsulētu fāzmaiņu materiālu, iemaisītas izejmateriāla masā, lai uzlabotu eksperimentālā materiāla latentā siltuma enerģijas uzkrāšanas un atdošanas īpašības. Pamatojoties uz latentā siltuma izmantošanas lielo potenciālu, tas kļūst par iespējamo jauno tehnoloģiju izstrādes risinājumu, kas saistīts ar iekštelu mikroklimata autoregulāciju.

2.3. Plātņu izgatavošana

Kad izejmateriālu maisījums ir izveidots, tad izmantojot vienu no izgatavošanas metodēm izveido parauga formu. Ir iespējams lietot dažādas parauga izgatavošanas metodes, bet pamatā izmanto kādu no sekojošajām: aukstā līmēšana presējot, presēšana bez saistvielas, karstā presēšana, smidzināšana, putošana, cauradatošana un caurstrūklošana [162]. Vairāk izmantotā metode ir aukstā formēšana vai presēšana, izmantojot vismaz vienu saistvielu, lai savienotu viena vai vairāku birstošu izejmateriālu plātņu materiālā [163].

Eksperimentālos paraugus izgatavo ar auksto presēšanas tehnoloģiju, izmantojot viencilindra hidraulisko presi ar manuālu vadību, kur pieliktā spiediena apjoms, novērtēts ar manometra palīdzību (2.5. att.). Plātnes izgatavotas pēc slāņu un struktūru principa, kur izejmateriāli jaukti atsevišķi vai kopā ar saistvielu, variējot ar strukturālo sastāvu, kas ir noteikts eksperimenta plānā. Tā kā preses plātņu izgatavošanai maksimālais pieļaujamais laukums ir 400×400 mm, tad izgatavotas divu izmēru matricas 400×400 mm un 200×200 mm, un izmantota pēc situācijas nepieciešamā matrica, kur pēc presēšanas paraugi piegriezti atbilstoši standartā noteiktajām testēšanas prasībām atbilstoši paraugu sagatavošanas standartam.



2.5. att. Paraugu izgatavošanas process.

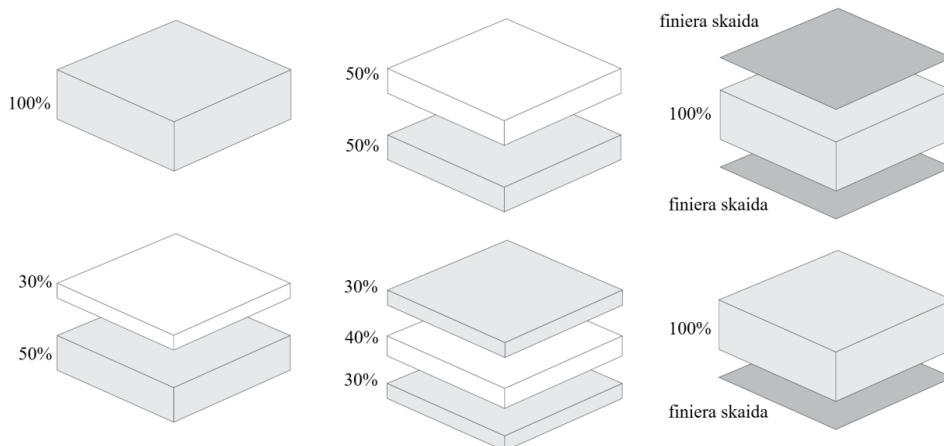
2.3.1. Materiāla uzbūves struktūra un paraugu izgatavošanas plāns

Pirms paraugu izgatavošanas procesa nepieciešams sagatavot eksperimentālo plānu, kādas būs paraugu struktūras, mainot izejmateriāla proporcijas, un kā tehnoloģiski secīgi izgatavos paraugus.

Veidojot dažādas struktūras, prototipus izgatavo gan pēc slāņu principa metodes, gan jaucot kopā masā, gan apvienojot metodes kopā. Struktūras veido, ņemot vērā plātņu plānoto lietojumu (sienu apdarē, griestu vai mēbeļu elementos). Izzinot publicēto literatūru un tirgū esošo materiālu piedāvājumus, secināts, ka biežāk mazākais lietotais biežums ir 25 mm. Tādēļ pieņemts lēmums paraugus izgatavot tieši šajā 25 mm biežumā. Paraugus izstrādā atbilstoši plānotajam lietojumam kā brīvi stāvošus, slodzi nenesošus un stiprināmus elementus, attiecīgi plātnēm jāatbilst noteiktām mehāniskām īpašībām.

Plātņu izgatavošanai par pamatu ņemts skaidu plātņu veidošanas princips – ārējie slāņi ir no smalkākām frakcijām ar augstāku blīvumu, vidējā slānī izmantotas rupjākas frakcijas, izveidojot plātnē vairāk gaisa kabatas, kas pozitīvi ietekmē materiāla fizikālās īpašības. Veidojot struktūras, veic gan izejmateriālu jaušanu dažādās izejmateriālu proporcijās, gan mainot kaņepju spaļu un koka skaidu slāņu novietojumu plātnē, gan variējot ar frakciju izmēriem, gan veidojot plātnes pēc izgatavošanas slāņu principa – 100 %; 50:50 %;

30:40:30 %; 70:30 % (2.6. att.). Lai paaugstinātu plātnes mehāniskās īpašības, presēšanas laikā paraugus apfinierē no vienas vai simetriski abām pusēm. Eksperimentālā kārtā veidotas arī plātnes ar dažādām virsmas struktūrām, testējot virsmu strukturēšanas iespējas un estētisko veidolu.



2.6. att. Plātņu materiālu proporcijas.

Izanalizējot 47 paraugu grupas (2.2. tab.), izvēlēts turpmāk attīstīt deviņas paraugu grupu plātnes (2.3. tab.), kuras testē pēc standartā noteiktām metodēm, lai noskaidrotu plātņu īpašības. Pilnveidojot izvēlētos plātnes veidus, visām plātnēm definēts konstants plātnes izejmateriāla un saistvielas apjoms, lai varētu novērtēt plātnes kopējās īpašības, un kādu ietekmi atstāj mikroiekapsulēta *PCM* pievienošana plātnes sastāvā.

2.2. tabula

Eksperimentālo plātņu veidi

Eksperimentālo plātņu veidu plāns	Plātņu veidu daudzums
Dažāda biezuma 20; 25; 50 mm	3
Dažādu izejmateriālu daudzums 200; 250; 300; 500 g	4
Ar dažādu ūdens daudzumu saistvielai	3
Ar dažādu saistvielas procentuālo daudzumu 4–14 %	6
Ar dažādu frakcijas izmēru (nesijāts, sijāts virs 500 μm, sijāts virs 2000 μm; H un W atsevišķi)	6
Trīs slāņu – malās smalkāk, vidū nesijāts 30:40:30 (gan tikai no H, gan jaucot H ar W slāņos)	2
Divu slāņu – 50:50; 30:70 (gan tikai no H, gan jaucot H ar W slāņos, gan ar frakcijas izmēriem)	5
Virsmu reljefi (gan tikai ar H, gan ar W, gan reljefa pusē liekot smalkāki sijātu)	6
Finierējot (no vienas puses vai abām, liekot matricā apakšā vai augšā, uzklājot saistvielu atsevišķi vai neuzklājot)	4
<i>PCM</i> iestrādes veidi	8

Pievienojot plātnes sastāvam attiecīgā daudzuma mikroiekapsulēto dispersiju iespējams prognozēt, ka paraugu masa būs mainīgs lielums 4–13 % robežās (2.4. tab.).

Pirms plātņu izgatavošanas veikta izejmateriālu mitruma noteikšana un secināts, ka mitrums atbilst saistvielas prasībām 8 ± 2 % (3.1.1. nod.). Lai izgatavotu $200 \times 200 \times 25$ mm paraugus, nepieciešams konstants definētais izejmateriāls 250 g apjomā ar 8 % mitrumu. Absolūti sauss aprēķinātais izejmateriāls ir 231,5 g, kas izteikts pēc mitruma noteikšanas metodes atbilstoši vienādojumam (1.1.), un, par pamatu ņemot šo masu, aprēķina citu sastāvdaļu masas apjomu plātnē.

Lai varētu aprēķināt plātnes masu un blīvumu, aprēķinos lieto katras sastāvdaļas absolūti sauso masu. Saskaņā ar eksperimentālo plānu un veiktajiem aprēķiniem plātnes blīvums paredzams 290 ± 20 kg/m³.

Plātņu izgatavošanā saistvielas daudzums izmantots 10 % no absolūti sausas izejmateriālu masas, balstoties rūpniecībā lietoto saistvielas proporcijā līdzīgu plātņu izgatavošanai. Attiecīgi 231,5 g izejmateriāliem, pievieno 23,15 g UF pulvera saistvielu un 18,94 g ūdens, kas savā starpā veido proporciju 55 : 45. Veicot plātnes masas noteikšanu 336 h pēc presēšanas, secināts, viss saistvielai pievienotais ūdens pilnībā no plātnes iztvaiko (3.3.1. nod.).

Plātnēm, kurām pievienota mikroiekapsulēta *PCM* dispersija ar sauso kapsulu apjomu robežās no 49 % līdz 53 %, aprēķinos pieņemts 52 %, veidojot proporciju 52 : 48 (kapsulas : disperģents). Balstoties literatūras izpētē, izvēlēts pievienot trīs masas % apjoma mikroiekapsulas – 5 %, 10 % un 15 %.

Mikroiekapsulēto *PCM* procentuālo daudzumu rēķina arī pret absolūti sausu izejmateriāla masu, kur: 5 % mikroiekapsulēto *PCM* gadījumā plātnei pievienotu 22,26 g dispersijas (11,57 g mikroiekapsulu, 10,68 g disperģenta (kas iztvaikotu)); 10 % – 44,52 g dispersijas (23,15 g kapsulas, 21,37 g disperģenta); 15 % – 66,77 g dispersijas (34,72 g kapsulu, 32,05 g disperģenta).

2.3. tabula

Paraugu izgatavošanas plāns

Paraugi 200 mm × 200 mm × 25 mm	Izejmateriāls	Saistviela no sausas izejmateriālu masas %	<i>PCM</i> materiāls % no sausas izejmateriālu masas	
Materiālu proporcijas	250 g, no tiem sausa masa – 231,48 g, 8 % – mitrums izejmateriālam 18,52 g	Proporcija (saistviela : ūdens) 55 : 45 UF pulveris 23,15 g; ūdens – 23,15 g	<i>PCM</i> kapsulas/dispersijas attiecība 52 : 48	
H	Kaņepju spaļi 100 %	UF 10 %	–	
W	Priedes skaidas 100 %	UF 10 %	–	
HW	Kaņepju spaļi 50 % un priedes skaidas 50 %	UF 10 %	–	
H_5%PCM	Kaņepju spaļi 100 %	UF 10 %	5 %	Kapsulas 11,57 g Disperģents 10,68 g
			22,26 g dispersijas	
H_10%PCM	Kaņepju spaļi 100 %	UF 10 %	10 %	

Paraugs 200 mm × 200 mm × 25 mm	Izejmateriāls	Saistviela no sausas izejmateriālu masas %	PCM materiāls % no sausas izejmateriālu masas	
			44,52 g dispersijas	Kapsulas 23,15 g Disperģents 21,37 g
H_15%PCM	Kaņepju spaļi 100 %	UF 10 %	15 %	Kapsulas 34,72 g Disperģents 32,05 g
			66,77 g dispersijas	
HW_5%PCM	Kaņepju spaļi 50 % un priedes skaidas 50 %	UF 10 %	5 %	Kapsulas 11,57 g Disperģents 10,68 g
			22,26 g dispersijas	
HW_10%PCM	Kaņepju spaļi 50 % un priedes skaidas 50 %	UF 10 %	10 %	Kapsulas 23,15 g Disperģents 21,37 g
			44,52 g dispersijas	
HW_15%PCM	Kaņepju spaļi 50 % un priedes skaidas 50 %	UF 10 %	15 %	Kapsulas 34,72 g Disperģents 32,05 g
			66,77 g dispersijas	

Pievienojot *PCM* 200 × 200 × 25 mm plātnēm, pie 5 % *PCM* plātnes, aprēķinātā masa mainīsies par 4,2 %; pie 10 % *PCM* 8,5 % un pie 15 % *PCM* mainīsies par 12,7 % masa, proporcionāli tādas pašas procentuālās izmaiņas arī būs blīvumam.

2.4. tabula

Paraugu aprēķinātā masa

200 × 200 × 25 mm	Kopējā masa presējot, g	Aprēķinātā masa pēc ūdens iztvaikošanas, g
Paraugs		
H	292,09	273,15
W	292,09	273,15
HW	292,09	273,15
H_5%PCM	314,34	284,72
H_10%PCM	336,61	296,30
H_15%PCM	358,86	307,87
HW_5%PCM	314,34	284,72
HW_10%PCM	336,61	296,30
HW_15%PCM	358,86	307,87

2.3.2. Plātņu paraugu izgatavošanas tehnoloģija

Plātņu paraugu izgatavošanā izmantota aukstā presēšanas metode (2.7.att.).

1. Lignocelulozes izejmateriāla nosvēršana. Ja paredzēti vairāki slāņi, katru izejmateriāla slāni sver atsevišķā tvertnē.

2. Saistvielas sagatavošana:

- **nesatur PCM**; saistvielas sagatavošanai izmantota masas metode ar līmes pulvera un ūdens attiecību 55 : 45. UF līmes pulveri ar cietinātāju nosver atbilstoši ražotāja

tehniskai datu lapai, atsevišķi nosver ūdens masu, kas ir istabas temperatūrā $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; saistvielas komponentu sajaukšanu veic, izmantojot rokas elektrisko mikseri, ūdenī pakāpeniski piejaucot pulverveida saistvielu; sajaukšanu veic 120 s, līdz iegūta viendabīga saistvielas masa; saistvielas maksimālais atvērtais laiks 20 min, kas ir nepieciešams, lai saistvielu iejauktu lignocelulozes izejmateriālā;

- **satur PCM**; saistvielas sagatavošanas sākuma process ir precīzi tāds pats, kāds ir sagatavošanai bez PCM; pēc 120 s sajaukšanas, līdz iegūta viendabīga saistvielas masa, pievieno PCM 5 %, 10 % vai 15 % apjomā no izejmateriāla masas ar sekojošu papildu maisīšanu 120 s, lai iegūtu viendabīgu konsistenci; kopējais maisīšanas laiks – 240 s.

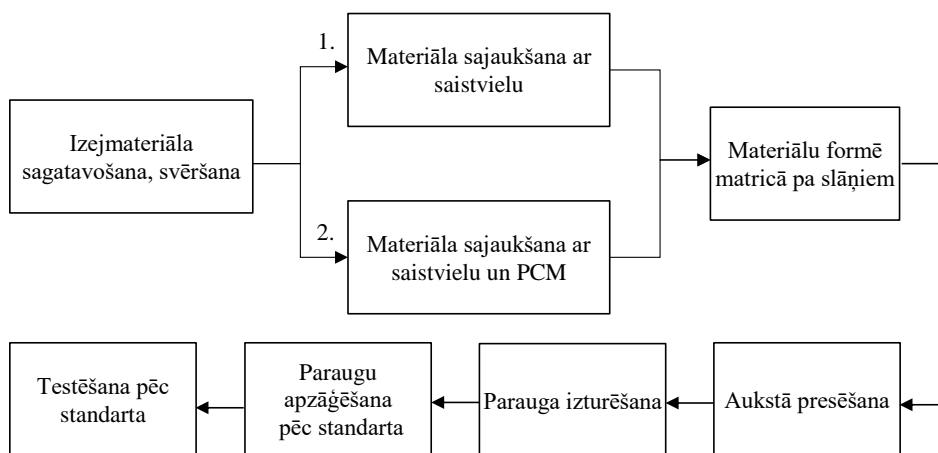
3. Saistvielas sajaukšanu ar izejmateriālu veic sajaukšanas tvertnē, iebērto izejmateriālu maisot ar elektrisko mikseri, lēnām un vienmērīgi pievieno saistvielu. Maisīšanas procesu pēc visas saistvielas pievienošanas veic vēl 120 s.

4. Sajaukto masu formē matricā, vienmērīgi izlīdzinot. Ja ir vairāki slāņi, pirms katra nākamā slāņa ieklāšanas izlīdzina iepriekšējo.

5. Presē plātni matricā pēc noteikta biezuma atbilstoši eksperimenta plānam.

6. Paraugs zem spiediena matricā izturēts vismaz 12 h.

7. Iegūto plātni iztur laboratorijas apstākļos 10–14 dienas, izņemot no matricas, zāgē atbilstoši veicamā testa standartiem.



2.7. att. Plātņu materiālu izgatavošanas tehnoloģijas shēma.

2.3.3. Optimālā saistvielas apjoma noteikšana

Saistvielas apjoms ietekmē materiāla blīvumu, viengabalainību un formas noturību. Lai pārbaudītu materiāla konstruktīvās īpašības un virsmas īpašības, veic pārbaudes ar saistvielas daudzuma apjomu plātņu izgatavošanā, kā arī ņem vērā, ka izmantoti divi dažādi dabīgie lignocelulozes izejmateriāli ar atšķirīgām fizikālajām īpašībām.

Lai iegūtu datus par optimālo saistvielas apjomu plātnē, veic eksperimentu ar lignocelulozes izejmateriālu un saistvielas proporcionālo attiecību noteikšanu. Pirms eksperimenta uzsākšanas izveidots eksperimenta plāns – nemainīgās vērtības: parauga izmērs 200×200 mm, biezums

25 mm, izejmateriālu apjoms 250 g; mainīgās vērtības: UF saistvielas procentuālais apjoms izejmateriāla masā – 14 %, 12 %, 10 %, 8 %, 6 % un 4 % (2.5. tab.) saistvielas un ūdens masas proporcijas.

2.5. tabula

Saistvielas daudzuma pievienošana paraugiem ar 4–14 %

Paraugs 200 × 200 × 25 mm	14 %	12 %	10 %	8 %	6 %	4 %
UF pulveris, g	32,41	27,78	23,15	18,52	13,89	9,26
Ūdens, g	26,52	22,73	18,94	15,15	11,36	7,58

Lai varētu precīzāk novērtēt plātnes izmaiņas, tai žūstot, un noteikt apstrādes uzsākšanas laiku, tad pēc presēšanas paraugi izturēti laboratorijas apstākļos 168 h, tā laikā mitrums nostabilizējās un no plātnes iztvaikojis viss liekais mitrums. Rezultātu iegūšanai plātne pēc presēšanas svērta ik pēc 24 h, lai redzētu mitruma izmaiņas un noteiktu ietekmi uz biezuma izmaiņām.

Izgatavotos paraugus pēc 168 h izturēšanas vērtē, izmantojot organoleptisko metodi – sensoro īpašību novērtējums. Ar šo metodi izvirzot organoleptiskos novērtējuma parametrus tabulā 2.3. novērtē paraugu vizuālo izskatu, konsistenci un izturību. Vērtēšanu veic skalā no 1 līdz 4, kur 4 ir augstākā vērtība. Tabulā 2.6. iekļauti kritēriji, īpašības un vērtības.

2.6. tabula

Organoleptisko novērtējumu kritēriji

Defektu grupa	Defektu kritēriji (1–4, kur 1 ir zemākais vērtējums)			
	1	2	3	4
Formas noturība	Formas nenoturīgs	Formas noturīgs, bet ar nelielu uzspiediena atdalās lielāks frakciju kopums	Formas noturīgs, ar lielāku spiedienu atdalās frakcijas	Stingra forma
Drūp malas/virsmā	Satverot plātņi plaukstās, veidojas izdrupumi	Pie neliela plaukstas uzspiediena drūp	Drūp pie lielāka spiediena/paskrubināšanas	Nedrūp
Geometriskā deformācija	Izliecies	Nedaudz izliecies	Nav izliecies	
Plaisas vai bojājumi sānos/virsmā	Lieli iepļisumi sānā vai virsmā	Nelieli bojājumi	Nav iepļisumu	
Mehāniskā apstrāde Zāģēts; frēzēts; slīpēts	Apstrādājot drūp	Var veikt apstrādi, bet ir izdrupis materiāls	Apstrādājot nelieli izdrupumi	Var kvalitatīvi apstrādāt

2.4. Plātņu materiālu īpašības

Lai noteiktu plātņu fizikālās īpašības, sākotnēji jāveic pamatdatu noteikšana, piemēram, pēc cik ilga laika plātnes iegūst līdzsvara mitrumu un kā aprēķina materiālu paraugu blīvumu.

2.4.1. Plātņu materiāla mitruma noteikšana un salīdzināšana

Balstoties pēc mitruma noteikšanas standarta *LVS EN 322* [164] ūdens mitruma saturs, plātņu materiālos noteikts, izmantojot masas metodi. H grupas plātņu materiāla paraugos, kas izgatavoti izmantojot 250 g kaņepju spaļus un 10 % UF saistvielas ir izmantotas divas noteikšanas metodes un veikts rezultātu salīdzinājums.

Pirmā metode sevī ietver, ka paraugs uzreiz pēc presēšanas nosvērts uz digitālajiem svāriem “*Kern EMB 600-2*” (precizitāte 0,01g), nosakot masu pēc presēšanas un ievietots žāvēšanas skapī uz 24 h 103 ± 2 °C grādos, pēc izņemšanas no žāvēšanas skapja atkārtoti nosvērts. Pēc nosvēršanas izņemot no žāvēšanas skapja, pirmās 5 h paraugs svērts ik pēc 60 min, fiksējot masas izmaiņas un tad 14 dienas vērotas masas izmaiņas fiksējot masu katru dienu vienā un tajā pašā laikā.

Otrā metode sevī ietver, ka paraugs uzreiz pēc presēšanas nosvērts un turēts laboratorijas apstākļos 14 dienas novērojot masas izmaiņas sverot uz digitālajiem svāriem “*Kern EMB 600-2*” (precizitāte 0,01 g) katru dienu vienā un tajā pašā laikā.

Eksperimenta laikā laboratorijas apstākļi fiksēti izmantojot temperatūras un mitruma datu fiksēšanas iekārtu “*Testo 184H1*” iegūstot telpas vidējo temperatūru 22,7 °C un vidējo mitrumu 56,5 %.

Pēc 14 dienu termiņa abu paraugu masas fiksē, tos nosverot, un liek atkārtoti žāvēšanas skapī uz 24 h 103 ± 2 °C grādos. Pēc noteiktā laika tos atkārtoti nosver un pēc paraugu masu izmaiņām aprēķina mitruma izmaiņas izmantojot vienādojumu 1.1. un salīdzina mitruma izmaiņas rezultātus abiem paraugiem.

2.4.2. Materiālu paraugu blīvuma noteikšana

Plātņu materiālu blīvums noteikts atbilstoši standartam *LVS EN 323* [165]. No presētās plātnes izzāģēti paraugi 50×50 mm un nosvērti uz svāriem “*Kern EMB 600-2*” ar precizitāti 0,01 g. Blīvums noteikts telpā ar temperatūru 23 ± 2 °C un 50 ± 5 % mitrumu. Parauga ārējos izmērus un biezumu nosaka ar digitālo bīdmēru “*KS Tools 300.0532*” ar precizitāti 0,01 mm. Lai precīzāk paraugiem noteiktu biezumu, mērījumus veic četrās vietās (2.8. att.) un aprēķina vidējo plātnes biezumu. Ņemot par pamatu iegūtos mērījumu rezultātus, plātnes blīvumu iespējams noteikt pēc vienādojuma 1.2.

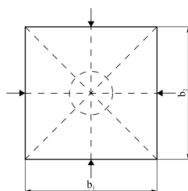
$$\rho_w = m_w / (a_w \times b_w \times l_w) = m_w / v_w \quad , \quad (1.2.)$$

kur ρ_w – plātnes blīvums pie standarta mitruma, kg/m^3 ;

m_w – plātnes parauga masa, kg;

v_w – plātnes parauga tilpums, m^3 ;

a_w, b_w, l_w – parauga izmēri platumā, biezumā, garumā, m.



2.8. att. Precīza parauga biezuma noteikšanas shēma [165].

2.4.3. Materiāla ūdens uzsūktspējas un uzbriešanas novērtēšana

Par pamatu ņemot *LVS EN 317* un *LVS EN ISO 29767* standartus [166–167] izstrādāta apvienota metode materiāla ūdens uzsūktspējas un briešanas noteikšanai. Atbilstoši standartu testa metožu kopumam, katram paraugu struktūras veidam izgatavo deviņus paraugus ar dimensijām 50 × 50 mm. Katru paraugu sākotnēji nosver un nosaka tā biezumu izmantojot digitālo bīdmēru (ar precizitāti 0,01 mm). Paraugus iegremdē iepriekš sagatavotos traukos ar ūdeni. Materiāla ūdens uzsūktspējas tests norit 24 h. Paraugi periodiski tiek ņemti ārā no ūdens, nosusināti uz papīra salvetes, noteikta parauga masa, izmantojot digitālos svarus “*Kern EMB 600-2*” (ar precizitāti 0,01 g). Pēc masas noteikšanas paraugam nosaka arī parauga biezuma izmaiņas ar digitālo bīdmēru “*KS Tools 300.0532*” (ar precizitāti 0,01 mm), nosakot materiāla uzbriešanu. Mērījumi pēc iegremdēšanas ūdenī tiek veikti pirmajā stundā ik pēc 15 min – 15, 30, 45, 60 min., tad pie 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 24 h no iegremdēšanas brīža.

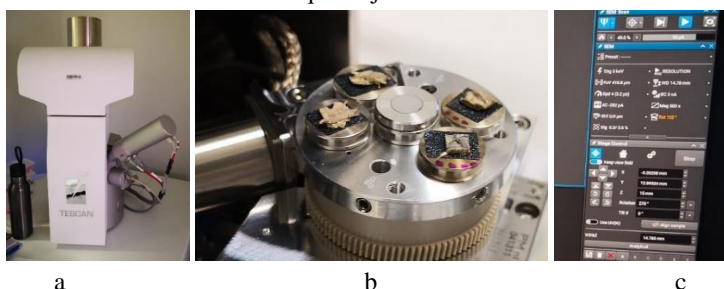
Testa paraugi sagatavoti telpā ar relatīvo mitrumu $50 \pm 5 \%$ un gaisa temperatūru $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.4.4. Skenējošā elektronu mikroskopija

Izmantojot SEM iekārtu “*Tescan Vega*” veikta skenējoša elektronu mikroskopijas (SEM) paraugu analīze H paraugiem, kuru masā ir 10 % mikroiekapsulēts fāzmaiņu materiāls. Paraugus sagatavo pēc iekārtas noteiktajiem parametriem 4 × 4 mm izmēros, ievērojot paraugu izgatavošanā maksimālu virsmas gludumu. Paraugus fiksē ar speciālu līmi uz parauga turētāja (2.9. a att.). Paraugiem uzklāj “*16 pulsi Carbon*” oglekļa pārklājumu, lai vadītu elektronus. No uzklāšanas precizitātes un vienmērības atkarīga attēla kvalitāte tumšumā – gaišumā. Pārklājumu uznes ar iekārtu paraugu pārklāšanai ar oglekļa pārklājumu “*LEICA EM ACE 200*” (2.9. b att.).



2.9. att. a – uz pamatnēm pielīmēti paraugi; b – iekārta paraugu pārklāšanai ar oglekļa pārklājumu.



2.10. att. SEM iekārtā “*Tescan Vega*”: a – iekārta; b – paraugi; c – programmatūra.

Pēc paraugu sagatavošanas tos liek SEM iekārtā “*Tescan Vega*”, vienlaikus var ievietot sešus paraugus. Tālāk veic darbību no datora ar programmatūru “*TESCAN's Essence™*”, veicot vakuumsūkņēšanu kamerai, kurā atrodas paraugi (2.10. att.). Ar skenējošo elektronu mikroskopu (SEM) uzņemtajām mikrofotogrāfijām veic analīzi, lai noteiktu izejmateriāla daļiņu izkārtojumu, saistvielas klātesamību un mikroiekapsulētā fāzmaiņu materiāla izvietojumu plātnes struktūrā.

2.5. Izolācijas plātnes ekspluatācijas īpašības

Lai plātņu īpašību raksturojošos datus varētu salīdzināt ar līdzīgu materiālu pētījumiem un tirgū pieejamām plātnēm, sākotnēji jāveic dažādi testi, piemēram, jānosaka termiskās, akustiskās un mehāniskās īpašības.

2.5.1. Termiskās īpašības

Izolācijas materiālu viens no svarīgākajiem rādītājiem ir siltuma īpašību rādītāji. Lai tos noteiktu, veic testus paraugiem ar “*HFM 446 Lambda Series – NETZSCH Analyzing & Testing*” iekārtu (2.11. att.).



2.11. att. Siltumu testu noteikšana.

Tabulā 2.7. apkopoti paraugu apzīmējumi un paraugu izejas dati – parauga marķējums, (sastāvs), biezums, masa un blīvums. Izejas datus ir svarīgi definēt pirms testēšanas, lai iegūtu rezultātus proporcionāli izejas datiem.

2.7. tabula

Paraugu dati termisko īpašību noteikšanai

Paraugs	Biezums, mm	Masa, g	Blīvums, kg/m ³
12_HW_5%PCM	25,30	287	284
13_HW_5%PCM	25,99	284	273
18_HW_5%PCM	24,15	286	296
HW_5%PCM vidējais	25,15	286	284
HW_5%PCM ±		2,81	21,13
14_HW_10%PCM	24,88	300	301
15_HW_10%PCM	24,35	303	311
17_HW_10%PCM	25,01	297	297
HW_10%PCM vidējais	24,75	300	303
HW_10%PCM ±		5,51	13,25

Paraugs	Biezums, mm	Masa, g	Blīvums, kg/m ³
16_HW_15%PCM	24,41	310	318
10_HW_15%PCM	24,46	309	316
11_HW_15%PCM	24,47	308	315
HW_15%PCM vidējais	24,45	309,0	316
HW_15%PCM ±		1,84	2,81
2_H_5%PCM	26,54	286	269
3_H_5%PCM	26,21	283	270
9_H_5%PCM	25,34	285	281
H_5%PCM vidējais	26,03	284,7	273
H_5%PCM ±		2,81	12,23
1_H_10%PCM	24,66	294	298
5_H_10%PCM	25,25	296	293
7_H_10%PCM	25,02	299	299
H_10%PCM vidējais	24,98	296,3	297
H_10%PCM ±		4,62	5,91
6_H_15%PCM	24,70	310	314
8_H_15%PCM	24,89	308	309
4_H_15%PCM	25,51	306	300
H_15%PCM vidējais	25,03	308,0	308
H_15%PCM ±		3,67	13,03

2.5.1.1. Siltumvadītspēja

Vissvarīgākā īpašība, kas raksturo izolācijas materiālu efektivitāti, ir siltuma vadītspēja λ W/m·K, to nosaka pēc *LVS ISO 8301* standarta [168]. Pēc standarta un iekārtas prasībām testēšanai sagatavo 200 × 200 mm izmēra paraugus un tos ievieto iekārtā starp divām horizontālām plātēm, kas ir divi kalibrēti siltuma plūsmas devēji abās parauga pusēs: parauga vidējā temperatūra pret iestatīto vēlamo testēšanas temperatūras starpību DT (K – kelvini), siltuma plūsmu Q (W – vati), kas plūst cauri paraugam ar attiecīgo biezumu L (m) un virsmas laukumu A (m²). Kad tiek sasniegts termiskais līdzsvars, tiek iegūti rezultāti. Testa laikā iestatītā temperatūra: QL=apakšējā temperatūra (zem plātnes), °C=20 °C; QU=augšējā temperatūra (virs plātnes), °C=0 °C.

Siltuma vadītspējas noteikšanai izmanto vienādojumu:

$$\lambda = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta T^{\circ}}, \quad (1.3.)$$

kur λ – siltumvadītspēja;

Q – siltuma plūsma;

A – virsmas laukums;

L – parauga biezums;

ΔT° – temperatūras starpība parauga abās pusēs.

Siltumvadītspējas izmaiņas var novērtēt, veicot mērījumus ar dažādām virsmas temperatūrām.

2.5.1.2. Siltumietilpība

Būtisks faktors, kas raksturo materiālu termisko inerci, ir īpatnējā siltumietilpība, kuru novērtē pēc materiāla blīvuma un siltumvadītspējas noteikšanas. Materiālu siltumietilpība atspoguļo materiāla spēju uzkrāt siltumu, pakļaujoties noteiktai temperatūras maiņai. Uz iekārtas programmatūras veikti siltumietilpības mērījumi C_p (J/(kg·K)), izmantojot dinamiskās siltuma plūsmas mērījuma metodi (DHFMA). Diferenciālas skenējošās kalorimetrijas (DSK) metode ir metode, ko lieto maza un viendabīga izmēra fāžu maiņas materiālu paraugiem un tā nav piemērota ražošanas mēroga produktiem ar dažādu sastāvu. DHFMA mērījumos izmantotais princips ir ātra temperatūras paaugstināšana ar siltuma plūsmas instrumenta radīto dinamisko termiskās informācijas analīzi. Fāzes pārejas procesā entalpijas izmaiņas ir vienādas ar absorbēto siltumu. Īpatnējo siltuma ietilpību izsaka kā materiāla masas spēju uzkrāt sevī siltumu, kas izteikta J/kg °C. Izolācijas materiāla siltumietilpība noteikta pēc LVS ISO 8302 standarta [168], kur atbilstoši metodei sagatavoti paraugi izmērā 200 × 200 × 25 mm.

Pieņemot lineāru attiecību starp entalpiju un temperatūru, siltumietilpību var izteikt ar vienādojumu:

$$c_p = \frac{dH}{dT} \approx \frac{\Delta H}{\Delta T} = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (1.4.)$$

kur C_p – siltumietilpība;

H – entalpija;

Q – absorbētais siltums;

T – temperatūra.

Testēšanas procesā PCM (fāzmaiņas materiālu) saturošā parauga temperatūra tiek paaugstināta ar 10 °C intervālu, mērot iegūto siltuma plūsmu paraugā, nosakot siltuma ietilpības vidējo temperatūru izmantojot vienādojumu 1.4. Sākumā augšējās un apakšējās sildīšanas/dzesēšanas HFMA plāksnes tiek turētas sākotnējā temperatūrā, nodrošinot vienmērīgu temperatūru visā paraugā. Nākamajā posmā abās plāksnēs tiek ieviestas temperatūras izmaiņas, un siltuma plūsmas caur plāksnēm tiek mērītas līdz tiek sasniegts līdzsvara stāvoklis izvēlētajā temperatūrā. Tiek aprēķinātas entalpijas (vai absorbētā siltuma Q) izmaiņas, integrējot siltuma plūsmas ātruma mērījumus testēšanas laikā.

Pamatojoties uz integrēto Q maksimumu, siltumietilpību var noteikt pie vidējās temperatūras 35 °C kamerai un ievietotajam paraugam. Reģistrētais elektriskais signāls atņemot absorbētās enerģijas daudzumu, sildot tukšu kameru (vērtību, ko iegūst veicot kameras kalibrāciju pirms testa veikšanas) uzrāda siltumietilpības vērtību analizētajam paraugam saskaņā ar vienādojumu:

$$c_p = \frac{N_\lambda \cdot A \cdot (Q - Q_E)}{m \cdot \Delta T}, \quad (1.5.)$$

kur C_p – siltumietilpība;

Q – absorbētā enerģija ar paraugu;

Q_E – absorbētais enerģijas daudzums kamerā bez parauga;

N_λ – siltuma plūsmas sensora kalibrēšanas koeficients;

A – parauga laukums ar masu m.

Fāzmaiņu materiāla vissvarīgākā termofizikālā īpašība ir latentais siltums vai fāzes pāreju siltums, kas kvantitatīvi raksturo spēju uzkrāt vai atbrīvot enerģijas daudzumus fāzes maiņas procesa laikā. Siltuma pievienošana paraugam maina to no cietas vielas uz šķidrumu, bet, ja paraugs izdala siltumu, fāze var mainīties pretējā virzienā. Fāzes maiņas laikā enerģija tiek pievienota vai atņemta no sistēmas, bet temperatūra šī procesa laikā nemainās. Temperatūra mainīsies tikai tad, kad fāzes maiņa būs pilnībā pabeigta. Temperatūru, kurā notiek fāžu pārejas, sauc par kušanas temperatūru, un šī temperatūra ir tāda pati kā sasalšanas temperatūra. Siltums Q (W), kas nepieciešams, lai mainītu parauga masu m (kg) fāzi, var izteikt ar vienādojumu:

$$Q = mL \quad (1.6.)$$

kur: mL ir kušanas latentais siltums (J/kg) (siltuma daudzums, kas nepieciešams, lai izraisītu fāžu maiņu starp cietu un šķidru).

DSK metodes izmantošana ir nepieciešama visaptverošai kušanas procesa analīzei, precīzi nosakot temperatūru, kurā *PCM* sāk kušanu un kurā kušanas process beidzas, tādējādi iegūstot fāzes maiņas siltumu kā temperatūras funkciju, kā arī iespējamo histerēzes efektu izpēti. Lai noteiktu latentu siltumu, aptuveni kā integrālo vērtību, lielajā temperatūras diapazonā pilnīgam fāzes maiņas procesam. Aptuveni, bet ātru un vienkāršu latentā siltuma L aprēķinu var veikt, analizējot siltuma plūsmu no C_p mērījumiem paraugam ar *PCM* piejaukumu, veicot mērījumus temperatūrās, kas ir zemākas un augstākas par kušanas temperatūru (kur nav gaidāmas fāžu izmaiņas), kā arī ap kušanas temperatūru. Aptuveno fāžu maiņas siltuma vērtību paraugam ar pievienotu *PCM* var novērtēt kā siltuma plūsmas ΔQ pieaugumu temperatūras diapazonā, kas ietver fāzes izmaiņas, salīdzinot ar lineāro regresiju

Lietojot *PCM* kopā ar būvmateriāliem, ir svarīgi, lai to kušanas temperatūra būtu saderīga ar telpas darba temperatūru, parasti no 22 līdz 28 °C. Veiktajos eksperimentos sildīšana tika nodrošināta trīs diapazonos: no 10 līdz 20 °C, no 20 līdz 30 °C (šajā diapazonā ietilpst fāzes maiņa) un no 30 līdz 40 °C. Enerģijas daudzums, kas nepieciešams parauga karsēšanai no 20 līdz 30 °C, ir lielāks nekā lineārajai interpolācijai, kas nozīmē, ka tas ietver arī fāžu pāreju siltumu. Ja ir zināma pievienotā *PCM* masa, kā arī laika un temperatūras starpība, latentu siltumu var aprēķināt, izmantojot vienādojumu 1.6.

2.5.1.3. Siltumpretestība

Siltumpretestību aprēķina pēc vienādojuma 1.7. un izsaka no iegūtajiem siltumvadītspējas datiem.

Aprēķina vienādojums ir

$$R = d/\lambda \quad (1.7.)$$

kur R – siltumpretestība, m^2K/W ;

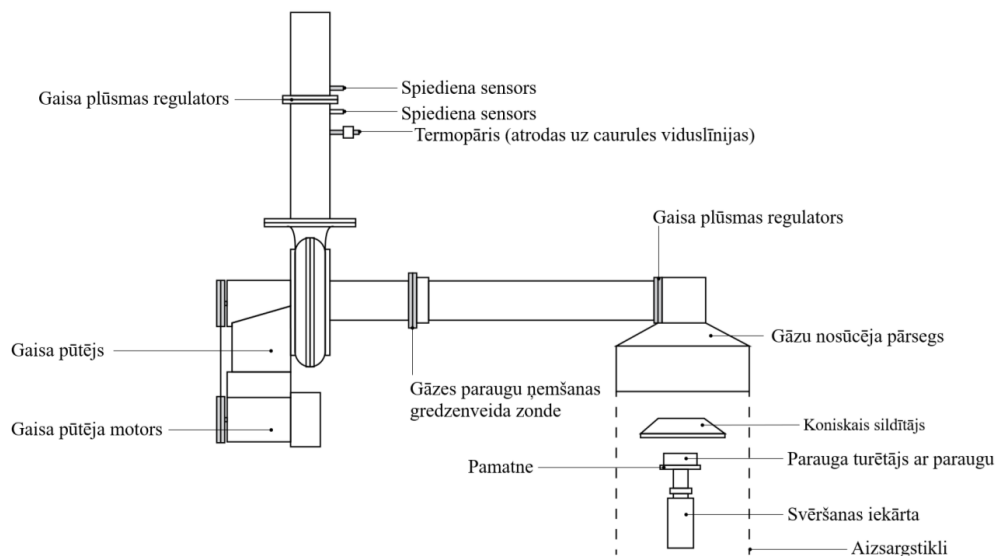
d – materiāla biezums, m;

λ – siltumvadītspējas koeficients, $W/m \cdot K$.

2.5.2. Fizikāli ķīmiskās īpašības

Svarīgi ir zināt materiāla reakciju uz uguni un *PCM* ietekmi uz rezultātiem; tāpēc veikts tests ugunsreakcijas noteikšanai kaņepju spaļu paraugiem un kaņepju spaļu paraugiem ar 10 % *PCM* piejaukumu.

Testus veic, izmantojot konisko kalorimetru “*GD-ISO5660*”. Iekārta sastāv no parauga novietošanas un svēršanas statīva, koniska sildelementa, ar dzirksteles aizdedzināšanas iekārtu, sadegšanas gāzu nosūkšanas sistēmas un mērinstrumentiem (2.12. att.).



2.12. att. Koniskā kalorimetra shematiskā uzbūve [170].

Koniskais kalorimetrs ir ierīce, ko izmanto, lai pētītu dažādu materiālu nelielu paraugu izturību pret aizdegšanos, un ugunsreakciju. Šī ierīce ļauj parauga virsmu pakļaut dažādas jaudas siltuma starojumam.

Testa veikšanai ir noteikts materiālu grupām vidējais materiāla biezums, piefiksēta sākotnējā masa, apkārtējais spiediens, aprēķināts virsmas laukums, noteikta siltuma plūsma un attālums no parauga virsmas līdz siltuma starojuma avotam (2.8. tab.).

2.8. tabula

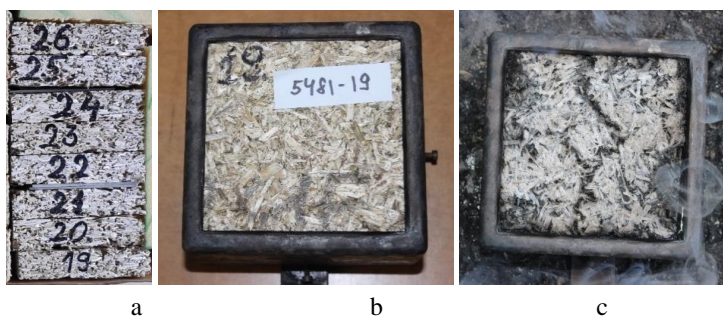
Paraugu dati ugunsreakcijas testam

Paraugu grupu vidējie dati	Materiālu biezums, mm	Sākotnējā masa, g	Apkārtējais spiediens, kPa	Virsmas laukums	E, MJ/kg	Siltuma plūsma, kW/m ²	Attālums no parauga virsmas līdz siltuma starojuma avotam, mm
H	22,03	69,00	102,20	88,4	13,1	50	25
H_PCM	23,65	66,65	102,154				

2.5.2.1. Ugunsreakcijas tests

Degšana ir sarežģīts ķīmiskās oksidācijas process, ko ir grūti prognozēt faktiskos ugunsgrēka apstākļos [169]. Standarts *LVS ISO 5660-1:2015/A1:2021* [170] nosaka metodi paraugu siltuma izdalīšanās ātruma un dinamiskās dūmu veidošanās ātruma novērtēšanai, paraugiem, pakļauti kontrolētam siltuma starojuma līmenim ar ārēju aizdedzi. Siltuma izdalīšanās ātrumu un daudzumu nosaka, mērot skābekļa patēriņu, kas iegūts, nosakot skābekļa koncentrāciju, sadegšanas gāzēs, un to plūsmas ātrumu. Kā arī šajā testā nosaka laiku līdz parauga aizdegšanās brīdim.

Dinamisko dūmu veidošanās ātrumu aprēķina, mērot lāzera gaismas staru vājinājumu sadegšanas gāzu plūsmā. Dūmu veidošanās tiek reģistrēta visā testa laikā neatkarīgi no tā, vai paraugs ir aizdedzies, vai nē. Papildus tam, visā testa laikā tiek mērīts paraugu masas zudums.



2.13. att.: a – sagatavoti paraugi, b – paraugs rāmī, c – paraugs pēc testa.

Koniskajā kalorimetrā ugunsreakcijas testus var veikt 25–75 kW/m² siltuma starojuma robežās, atbilstoši standarta *LVS ISO 5660-1* metodikai. Pētījumā lietota 50 kW/m² siltuma jauda un sagatavotie paraugi 100 × 100 mm (2.13. att.).

Testa sākumā turētājs ar paraugu novietots uz testēšanas pamatnes, kas spējīga nepārtraukti fiksēt parauga masu testēšanas laikā. Virs parauga virsmas novietota aizdedzināšanas iekārta, kas ar elektriskās dzirksteles palīdzību aizdedzina sakarsētā parauga virsmu. Uz parauga virsmu novadīts nepieciešamais siltuma starojums. Dzirksteli noņem pēc parauga aizdegšanās un ja paraugs nodziest, tiek fiksēta parauga nodzišana, bet dzirkstele atkārtoti netiek uzlikta līdz pat testa beigām. Ja paraugs atkārtoti aizdegās siltuma starojuma dēļ, tiek fiksēta otrā, trešā utt. parauga aizdegšanās. Tiek fiksēts parauga aizdegšanās laiks.

Testa laikā tiek mērīts skābekļa daudzums sadegšanas gāzēs, un parauga masa ar 5 s intervālu. Iekārtai ir fiksēts gāzu nosūkšanas ātrums $0,024 \pm 0,002$ m³/s. Tiek mērīts arī dūmu izdalīšanās daudzums, mērot lāzera stara pavājināšanos, tam spīdot caur sadegšanas gāzēm.

Darbā paraugu uzvedību analizē 10 min testa laika, pirms tam ievācot 1 min ar bāzes datiem.

Aprēķinot degšanas procesā radušos, siltuma daudzumu pieņem, ka sadedzinot 1 kg skābekļa atbrīvojas $13,1 \times 10^3$ kJ enerģijas. Testa rezultāti attiecināmi tikai uz paraugu izturēšanos īpašos testa apstākļos. Tos nevar lietot kā vienīgo kritēriju, lai novērtētu izmantojamā produkta iespējamo ugunsbīstamību.

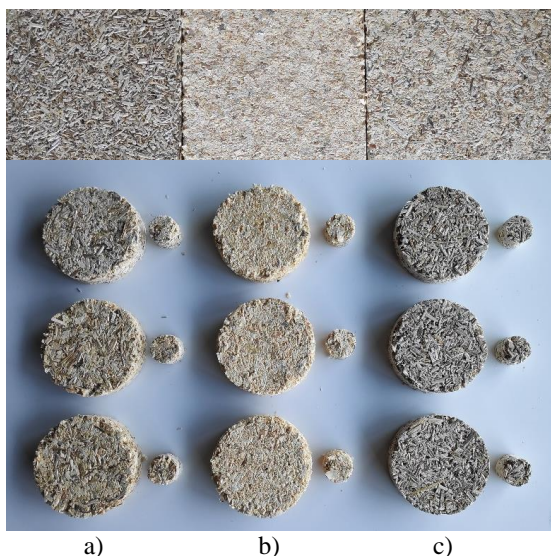
Datu apstrādei izmantotas statistiskās apstrādes metodes: aprakstošā statistika un datu savstarpējā salīdzināšana; korelācijas un regresijas analīzi.

Tā kā ugunsreakcijas pētījumu paraugkopas ir mazas, tad faktoru ietekmes būtiskuma izvērtēšana ar standartizētām datu statistiskās apstrādes metodēm. Līdz ar to pētījumā izmantota tuvināta faktoru būtiskuma izvērtēšanas metode. Ugunsreakciju ietekmējošo faktoru uzskata par būtisku, ja faktora vidējā vērtība ir ārpus vienas standartnovirzes robežas parametram, kurus salīdzina.

2.5.3. Akustiskās īpašības

Izolācijas materiāls bieži nodrošina telpā arī patīkamu atrašanos tajā, palīdzot troksni slāpēt. Izgatavotas trīs paraugu grupas – H, W, HW, kuriem veikta akustisko īpašību noteikšana (2.14. att.).

Skaņas absorbcijas mērījumi veikti ar akustiskās impedances un pārvades zuduma mērījumu komplektu “*Brüel & Kjaer Type 4206*”. Paraugu izmēri Ø 29 mm un Ø 100 mm ar precizitāti 0,5 mm, mērīts frekvenču diapazonā no 50–6300Hz.



2.14. att. Skaņas absorbcijas paraugi (no kreisās: a – HW; b – W; c – H).

2.9. tabula

Paraugu dati skaņas absorbcijas noteikšanai

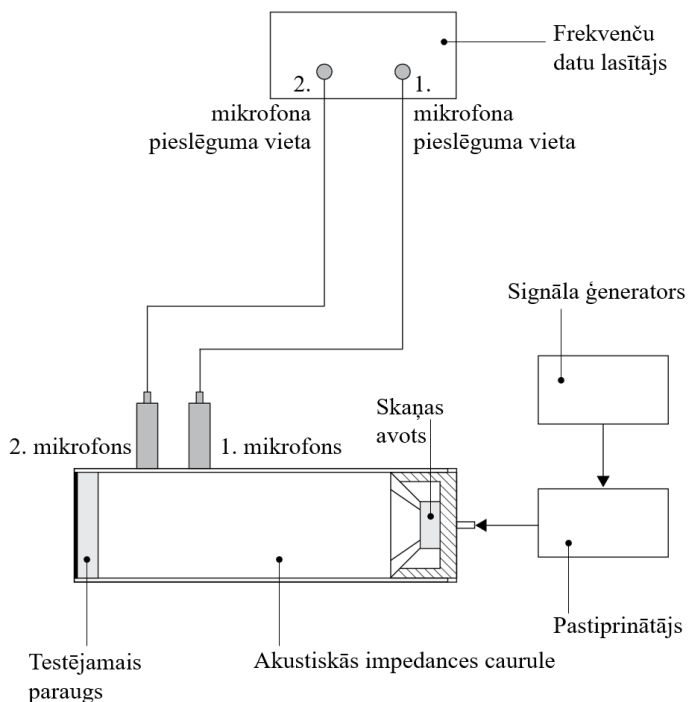
Parauga nosaukums	Paraugs	Biezums, mm	Masa, g	Diametrs, mm	Blīvums, kg/m ³
SA_HW_A1	A	25,5	48,69	100,0	243
	1	25,5	3,23	28,5	199
SA_HW_B2	B	24,0	48,75	100,0	259
	2	24,0	3,31	28,5	216

Parauga nosaukums	Paraugs	Biezums, mm	Masa, g	Diametrs, mm	Blīvums, kg/m ³
SA_HW_C3	C	24,0	49,71	100,0	264
	3	24,0	3,16	28,5	206
SA_HW 100 mm			Vidējais paraugu blīvums		255
			± kg/m ³		19,72
SA_HW 28,5 mm			Vidējais paraugu blīvums		207
			± kg/m ³		16,23
SA_W_D4	D	24,0	50,17	100,0	266
	4	24,0	3,48	28,0	236
SA_W_E5	E	25,5	49,73	100,0	248
	5	25,5	3,02	28,0	192
SA_W_F6	F	25,5	52,34	100,0	261
	6	25,5	3,09	28,0	197
SA_W 100 mm			Vidējais paraugu blīvums		259
			± kg/m ³		16,97
SA_W 28,5 mm			Vidējais paraugu blīvums		208
			± kg/m ³		43,59
SA_H_G7	G	26,0	50,89	100,0	249
	7	26,0	3,82	28,5	230
SA_H_H8	H	26,0	48,67	100,0	238
	8	26,0	3,90	28,5	235
SA_H_I9	I	26,0	52,28	100,0	256
	9	26,0	3,38	28,5	204
SA_H 100 mm			Vidējais paraugu blīvums		248
			± kg/m ³		16,38
SA_H 28,5 mm			Vidējais paraugu blīvums		223
			± kg/m ³		31,01

Akustiskās impedances un pārvades zuduma mērījuma komplekts sastāv no akustiskās impedances caurules, 2 mikrofoniem, paraugu turētāja un tas viss savienots ar signāla ģeneratoru, pastiprinātāju un šo visu nolasa frekvenču datu lasītājs (2.15. un 2.16. att.).



2.15. att. Skaņas absorbcijas testa veikšana.



2.16. att. Akustiskās impedances un pārvades zuduma mērījuma komplekta sastāvdaļas [171].

2.5.3.1. Skaņas absorbcijas koeficienta noteikšana

Atbilstoši standartam *LVS EN ISO 10534-1* [171] noteikts skaņas absorbcijas koeficients.

Atbilstoši caurules diametram, sagatavoti cilindveida paraugi ar diametru 28,5 mm un 99,5 mm ar 0,5 mm pielaidi (2.14. att.), ņemot vērā, ka paraugi ir salīdzinoši cietas struktūras un tos nevar deformēt. Paraugi marķēti (2.9. tab.) atbilstoši trīs paraugu grupām ar apzīmējumu H, W un HW un veikts tests katrai grupai novērtējot sešus paraugus. Paraugus mēra divos piegājienos, pirmajā daļā 100 mm paraugus mēra diapazonā no 500 līdz 1600 Hz un 28,5 mm paraugus mēra 1600–6300 Hz, tad šos rezultātus apvieno vienā līknē, izmantojot datorprogrammu “*Pulse*”, lai iegūtu visu līkni 500–6300 Hz frekvenču spektram.

Mērījumus apstrādā datorprogramma “*Pulse*”, kurā arī fiksēti mērīšanas un vides dati. Laboratorijas parametri: Atmosfēras spiediens 1013,25 hPa; temperatūra 22 °C, relatīvais mitrums 50 % Skaņas ātrums: 344,41 m/s; Gaisa blīvums: 1194 kg/m³; Gaisa raksturīgā pretestība: 411,2 Pa/(m/s). Atstatums starp 1. mikrofona un otro 35 mm, attālums starp mikrofona, kas atrodas tuvāk skaņas avotam un testa paraugu 115 mm. Skaņas absorbcijas mērījumus veic paraugus ievietojot impedances caurulē līdz atdurei (2.15. att.), kur skaļrunis izstaro precīzu kvantitatīvi izteiktu skaņu, mikrofoni fiksē skaņas spiediena līmeni. Skaņas absorbcijas koeficients mērīts 1/3 oktāvas joslē frekvenču diapazonā no 50–6300 Hz, fiksējot datorprogrammā visas vērtības, bet pie aprēķiniem tiek ņemtas vērtības pie 50, 250, 500, 1000, 2000, 4000 un 6300 Hz atzīmēm. Skaņas vilni pret paraugiem raida perpendikulāri, kur 1. mikrofons uztver skaņas intensitāti, 2. mikrofons fiksē skaņas daudzumu, kuru atstaro.

Skaņas absorbcijas koeficientu nosaka pēc sakarības:

$$\alpha = 1 - (R)^2, \quad (1.8.)$$

kur α – normāla krišanas leņķa skaņas absorbcijas koeficients lineārā frekvenču skalā;
 R – skaņas atstarošanas koeficients.

Iegūtie rezultāti kalpo kā kritērijs, lai noteiktu materiāla lietojumu atbilstoši Būvnormatīvā LBN 016-11 “Būvakustika” skaņas izolācijas vai telpu akustikas deklarētām robežvērtībām [172].

2.5.3.2. Skaņas absorbcijas – NRC koeficienta aprēķins

Skaņas absorbcijas koeficients (NRC) definē kā materiāls absorbē atstaroto skaņas enerģiju, kas noteikts atbilstoši *LVS EN ISO 11654* standartam [173]. Skaņas absorbcija var svārstīties no 0–, kur 0 vērtība apzīmē, ka neabsorbē skaņu nemaz jeb visu skaņu atstaro, bet 1 absorbē visu skaņas enerģiju, (2.17.att.). Koeficientu var izteikt procentos, reizinot iegūto vērtību ar 100. Katrai parauga grupai noteikta vidējā skaņas absorbcijas līmeņa vērtība, iegūstot NRC (trokšņa mazināšanas koeficients). Vidējais skaņas absorbcijas koeficients aprēķināts pēc lineāras sakarības, kā vidējā aritmētiskā vērtība no četrām vērtībā 50–6300 Hz diapazonā.

Vidējais skaņas absorbcijas koeficients aprēķināts pēc sakarības:

$$\alpha_w = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) / \eta, \quad (1.9.)$$

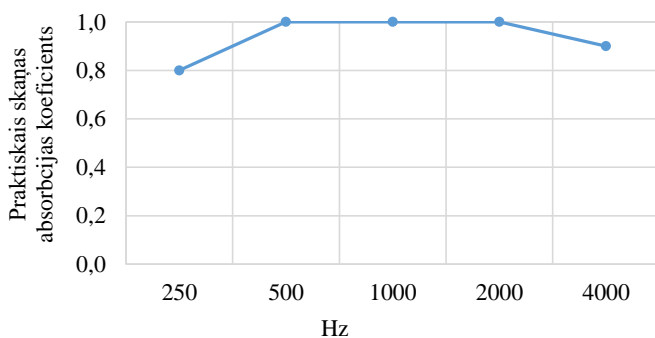
kur α_w – vidējais skaņas absorbcijas koeficients, α_i ;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – skaņas absorbcijas koeficientu vērtības pie frekvenču joslām;

attiecīgi – 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz;

η – vērtību skaits.

Vidējo vērtību aprēķina līdz otrajam ciparam aiz komata un noapaļo ar 0,05 soli un maksimizē līdz $\alpha_i=1$, ja noapaļotās vidējās vērtības $>1,00$.



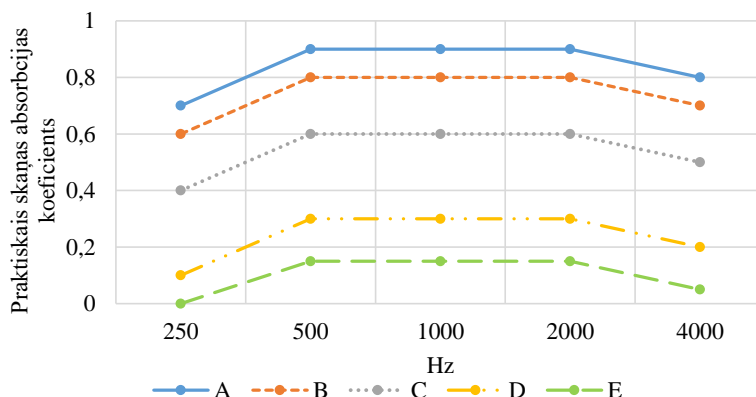
2.17. att. Atsauces līkne svērtā skaņas absorbcijas koeficienta novērtēšanai [173].

2.5.3.3. Skaņas absorbcijas klases noteikšana

Skaņas absorbcijas klase noteikta atbilstoši *LVS EN ISO 11654* standartā [173] aprakstītajai metodei un materiāla absorbcijas īpašības novērtētas pēc standartā dotās diagrammas (2.18. att.). Absorbcijas līmenis tiek klasificēts klasēs (2.10. tab.) no A līdz E, kur A ir augstākā un E zemākā absorbcijas klase, kur $\alpha_w=1$ ir 100 % absorbents. Testa rezultāts ir absorbcijas līkne, kas nosaka rezultātu katrai testā fiksētajai frekvencei.

2.10. tabula

Skaņas absorbcijas klase	α_w
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,6; 0,65; 0,7; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Nav klasificēta	0,10; 0,05; 0,00



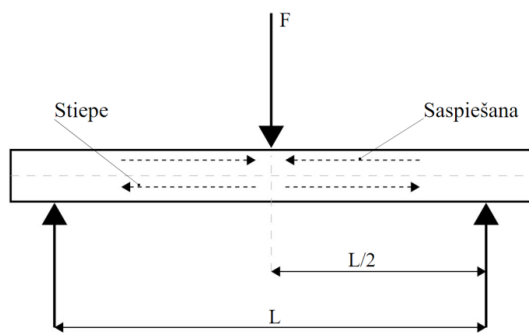
2.18. att. Atsauces līkņu, kas ierobežo dažādas skaņas absorbcijas klases, ilustrācija [173].

2.5.4. Mehāniskās īpašības

Paraugiem veikti mehānisko īpašību indikatīvie mērījumi, lai noskaidrotu plātņu iespējas stiprināt ar skrūvēm un materiāla piemērotību kā slodzi pašnesošam elementam.

2.5.4.1. Robežstiprība liecē

Materiāla lieces stiprība noteikta par pamatu ņemot divus trīspunktu lieces standartus – *LVS EN 310* un *LVS EN 12089* [174–175]. Lieces izturības noteikšanai izmanto universālo testēšanas iekārtu *FORMTEST UBP 86/200*, slogojot parauga centru, kas balstīts divos punktos (2.19. att.).



2.19. att. Trīs punktu lieces testēšanas princips.

Testam sagatavo 5 taisnstūra paraugus no katras paraugu grupas, izmēros $200 \times 50 \times 25$ mm (2.20. att.). Katra parauga platuma un biezuma mērījumi veikti saskaņā ar *LVS EN 325* standartu [176]; biezums – diagonāļu krustpunktā un platuma – garuma vidusdaļā.



a

b

2.20. att.: a – paraugi, b – paraugu trīs punktu lieces tests.

Testa paraugus novieto plakaniski uz diviem balstiem un garenvirziena ass ir taisnā leņķī pret balsta asi ar centra punktu zem slogojuma. Uz paraugu veic slogojumu ar šķērsgalvu, kuras uzvirzes ātrums 10 ± 1 mm/min. Slogojuma mērījums veikts parauga vidū ar precizitāti līdz 0,01 kN. Lai noteiktu lieces izturību, slogojuma rezultāti jāievieto 1.10 vienādojumā un jāaprēķina.

$$\sigma_b = \frac{3F_{max}l_1}{2bd^2} \quad (1.10.)$$

kur σ_b – trīs punktu lieces izturība, MPa;

F_{max} – maksimālais spēks, N;

l_1 – attālums starp balstu centriem, mm;

b – parauga platums, mm;

d – parauga biezums, mm.

2.5.4.2. Pretestības noteikšana skrūvju aksiālai izraušanai

Skrūvju noturības tests ir nepieciešams, lai varētu nodefinēt materiālu lietošanai, to stiprinot pie cita materiāla. Metodika izstrādāta pēc *LVS EN 320* standarta [177].

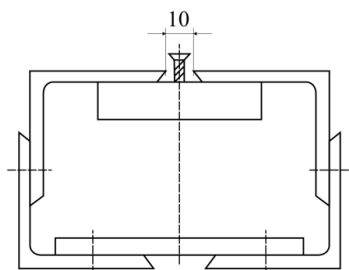
Testam sagatavo 10 paraugus no katras struktūru grupas, 50×50 mm izmērā. Katram paraugam nosaka masu, izmantojot svarus “Kern EMB 600-2” un biežumu mēra ar digitālo bīdmēru četrās vietās, no šiem rezultātiem izrēķina vienu vidējo biežumu.

Katram paraugam tiek atzīmēts viduspunkts, kurā ieskrūvē skrūvi ar izmēru $4,2 \times 38$ mm, vītnes soli 1,4 mm. Skrūvi ieskrūvē paraugos perpendikulāri parauga virsmai visā tā biežumā (2.21. a att.).



2.21. att.: a – paraugi skrūvju aksiālajā testā; b – skrūvju aksiālā izraušana.

Katra parauga testēšanai izmanto universālo testēšanas iekārtu “FORMTEST UBP 86/200”, kur paraugu ievieto speciālā papildaprīkojumā un novieto izejas pozīcijā atbilstoši standartam (2.22. att.). Tad manuāli tiek pievadīts spēks jeb aksiālā slodze skrūves galvas apakšpusei ar nemainīgu uzvīzres kustības ātrumu 10 ± 1 mm/min, līdz tiek sasniegta maksimālā slodze jeb līdz skrūve izvilktā no materiāla (2.21. b att.). Tajā momentā fiksē maksimālo slodzes spēku ar precizitāti līdz 10 N, ko paraugs izturējis. Šādi veic testu visiem paraugiem un nosaka vidējo rādītāju no katras paraugu grupas.



2.22. att. Skrūvju noturības materiālā testa noteikšanas princips [177].

NODAĻAS KOPSAVILKUMS

Paraugu izgatavošanas izejmateriāli un izejvielas

- Kaņepju spaļi – Latvijā audzētas kaņepju šķiedras šķirnes “*Bialobrzeskie*” blakusprodukts.

- Priedes garenfrēzēšanas skaidas – mēbeļu ražošanas un galdniecības blakusprodukts.
- Karbamīda – formaldehīda sveķu līme (UF) ar cietinātāju aukstai presēšanai.
- Rūpnieciski ražots iekapsulēts bioloģiskas izcelsmes fāzmaiņu materiāls, kas nesatur formaldehīdu.

Plātņu paraugu izgatavošana

- Izstrādāts paraugu izgatavošanas plāns, kurā aprēķināts un noteikts sastāvdaļu daudzums.

- Izstrādāta aukstās presēšanas plātņu izgatavošanas tehnoloģiskā shēma dispersijas ar mikroiekapsulētu *PCM* iestrādāšanai – izejmateriāla sagatavošana, tā svēršana; saistvielas sagatavošana izmantojot masas metodi; atbilstoši nosver un saistvielai pievieno dispersiju ar mikroiekapsulētu *PCM*; saistvielas sajaukšana ar izejmateriālu, izmantojot maisīšanas metodi ar mikseri; sajaukto masu formē matricā; presē plātņi matricā; iztur plātņi zem spiediena matricā; iegūto plātņi iztur laboratorijas apstākļos 10–14 dienas, apstrādā atbilstoši veicamā testa standartiem.

- Plātņu izgatavošanā izmantota 10 % saistviela (pēc izgatavoto plātņu organoleptisko kritēriju novērtēšanas plātnēm ar saistvielas apjomu no 4 līdz 14 %, ar soli 2 %).

- Testēšanai sagatavotas deviņas paraugu grupas, variējot ar izejmateriālu, ar plātnes struktūru un mikroiekapsulēto *PCM* procentuālo apjomu no 5 līdz 15 %, ar soli 5, saglabājot mērķa blīvuma noteiktās robežas.

Izejmateriālu īpašību pārbaudes

- Mitruma saturs noteikts atbilstoši *LVS EN 322* standartam, lietojot digitālos svarus “*Kern EMB 600-2*” (ar precizitāti 0,01 g) un žāvēšanas skapi “*Binder KBF 115*”.

- Granulometriskā analīze veikta atbilstoši *LVS EN 933-1* un *LVS EN 933-2* standartiem, lietojot digitāli vadāmu elektromagnētisko sieto kratītāju “*Matest A059-01 KIT*” un digitālos svarus “*Kern EMB 600-2*” (ar precizitāti 0,01 g).

Izolācijas plātņu ekspluatācijas īpašību pārbaudes

- Mitruma saturs noteikts atbilstoši *LVS EN 322* standartam, lietojot digitālos svarus “*Kern EMB 600-2*” (ar precizitāti 0,01 g) un žāvēšanas skapi “*Binder KBF 115*”.

- Blīvums noteikts atbilstoši *LVS EN 323* standartam, lietojot digitālos svarus “*Kern EMB 600-2*”, digitālo bīdmēru “*KS Tools 300.0532*” (ar precizitāti 0,01 mm).

- Ūdens uzsūktspēja un uzbriešana biežumā pēc 24 h izturēšanas ūdenī novērtēta, apvienojot *LVS EN 317* un *LVS EN ISO 29767* standartus, lietojot digitālos svarus “*Kern EMB 600-2*”, digitālo bīdmēru “*KS Tools 300.0532*” (ar precizitāti 0,01 mm).

- Veikta skenējošo elektronu mikroskopija, lietojot SEM iekārtu “*Tescan Vega*”, pārklājuma uznešanai izmantots “*LEICA EM ACE 200*”.

- Termiskās īpašības noteiktas, izmantojot metodes atbilstoši standartiem *LVS ISO 8302* un *LVS ISO 8301*, nosakot siltumietilpību, siltumvadītspēju un siltumpretestību, lietojot “*HFM 446 Lambda Series – NETZSCH Analyzing & Testing*” iekārtu, digitālos svarus “*Kern EMB 600-2*” (ar precizitāti 0,01 g).

- Fizikāli ķīmisko īpašību noteikšanai izmantots *LVS ISO 5660-1* standarts, nosakot ugunsreakcijas īpašības, lietojot konisko kalorimetru “*GD-ISO5660*” un digitālo bīdmēru “*KS Tools 300.0532*” (ar precizitāti 0,01 mm).

- Akustiskās īpašības noteiktas atbilstoši *LVS EN ISO 10534* standartam, nosakot skaņas absorbcijas koeficientu, *NRC* koeficientu, svērtās skaņas koeficientu un skaņas absorbcijas klasi, lietojot akustiskās impedances un pārvades zuduma mērījumu komplektu “*Brüel & Kjaer Type 4206*” un digitālo bīdmēru “*KS Tools 300.0532*” (ar precizitāti 0,01 mm).

Mehānisko īpašību noteikšana

- Robežstiprība liecē noteikta pēc *LVS EN 310* un *LVS EN 12089* standartiem, lietojot universālo testēšanas iekārtu “*FORMTEST UBP 86/200*”.

- Pretestības noteikšanas tests skrūvju aksiālai izraušanai veikts atbilstoši *LVS EN 320* standartam, lietojot universālo testēšanas iekārtu “*FORMTEST UBP 86/200*”.

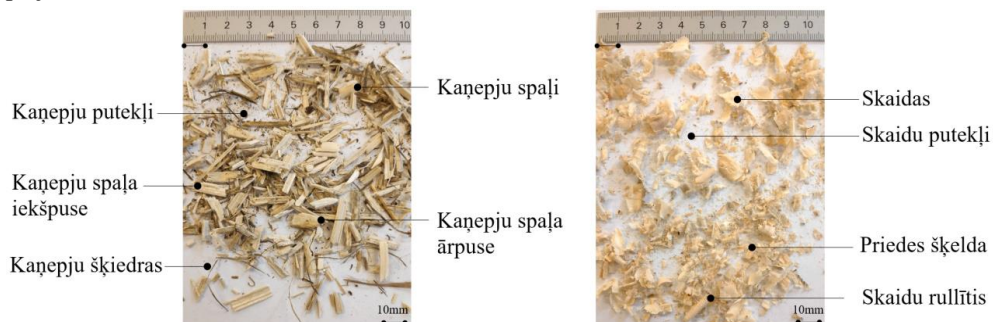
3. EKSPERIMENTU REZULTĀTI UN TO ANALĪZE

Saskaņā ar apkopotajām eksperimentu metodēm ir realizēti eksperimenti ar plātņu paraugiem, kā rezultātā iegūti materiāla raksturojoši dati, veikta to apkopošana, interpretācija un salīdzinošā analīze ar līdzīgiem materiālu datiem no industrijas un publicētās literatūras.

3.1. Izejmateriālu raksturojums

Paraugu izgatavošanā būtiskākās izejmateriālu raksturojošās iezīmes ir izejmateriāla mitrums, lai tas būtu atbilstošs izvēlētajai saistvielai, un frakciju sadalījums izejmateriāla kopējā masā, lai varētu prognozēt, cik liels apjoms putekļu un mazo frakciju ir kopējā masā, kas samazina plātnes mehānisko noturību.

Izvēlēti ir kaņepju spaļu un koka garenfrēzēšanas skaidu materiāli. Izejmateriālu sastāvs ar piejaukumiem skatāms 3.1. attēlā.



3.1. att. Izejmateriālu sastāvs.

3.1.1. Izejmateriālu komponentu mitrums

Realizējot eksperimentu atbilstoši metodikai pēc 24 h izturēšanas žāvēšanas skapī $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, materiāls izņemts no žāvēšanas skapja un katrs paraugs nosvērts. Izejmateriāla parauga masas vērtības pirms žāvēšanas un pēc žāvēšanas ievietotas 1.1. vienādojumā, un iegūti rezultāti, kas apkopoti 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Izejmateriālu komponentu mitrums		
Materiālu veids	Mitrums %	Vidējais mitrums %
Kaņepju spaļi	7,8	7,9 ± 0,21
Kaņepju spaļi	7,8	
Kaņepju spaļi	8,0	
Priedes skaidas	9,3	8,8 ± 0,92
Priedes skaidas	8,3	
Priedes skaidas	8,8	

Pēc žāvēšanas skapja katra izejmateriāla veida paraugiem mitruma daudzums aprēķināts atsevišķi, kā arī aprēķināts vidējais aritmētiskais mitruma daudzums procentos.

Tabulā 3.1. kaņepju spaļu vidējais mitrums ir 7,9 %, savukārt priedes skaidu vidējais mitrums – 8,8 %. Priedes skaidu mitrums ir par 11 % augstāks nekā kaņepju spaļiem. Jāņem vērā arī tas, ka kokskaidu vidējais mitrums novērtēts, pieļaujot absolūto kļūdu 0,92 %, salīdzinot ar 0,21 % kaņepju spaļiem. Materiāla mitruma noteikšana veikta, lai precīzi noteiktu, vai izejmateriāliem ir pieļaujams lietot izvēlēto UF saistvielu. Secināts, ka vidējais to mitruma saturs iekļaujas saistvielas ražotāja noteiktajā līmējamā materiāla mitruma intervālā 8 ± 2 %.

3.1.2. Izejmateriālu granulometriskā analīze

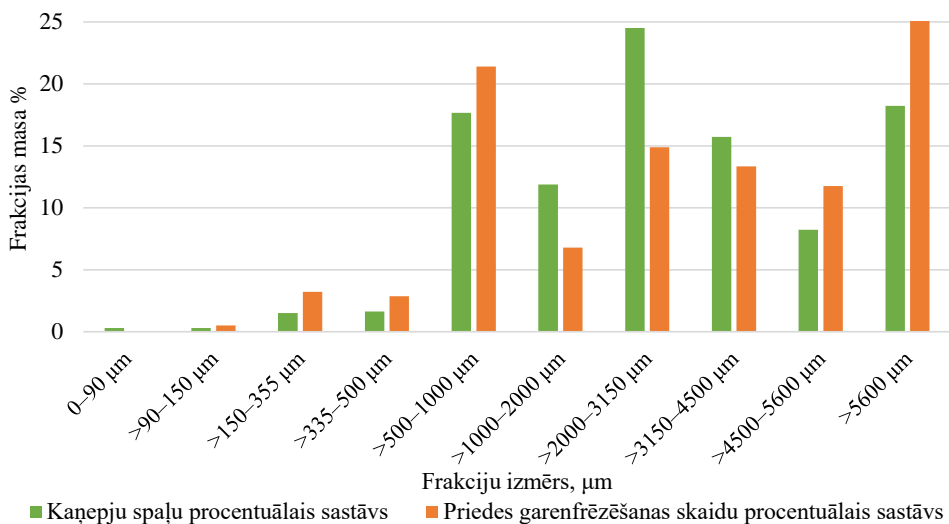
Pēc granulometriskā eksperimenta veikšanas, izmantojot sijāšanas metodi, rezultātā iegūts procentuālais masas sadalījums pēc frakciju izmēriem, ko ļāva noteikt sijāšanā izmantotie sieti un to dažādie acs izmēri (3.2. un 3.3. att.).



3.2. att. Kaņepju spaļu daļiņu izmērs pēc katra sietā.



3.3. att. Koka skaidu daļiņu izmērs pēc katra sietā.



3.4. att. Kaņepju spaļu un koka skaidu granulometriskās analīzes salīdzinoši rezultāti.

Izsiļājot izejmateriālu daļiņu paraugus, 3.4. attēlā apkopoti to vidējie rezultātu dati. Kaņepju spaļiem (H) ceturtdaļa (25 %) frakcijas ir izmērā 150–2000 μm, turpretī priedes skaidu (W) materiālā šīs frakcijas ir par 39 % mazāk. Nepilni 20 % H materiālā ir frakcijas ar izmēru, kas ir lielāks par 5600 μm, turpretī W šī izmēra frakcijas ir par 38 % vairāk. W frakciju izmērs robežās 500–1000 μm veido 17,7 %, kas ir par 17 % mazāk nekā W materiālā. W materiālā frakciju robežās 2000–5600 μm apjoms izejmateriālā ir robežās 12–14 %. Frakcijas izmērā zem 500 μm smalkā un putekļu daļa H izejmateriālā veido aptuveni 3,5 %, kas ir par 45 % mazāk nekā W materiālā. Šī izmēra frakcijas ietekmē plātnes mehāniskās īpašības, jo materiāla sajaukšanā ar saistvielu piesaista lielāko daļu saistvielas un uz lielākajām frakcijām nonāk mazāks apjoms saistvielas, tāpēc nolemts šī izmēra frakcijas atdalīt no kopējās masas pirms sajaukšanas ar saistvielu, veicot papildu sījāšanu.

3.2. Plātņu izgatavošana

Izgatavojot eksperimentālās plātnes, veidotas 47 plātņu grupas, kurās mainīti dažādi mainīgie, lai nonāktu pie plātņu grupām, ar kurām veikti turpmākie eksperimenti.

3.2.1. Plātņu eksperimentālo paraugu veidi un struktūras

Darba procesā strādāts pie eksperimentālajām plātnēm variējot plātņu mainīgos, kā biežumu, izejmateriālu un izejvielu proporcijas, izejmateriālu frakciju lielumus, veidojot dažāda veida slāņveida plātnes, strukturizējot virsmas, kā arī aplīmējot virsmas. Izveidots eksperimentālais plāns, (2.3.1. nod.).

Sākotnēji pēc literatūras apskata secināts, ka plātņu materiāls būs izgatavots ar blīvumu robežās 250–350 kg/m³, kas noteica aptuvenās izejmateriāla un izejvielu proporcijas. Tika

veikti dažādi matemātiskie aprēķini un paraugu izgatavošanas testi kā rezultātā turpmāk strādāts darbā ar blīvumu 270–320 kg/m³.

Veidojot pirmās eksperimentālās plātnes, meklēts optimālais risinājums izejmateriālu proporcijām un materiāla biezumam, paraugus izgatavojot 20, 25 un 50 mm, kas ir līdzvērtīgs biežums tirgū esošām plātnēm. Turpmāk darbā izgatavotas 25 mm biezas plātnes.

Plātņu izejmateriāla proporcijas veidotas pret izejvielu daudzumu. Ņemtas sākotnējās proporcijas pēc saistvielas datu lapas, bet izstrādes laikā veiktas korekcijas un šī proporcija izveidota 55:45, nodrošinot, ka saistviela nav viskozas vai šķidrās konsistences un labi iemaisās masā. Pēc visu paraugu izturēšanas testiem novērots, ka pievienotais ūdens daudzums iztvaikoja salīdzinoši līdzīgā laikā (3.10. att.) un viss saistvielai pievienotais ūdens iztvaiko no plātnēm.

Lai atrastu piemērotāko saistvielas daudzumu, veikts tests, lai noteiktu optimālo saistvielas daudzumu, novērtējumu veicot ar organoleptisko novērojumu, 3.2.2. nodaļā. Saistvielas apjoms noteikts sākot no 4–14 %, ar soli 2 %. Izvēlētais daudzums ir 10 % saistvielas pret izejmateriālu.

Strādājot ar izejmateriālu, novērots, ka ir salīdzinoši liels putekļu daudzums. Sākotnēji tika izveidotas plātnes no neatsijātiem kaņepju un skaidu izejmateriāliem, saprasts, ka materiālu sastāvos ir ļoti liels putekļu piejaukums, kaņepju spaļiem – papildus liels šķiedru piejaukums. Veikta izejmateriālu granulometriskā analīze (3.1.2. nod.). Veidojot plātnes, joprojām varēja novērot nelielu daudzumu putekļu un dažādu izmēru izejmateriāla (piemēram, kaņepju šķiedras) piejaukumu, bet tie vairs lielā mērā neietekmēja īpašības.



3.5. att. H paraugos putekļu un kaņepju šķiedru piejaukums.

Pētot paraugus zem mikroskopa “*Motic SMZ 171*”, novērots (3.5. att.), ka no kaņepju spaļiem nav visas šķiedras atdalītas un rezultātos tas var būt ietekmējošs faktors, bet ne noteicošs, kā arī paraugos joprojām pat pēc putekļu atsijāšanas, to ir daudz. Parauga šķērsgrīzumā var redzēt, ka kaņepju spaļu frakciju orientācija ir novietota dažādos virzienos.

Veidotas plātnes slāņos, kur plātnēm izmantots divu veidu frakciju izmērs >500–2000 μm un >2000–5600 μm, liekot ārējos slāņos smalkāko masu un iekšējā slānī rupjāko, līdzīgi kā veido koksnes skaidu plātnes. Secināts, ka tehnoloģiskais process ir daudz sarežģītāks, jo ir jāveic vairāk darbības. Šādi veidojot plātnes, ārējais slānis ir daudz blīvāks un vienmērīgāks, pati plātne bez testiem ir stabilāka. Šādi slāņos tika veidotas plātnes gan no viena veida materiāla, gan liekot pa slāņiem kaņepju spaļus un skaidas, variējot ar procentuālo sadalījumu un ar sijāto izejmateriālu. Pēc līdzvērtīgas tehnoloģijas tika jaukta kopā arī masa. Lai būtu

vienmērīgs slāņu sadalījums, tika izmēģināta cita tehnoloģija, piepresējot katru slāni atsevišķi un tikai secīgi liekot nākošo virsū. Tomēr šis variants nebija noturīgs, jo žūstot un mēģinot to mehāniski apstrādāt, tas sāka dalīties starp slāņiem. Slāņi tika veidoti dažādās proporcijās, gan trīs slāņu – malās smalkāk, vidū lielākas frakcijas proporcijās 30 : 40 : 30. Šādas eksperimentālās plātnes tika izgatavotas gan tikai no kaņepju spaļiem, variējot ar frakciju izmēriem, gan jaucot spaļus ar skaidām slāņos. Tieši pēc tāda paša principa veidotas divu slāņu plātnes ar proporcijām 50 : 50; 30 : 70, gan tikai no spaļiem, gan jaucot spaļus ar skaidām slāņos, gan variējot ar frakciju izmēriem.

Kā viens no apjomīgākajiem eksperimentālo plātņu pētījumiem bija plātnes ar strukturētām virsmām no vienas vai abām pusēm, kas tika realizēts, izveidojot sešu veidu matricas, ar dažādu ģeometrisku reljefu zīmējumu. Veidotas plātnes slāņos – gan liekot katrā slānī citu izejmateriālu (W vai H), gan veidojot struktūras no dažāda frakciju izejmateriāla, ārpusē smalkāku un iekšpusē rupjāku, tāpat kā kokskaidu plātnēm. Šīs plātnes sarežģītās izgatavošanas tehnoloģijas un eksperimentu skaita daudzuma pēc netika testētas tālāk, tomēr tām ir nākotnes perspektīva, piemēram, *PCM* iestrādājot vidējā slānī un tad testēt, kā tas ietekmē rezultātus.

Veidojot paraugus ar matricām, kas veido virsmas ar reljefu (3.6. att.), secināts, ka matricas ar smalkāku struktūru ir jāizgatavo no smalkāki sijātas frakcijas >500–2000 μm, jo lielāki kaņepju spaļi ir par cietu un nav iespējams izveidot vienmērīgu struktūru.



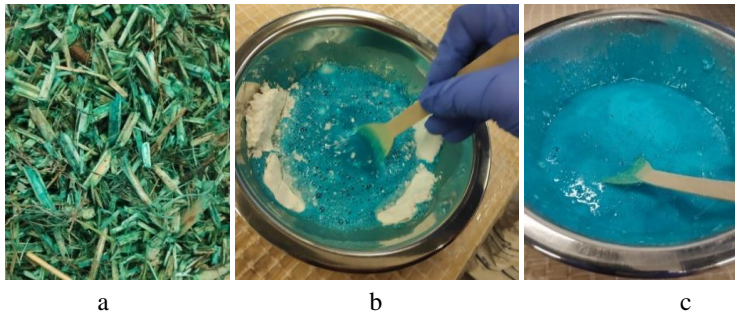
3.6. att. Dažādu virsmu reljefu plātnes.

Meklējot risinājumus plātnei ar gludu virsmu, veikta plātņu aplīmēšana ar bērza lobītā finiera skaidu (3.7. att.). Izmēģinātais tehnoloģiskais risinājums plātnēm presēšanas laikā bija veikt aplīmēšanu ar finieri neizmantojot papildu saistvielu. Eksperimenta sākumā tika testēts plātnei no apakšējās puses pielīmēt finieri – matricā liekot pirms masas ieklāšanas piegrieztu izmēros finieri, un presēt vienlaicīgi ar plātņi. Tas tehniski izdevās, bet pēc materiāla žūšanas vai mehāniskās apstrādes laikā, daļai no paraugiem finiera skaida daļēji atlīmējās, kas nozīmēja, ka saistviela ir pietiekōša paraugu izstrādāšanai, bet ne vēl papildus aplīmēšanai. To var risināt uzreiz plātnes izgatavošanas laikā liekot finieri ar uzklātu līmes slāni un līmējot presēšanas laikā. Testēta bija arī apfinierēšana no abām pusēm, kam nepieciešama papildus saistviela. Vienlaicīgi presējot šādu materiālu, tā augšējam slānim var rasties papildus plaisas, jo izejmateriālu masa ir jāspiež zem spiediena, bet kāds cietāks kaņepju spalī var būt orientēts perpendikulāri finierim. Eksperimenta gaitā tika izmēģinātas vēl citas plātņu izgatavošanas tehnoloģijās kā finierētu plātņu izgatavošana atsevišķi gan aukstajā presē, gan vakuumpresē, kas tehnoloģiski ir garāks izgatavošanas process.



3.7. att. Dažādu virsmu reljefu plātnes, tonētas, apstrādātas ar antiseptiķi un finierētas.

Eksperimenta ietvaros tika meklēts variants, kā plātnei uzlabot īpašības – gan estētiskās, veidojot toņus, gan samazinot, piemēram, ūdens lielo uzsūktspēju. Viens no veidiem, izgatavojot plātņi, bija aizstāt ūdeni ar ūdens bāzes antiseptiķi, un iemaisot jau izgatavošanas procesā plātnes masā, iegūstot nelielu iekrāsojumu, kas labi parādīja arī plātnē līmes atrašanās vietu un varēja secināt, ka ar izstrādāto tehnoloģiju tā bija vienmērīga visā plātnē. Otrs variants bija izmantot antiseptiķi izejmateriāla apstrādāšanai. Eksperiments mēģināts tikai ar kaņepju spaļiem – apstrādājot kaņepju spaļu masu ar antiseptiķi un to žāvējot un tad izmantojot spaļus paraugu iegūšanai (3.8. att.). Secināts, ka šāds apstrādāšanas veids ir tehnoloģiski garāks process, bet testi, par cik uzlabojās ūdens absorbcijas īpašības, netika veiktas.

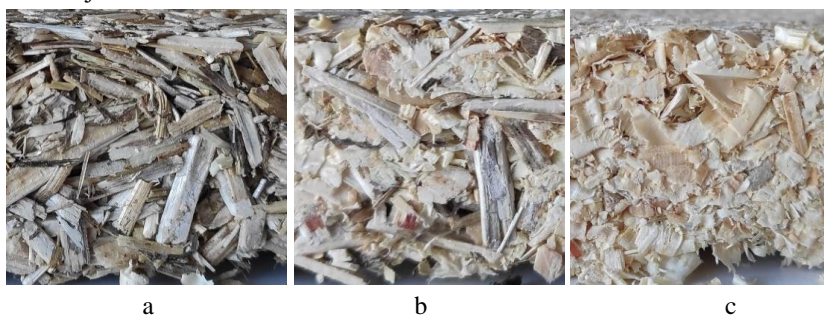


3.8. att. Kaņepju spaļu apstrāde ar antiseptiķi: a – apstrādāti kaņepju spaļi, b – antiseptiķa iestrāde saistvielā, c – antiseptiķis saistvielā

Pēc tādiem pašiem principiem var iegūt estētiskās īpašības, veicot ietonēšanu, piemēram, berot klāt krāsvielas pulveri saistvielas ūdenim izgatavojot plātņi, vai arī iepriekš izejmateriālus tonējot un tad izgatavojot plātnes. Arī pēc tam šīs plātnes var krāsot, bet jārēķinās ar iespējamu

nelielu izejmateriāla izdrupumu, ja tas tiek veikts mehāniski ar krāsu rullīti vai otu, bet liekot apdari izsmidzinot, plātnes netiek bojātas.

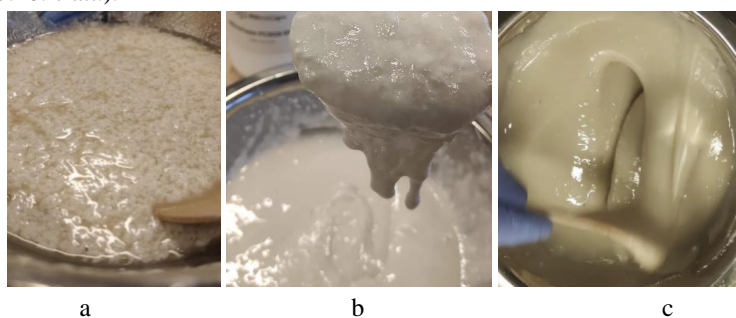
Pētot plātnes šķērs griezumus (3.9. att.), var novērot, ka gan kaņepju spaļi, gan koka skaidas ir izvietotas jaukti un dažādos virzienos, ko nevar atkārtot visos paraugos vienādi – attiecīgi var iegūt plātnēm vienu blīvumu, bet nevar iegūt vienādu izejmateriālu frakciju izvietojumu plātnēs, kas var mainīt akustiskās īpašības. Materiāls izvietojas jaukti, un blakus var novietoties viena veida izejmateriāli, gan jaukti, gan arī blakus izmēros lielāki spaļi, rodot pilnībā savādāku materiāla iekšējo struktūru.



3.9. att. paraugi šķērs griezumā: a – H; b – HW un c – W.

PCM iestrādāšanai izskatīti vairāki varianti, sākotnēji strādājot ar diviem dažādiem fāzmaiņu materiāliem, kam atšķiras netikai īpašības, bet arī sastāvs. Eksperimentēts ar *PCM-50* un *PCM-28* (īpašības 2.1. tab.), testēti iestrādei tika abi, bet izvēlēts *PCM-50*.

PCM-28 testēts dažādos tehnoloģiskos iemaisīšanas veidos, gan saistvielas pulverī, ūdenī, samaisītā saistvielā, sausā izejmateriālu masā, masā, kurā jau ir saistviela, visos gadījumos *PCM-28* paspēja veidot nesaderību starp materiāliem, veidojot vai nu nevienmērīgu masu, vai izejmateriālā nevienmērīgi iemaisīties (3.10. a un b att.). *PCM-50* visos veidos iemaisījās vienmērīgi (3.10. c att.).



3.10. att. a – nevienmērīga masa; b – gumijota masa; c – vienmērīga masa.

Veidojot eksperimentālās plātnes, strādāts ar vairāku veidu plātņu izgatavošanas tehnoloģijām, testējot optimālo risinājumu plātņu izgatavošanā. Ņemot vērā, ka jāizgatavo plātnes, kas vēlāk būtu piemērotas ražošanai, tad katrā procesā tika analizēts izgatavošanas process un kas ir procesi, kur tehnoloģiski varētu nodrošināt ātrāku izgatavošanas posmu. Tieši

šo dažādo secinājumu dēļ, veidojot eksperimentālās plātnes, tika pieņemts lēmums neizstrādāt plātnes ar vairākiem slāņiem. Tieši tāpat testēta *PCM* iestrāde nevis atsevišķā posmā, bet vienā tehnoloģiskajā procesā, nesabojājot mehāniski kapsulas un nodrošinot to veiktspēju. Izstrādāto tehnoloģiju skatīt 2.3.2. nodaļā.

3.2.2. Saistvielas apjoma noteikšana un saistīto īpašību analīze

Rezultāti atspoguļoti apskatot sešas UF saistvielas procentuālās grupas no 4 līdz 14 %, kurām ar organoleptisko metodi noteikti kritēriji un rezultāti apskatāmi 3.2. tabulā. Katrā grupā izgatavoti 3–4 paraugi un izturēti laboratorijas apstākļos 10–20 dienas, lai paraugi pirms organoleptiskās pārbaudes būtu konstantā masā un līdzsvara mitrumā (mitrs paraugs var dot neobjektīvu vērtējumu).

3.2. tabula

Organoleptisko novērtējumu kritēriju rezultāti (punkti)

UF %	Formas noturība	Drūp malas/virsmā	Ģeometriskā deformācija	Plaisas vai bojājumi sānos/virsmā	Mehāniskā apstrāde			Kopā
					Slīpēts	Frēzēts	Zāģēts	
4 %	3	2	3	2	3	1	1	13
6 %	3	3	3	2	4	1	1	15
8 %	3	3	2	3	4	2	1	17
10 %	3	3	2	3	4	3	3	19
12 %	4	4	2	3	4	4	4	22
14 %	4	4	2	3	4	4	4	22

Paraugi pēc organoleptiskās pārbaudes uzrāda, ka, jo vairāk saistvielas, jo labākas ir mehāniskās īpašības, apstrādājot materiālu un materiāla noturība frakcijām, bet sliktāka pret ģeometrisku deformāciju. Lielākā daļa paraugu pie 10–14 % bija ar nelielu vai lielāku deformāciju žūšanas procesā, kas skaidrojama ar lielāku ūdens daudzumu paraugā.

Neņemot vērā ģeometrisku deformāciju, paraugi ar 10–14 % ir visstabilākie un ar vismazāk ārējiem defektiem, kā arī šos paraugus aiztiekot, nerodas viegli defekti jeb izdrupumi materiālā. Paraugiem ar zemāku saistvielas apjomu ir vērojama pretēja tendence, kur lielākajai daļai jau bija radušies kādi bojājumi ikdienā, tos sverot un mērot.

Būtiski atzīmēt, ka visiem plātņu paraugiem malas un plakni iespējams slīpēt, izmantojot diska un lentas slīpmašīnu, iegūstot labus rezultātus, bet pie mazāka procentuālā saistvielas daudzuma vai pie spiediena/mehāniskas iekļaušanās plāknē mēdza atdalīties arī vairāk daļiņu, bojājot virsmu.

Frēzēt, izmantojot universālo frēzmašīnu ar kāta frēzes griezējinstrumentu, varēja labi mehāniski apstrādāt paraugus ar saistvielas apjomu no 10 līdz 14 %, šeit ar izņēmumiem novērojama neliela frakcijas izdrupšana. Paraugiem ar zemāku saistvielas daudzumu apstrādāšana tehniski nebija iespējama, jo frēze rāva nost frakcijas, kam bijusi sliktā adhēzija ar kopējo plātnes masu, nevis tās nofrēzēja.

Veicot zāģēšanas operāciju, izmantojot formātripzāģmašīnu, vērojama līdzīga situācija kā veicot frēzēšanas operāciju – paraugā neveidojās zāģēšanas ceļš, bet tika izlauzti lielāku daļiņu gabali no plātnes.

Plaisas vai bojājumi paraugu struktūrā bija radušies no žūšanas procesa un saistvielas nelielā apjoma jeb plātnes slīktās struktūras stabilitātes, ko bieži varēja manīt plaknēs un malās plātnēm ar 4 un 6 % saistvielas apjomu.

Kā sakarību varēja novērot, ka plātnes, kas izturētas vismaz uz pusi ilgāk presē bija ar labākām īpašībām katrā grupā, izņemot pie ģeometriskās deformācijas, kur arī 10 h izturēšana formā ir par maz.

Novērota sakarība starp izturēto stundu skaitu presē pret plātņu blīvumu un biezuma izmaiņām. Ja izņemot plātnes tās visas bija ap 25 mm biezas, tad varēja novērot, ka plātņu izturēšanai laboratorijas apstākļos bija vērojamas biezuma izmaiņas atkarībā no procentuālā saistvielas daudzuma un ilguma izturēšanas presē. Plātne, kas izturēta vismaz 10 h presē, savu biezumu mainīja līdz 1 mm, kamēr plātnes, kas izturētas, pēc ražotāja datu lapā ieteiktā laika, 4,5 h savu biezumu mainīja vidēji 2–4 mm robežās. Biezumu ietekmēja ne tikai izturēšanas laiks, bet arī saistvielas daudzums, jo lielāks tas bija, jo biežāk mazākas izmaiņas varēja novērot. Kā piemērs, 4,5 h izturētajiem plātņu paraugiem pie 4–8 % saistvielas vidēji plātnes biezums mainījās 2,5–3,5 mm, pie 10–12 % 1,5–2 mm un pie 14 % ap 1 mm (3.3. tab.).

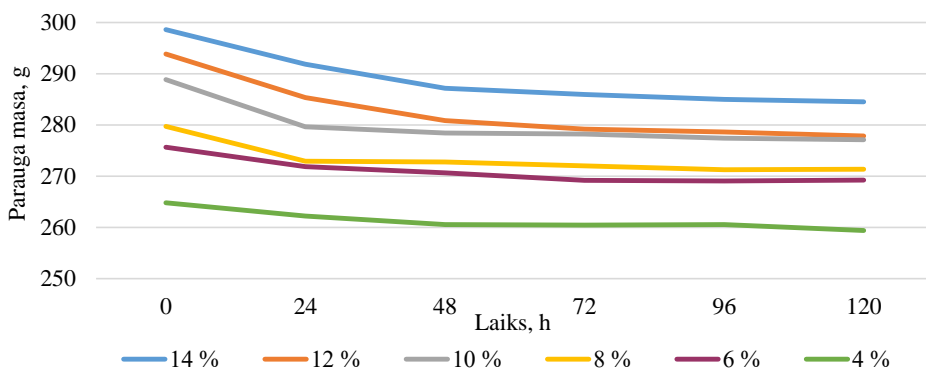
Plātnēm, ar 10–14 % saistvielas daudzumu daudz biežāk varēja novērot ģeometrisku deformāciju pēc 4,5 h žūšanas – stūri deformējušies uz augšu, kas izskaidrojams ar straujo žūšanu un īso laiku zem slogojuma. Šis tests papildus deva sapratni, ka paraugus, lai tiem būtu labākas mehāniskās īpašības, ir jāiztur presē zem spiediena minimums 10 h, tā žūstot, paraugs mazāk deformējas un saglabā labākas iekšējās īpašības, žūstot, nemainot arī iekšējos spriegumus, mainot biezumu.

3.3. tabula

Saistvielas apjoma ietekme uz biezumu un blīvumu

Plātņu saistvielas grupa, %	Masa pēc žūšanas plātnei, g	Vid. plātņu grupas biezums, mm	Aprēķinātais plātņu blīvums, kg/m ³	Paraugu grupas biezuma vidējā starpība pret plānoto biezumu (25 mm)
4 %	257,15	27,54	234	-2,54
6 %	266,81	27,96	239	-2,96
8 %	269,50	26,91	251	-1,91
10 %	275,54	26,00	265	-1,00
12 %	277,90	25,48	273	-0,48
14 %	284,69	25,29	281	-0,29

Paralēli saistvielas optimālā apjoma noteikšanai ir noteikts plātnes pievienotā ūdens apjoma žūšanas laika ietekme uz plātnes masas izmaiņu. Lai noskaidrotu attiecīgā paraugu masas izmaiņas, paraugi pēc presēšanas 120 h svērti. Lielākais masas kritums visām paraugu grupām notiek pirmajās 24 h, kur atkarībā no saistvielai pievienotā ūdens daudzuma, masa mainās robežās 1–4 %, bet turpmākajās dienās līdz 2 % robežās. Pēc iegūtajiem rezultātiem 3.11. attēlā vērojams, ka vidēji pēc 72 h masa mainās 1 % ietvaros.



3.11. att. Saistvielas apjoma ietekme uz plātņu mitruma žūšanu 120 h laboratorijas apstākļos.

Atkarībā no pievienotā procentuālā ūdens daudzuma saistvielai (proporcijas skatīt 2.3.3. nodaļā), pirmajās dienās var saskatīt sakarību, cik iztvaiko ūdens no parauga. Pievienojot mazāk mitruma, arī mazāk mitrums iztvaiko, bet pie lielāka daudzuma, daudz straujāk mitrums no parauga izžūst, biežāk paraugiem novērojot deformāciju. Paraugu grupai, kurai pievienots 4 % saistvielas pirmajā diennaktī, masa mainās par 1 %, bet kopumā ne vairāk kā 3 % robežās no sākotnējās masas, savukārt plātnēm ar 10 % saistvielu pirmajā diennaktī masa mainās līdz 3,6 % no sākotnējās masas, bet kopumā līdz 4,8 %.

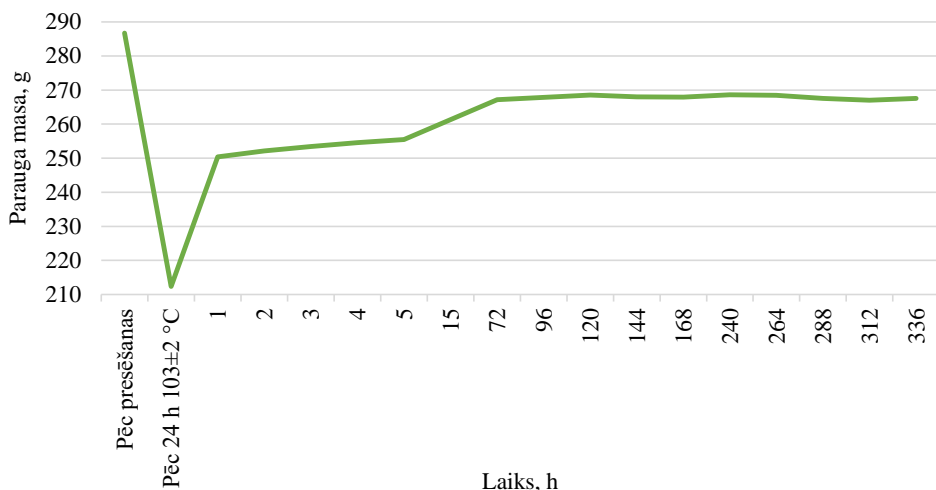
3.3. Plātņu materiālu īpašības

Izstrādājot plātnes, svarīgi ir noteikt to pamatīpašības, lai, balstoties šajos rezultātos, interpretētu mehāniskās un fizikālās īpašības.

3.3.1. Plātņu materiāla mitruma noteikšana un salīdzināšana

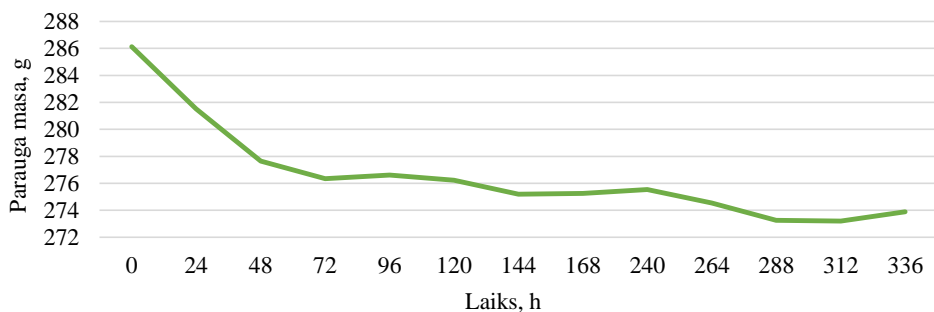
Parauga mitrums noteikts, lietojot masas metodi, plātnes masa pēc presēšanas ir 286 g pēc 24 h, izņemot no žāvēšanas skapja, masa ir 212 g, zaudējot 26 % no sākotnējās masas jeb 35 % mitruma (saistvielai lietotais ūdens un kaņepju spaļu izejmateriāla mitrums 8 %). Turpinot eksperimentu, paraugs svērts pirmās 5 h ik 60 min, un parauga masa vidēji palielinājās par 2 g ik pēc 1 h. Parauga masa pēc 72 h sasniedza 267 g, attiecīgi no izņemšanas brīža masa palielinājās par 25 %. Pēc šī rezultāta fiksēšanas paraugu turpina svērt 14 dienas, bet turpmākās izmaiņas ir minimālas un svārstās 267 ± 1 g. No iegūtajiem rezultātiem secināts, ka paraugu pēc žāvēšanas skapja ir jāiztur laboratorijas telpas apstākļos trīs diennaktis, lai iegūtu līdzsvara mitrumu, ieteicams – septiņas dienas.

Vidēji plātnes parauga masas izmaiņas ir 6,5 % robežās, parauga mitrums – 6,9 %. Iegūtais rezultāts atbilst plātnes nepieciešamajam mitrumam, lai to izmantotu iekštelpās, kā arī iegūtais plātnes mitrums līdzvērtīgs izejmateriālu komponentu mitrumam – 8 ± 2 %. 3.2. attēlā redzamas plātnes masas izmaiņas pēc žāvēšanas.



3.12. att. Parauga masa uzreiz pēc presēšanas, pēc 24 h izturēšanas žāvēšanas skapī un 14 dienu periodā, izturot laboratorijas apstākļos.

Salīdzināšanai veikta otra parauga mitruma noteikšana, paraugu izņemot no preses, iztur laboratorijas apstākļos 14 dienas. Parauga sākotnējā masa ir 286 g, pēc 72 h parauga masas ir samazinājusies par 3 %, sasniedzot 277 g. Veicot masas fiksēšanu 14 dienas novērojams, ka masas izmaiņas svārstās 1,5 % robežās, kas ir pieļaujami materiālam, kas izgatavots no dabīgiem izejmateriāliem un “elpo” – uzņem un atdod mitrumu (3.13. att.). Iegūtos rezultātus ievietojot 1.1. vienādojumā aprēķināts, plātnes mitrums ir 4,5 %.



3.13. att. Parauga masas izmaiņa pēc presēšanas 336 h laboratorijas apstākļos.

Lai fiksētu paraugu mitrumu, izmantojot abas mitruma noteikšanas metodes, pēc 14 dienām abus paraugus liek žāvēšanas skapī uz 24 h. Pirmajam paraugam sākuma masa ir 286 g, otrajam paraugam – 273 g. Žāvēšanas rezultātā paraugi zaudējuši proporcionāli 8 % un 10 % masas, paraugu mitrums attiecīgi ir 9 % un 11 %. Paraugiem veikti kontrolmērījumi laboratorijā un noteikts, ka katrai plātnei pēc 336 h iegūta sākotnējā masa.

Salīdzinot abas plātņu mitruma noteikšanas metodes, novērots, ka plātnēm pēc aukstās presēšanas ieteicams, lai žūšanas process noritētu lēnām un vienmērīgi, pretējā gadījumā,

plātnei ātri žūstot, tā sāk plaisāt un deformēties. Realizējot šādu plātnes žūšanas procesu, var novērot, ka pēc 336 h plātnē notiek nelielas mitruma un masas svārstības, kas, realizējot pirmo metodi, izsakāmas 0,5 % robežās, realizējot otro metodi, izsakāmas 1,5 % robežās.

3.3.2. Blīvuma vienmērība plātnēs

Paraugu iekšējās nevienmērības raksturošanai veikta blīvuma vienmērības noteikšana, lai noskaidrotu plātņu blīvuma izkliedi. Pārbaude veikta H, W un HW grupas paraugiem. Katrai paraugu grupai sagatavotas trīs 200 mm × 200 mm plātnes. Katra plātne sadalīta 50 mm × 50 mm kvadrātos un atlasīti trīs paraugi katrai paraugu grupai un noteikti blīvumi gan plātnei kopumā, gan 50 mm × 50 mm paraugiem. Veikti matemātiski aprēķini un salīdzinājumi katras plātnes kontekstā, lai noteiktu vienmērību (3.4. tab.).

3.4. tabula

Blīvuma vienmērība H, HW un W plātnēs

Paraugu grupa	Paraugi 50 × 50 mm			Plātnes 200 × 200 mm		
	Blīvums kg/m ³		Relatīvā kļūda %	Blīvums kg/m ³		Relatīvā kļūda %
	Vidējais	±		Vidējais	±	
H	290	9,98	3,44 %	285	24,94	8,76 %
HW	276	15,21	5,51 %	285	14,74	5,18 %
W	302	24,74	8,18 %	300	20,90	6,98 %

H grupas vidējais 200 × 200 mm plātņu blīvums ir 285 kg/m³. Blīvumi svārstās robežās no 269–296 kg/m³. Izgatavoto plātņu absolūtā kļūda 24 kg/m³, bet relatīvā kļūda 8,8 %. Šīs atšķirības rodas dažādu tehnoloģisko izstrādes procesu dēļ, piemēram, neprecīzi iestrādājot izejmateriālus vai tieši izgatavošanas vai plātnes žāvēšanas laikā, kad mainās biežums. Sagatavoto 50 × 50 mm paraugu vidējais blīvums ir 290 ± 9,98 kg/m³, blīvuma svārstības no 272–307 kg/m³ ar absolūto kļūdu 9,98 kg/m³ un 3,4 % relatīvo kļūdu. Lielākās 50 × 50 mm paraugu svārstības ir H₅₅ grupai, kur relatīvā kļūda vidēji ir trīs reizes lielāka nekā pārējām H grupas plātnēm. Salīdzinot visus H plātņu blīvumus ar 50 × 50 mm izmēra paraugu vidējo blīvumu, var secināt, ka plātnes parauga blīvuma svārstības starp mazajiem paraugiem un plātņu vidējo blīvumu ir normas robežas 2 % amplitūdā.

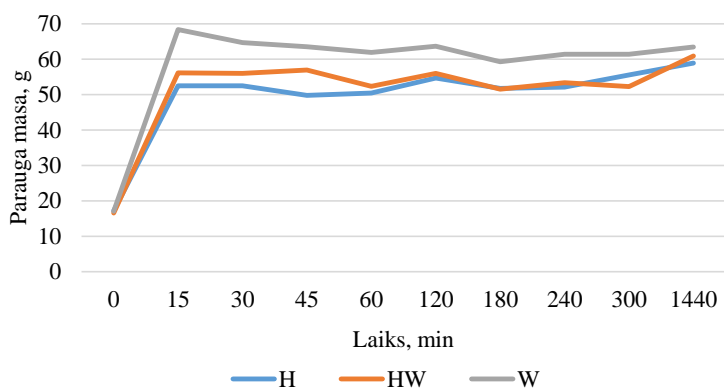
HW grupas paraugu 200 × 200 mm plātņu blīvums svārstās no 276 līdz 292 kg/m³, plātņu vidējais blīvums 285 kg/m³ ar absolūto kļūdu 14,74 kg/m³, plātnes savā starpā veido 5,2 % relatīvo kļūdu. Sagatavoto 50 × 50 mm paraugu blīvumi svārstās no 259 līdz 294 kg/m³, kas veido vidējo rezultātu 276 kg/m³ ar absolūto kļūdu 15,21 kg/m³. Šī starpība veido relatīvo kļūdu 5,5 % robežās, attiecīgi HW₄₅ grupai tie ir 3,6 %; HW₄₆ 7,2 % un HW₄₇ grupai 11,5 %. Kļūdas rodas saistībā gan ar tehnoloģisko izgatavošanu, gan ar to, ka plātnēs ir divu veidu izejmateriāls, kur kaņepju spaļi ir blīvāki un ar lielāku frakciju izmēru, bet koka garenfrēzēšanas skaidas – sapresējas nevienmērīgāk. HW plātnēm 50 × 50 mm paraugu vidējais rezultāts pret plātņu vidējo rezultātu uzrāda nevienmērību 3 % apjomā, bet šis rezultāts neparāda kopumā plātnes iekšējo nevienmērību.

W grupas 200 × 200 mm plātnēm blīvums ir robežās starp 287 un 309 kg/m³. Plātņu vidējais blīvums ir 300 kg/m³ ar absolūto kļūdu 20,90 kg/m³. No šīm plātnēm veidojas 7 % liela relatīvā

kļūda. Sagatavoto 50×50 mm paraugu vidējais blīvums ir $302 \pm 24,74 \text{ kg/m}^3$, kur paraugu blīvumi svārstās starp 283 un 326 kg/m^3 , to relatīvā kļūda ir $8,2 \%$. Lielākā relatīvā kļūda ir W_53 grupā $12,9 \%$, kas ir nepilnas trīs reizes lielāka nekā W_52 grupā, kam ir $4,1 \%$. Analizējot paraugu vidējos rezultātus pret plātņu blīvumu vidējo rezultātu, tad starpība ir 1% , bet novērots, ka plātnēm nevienmērīgāks blīvums ir tuvāk plātņu malām, kā arī W grupas plātnēm nevienmērība ir izteiktāka.

3.3.3. Materiāla ūdens uzsūktspējas un uzbriešanas novērtēšana

Materiālu ūdens uzsūktspējas un uzbriešanas novērtējums veikts trīs paraugu grupām: H, W un HW. Katrā paraugu grupā sagatavoti deviņi paraugi, noteikti izmēri un aprēķināts blīvums. Eksperimenta rezultātā noteiktas masas un biezuma izmaiņas 1440 min posmā un veikts rezultātu novērtējums.



3.14. att. H, HW un W paraugu 24 h masas izmaiņas ūdenī.

H paraugu masas izmaiņas pirmajās 15 min ir straujākās un sasniedz 205% jeb parauga masa no sākotnējās masas palielinās trīs reizes, (3.14. att.). Turpinot eksperimentu pēc pirmajām 15 min, tālāko 5 h laikā masas izmaiņas ir 18% robežās. Laika posmā no 120 līdz 1440 min masa palielinās vēl par 4 g, kas ir 20% no sākuma masas. Kopumā 24 h laikā masas izmaiņas ir 343% .

HW paraugiem masas izmaiņas pēc pirmajām 15 min palielinās par 239% jeb masa pieauga $3,4$ reizes. Turpmākajās 120 min masas pieaugums ir ļoti minimāls, līdz 3% . Paraugu masas izmaiņas 24 h palielinājās $3,7$ reizes un vidēji tas ir par 268% . Kopumā paraugs ūdeni uzsūc lielā apjomā, bet tas nedalās frakcijās un labi turas kopā.

W paraugiem pieaugums, salīdzinot ar pārējām paraugu grupām, ir lielākais, sasniedzot 272% no sākotnējās masas jeb 24 h laikā masas izmaiņas palielinās par $3,8$ reizēm. Galvenais masas pieaugums vērojams pirmajās 15 min un, turpinot testu masas izmaiņas, atšķirība pēc 24 h ir neliela, jo paraugi uzsūca visu mitrumu jau sākotnēji.

H paraugu biezuma izmaiņas ir notikušas viskrasāk, salīdzinot ar visām paraugu grupām (3.15. att.). Pirmās 15 min parauga biezums palielinājies par 71% no sākotnējā biezuma.

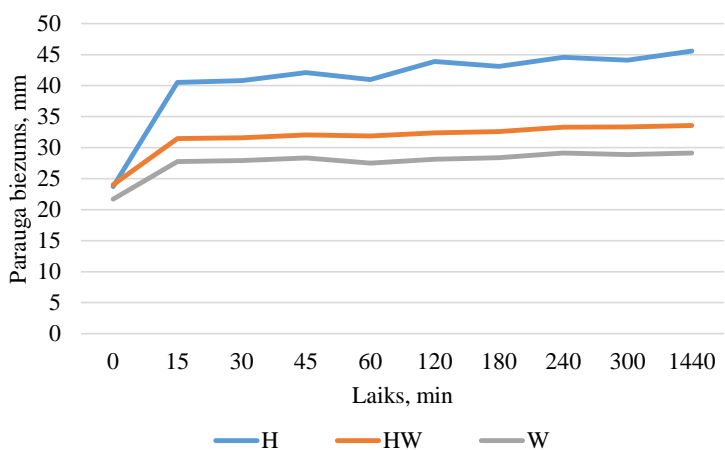
Turpinot mērit biežuma izmaiņas, pirmās 300 min vidēji biežums mainījās vairs par 4–12 % jeb 1–3 mm, tādas pašas izmaiņas bija laika posmā no 120–1440 min. Šī eksperimenta laikā parauga biežumi palielinājās vidēji par 192 % jeb gandrīz divas reizes no sākotnējā biežuma.

Vizuāli novērojot paraugus, tie jau pirmajās 15 min bija ļoti strauji uzņēmuši mitrumu, paraugi dažādos virzienos strauji un nevienmērīgi izmainīja ģeometriju, lielākajai daļai paraugu atdalījās frakcijas, dažiem lielāki gabali un pāris paraugi pat sadalījās uz pusēm, neveiksmīgi tos izņemot no trauka mērījumiem eksperimenta laikā.

HW paraugiem biežuma izmaiņas salīdzinoši ar masas izmaiņām nav tik krasas, kopumā mainījies biežums par nepilniem 10 mm, kas ir 40 % no sākotnējā biežuma. Krasākās biežuma izmaiņas paraugiem bija pirmajās 15 min, kur paraugu biežums mainījās vidēji par 31 %.

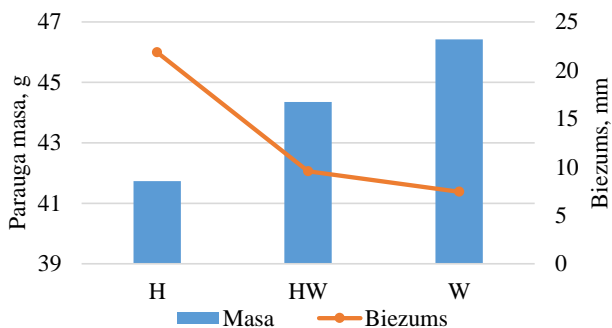
Vizuāli šie paraugi ir mainījuši biežumu, bet diezgan labi turas kopā, bet, ņemot vērā tā mitruma uzņemšanas apjomu, nav paredzēts telpām ar tiešu ūdens saskari, vai lielu mitrumu.

W paraugu izmaiņas vērojams kopumā vidēji tikai 7,5 mm pieaugums, kas ir nepilni 34 %. Šai paraugu grupai biežuma pieaugums pa stundām ir mazāks par 1 mm, kas norāda to, ka tieši šie paraugi ir visizturīgākie pret uzbrišanu. Vizuāli šie paraugi, lai gan uzņem pēc aprēķiniem vislielāko masu, vismazāk izmaina savu ģeometrisko stāvokli un pēc vizuālā izskata var secināt, ka tie nedaudz mainījuši biežumu, bet neko citu.



3.15. att. H, HW un W paraugu 24 h biežuma izmaiņas ūdenī.

Kopumā veicot 24 h uzsūktspējas un uzbrišanas novērtējumu (3.16. att.), tika secināts, ka vislielākais masas pieaugums ir W paraugiem sasniedzot 46 g, bet mazākais H – sasniedzot 41 g paraugiem. Visi paraugi ir veidoti no frakcijām robežās no 500 līdz 5600 μm , poraini un ar ūdenī šķīstošu saistvielu, kas jau pēc teorijas nav paredzēti ilgstošai ūdens pakļaušanai. Bet ir ļoti vērtīgi zināt ar iespēju prognozēt, kas notiks, piemēram, ar sienas paneļiem, ja telpa applūdis vai būs konstantā saskarsmē ar lielu mitruma apjomu.

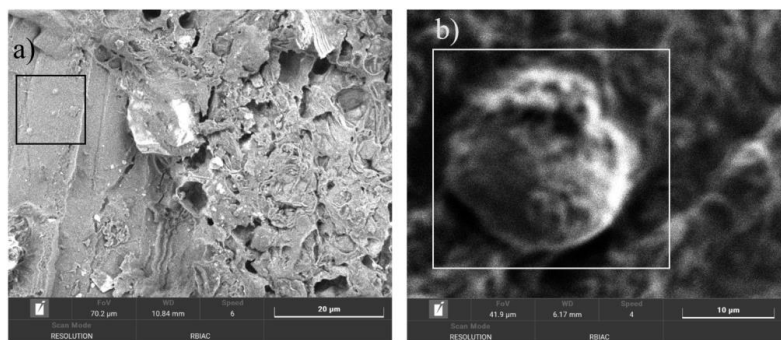


3.16. att. H, HW un W paraugu biezuma un masas izmaiņas 24 h ūdenī.

Vizuāli vērojot paraugus, kaņepju spaļu plātne nespēj kopā saturēt frakcijas un ūdenī viegli uzbriest, un no paraugiem atdalās daļiņas, kā arī biezuma izmaiņas bija ļoti krasas, kā ietekmē paraugs, nespējot uzņemt vienmērīgi mitrumu, ātri uzbrieda un tas noritēja nevienmērīgi jeb deformējot paraugu formu. Paraugi, kuros bija koka skaidas, biezumu mainīja daudz mazāk un vienmērīgāk. Šis tests parādīja, ka koka skaidas vērts likt visās plātnēs, bet nepieciešams veikt papildus testus, lai novērotu no kāda procentuālā daudzuma skaidas piešķir plātnēm stabilitāti, uzņemot mitrumu.

3.3.4. Skenējošā elektronu mikroskopija

Sagatavotajiem paraugiem veikta skenējošā elektronu mikroskopija, kur 3.17. attēlā redzams kaņepju spaļa šķiedru kūlis un saistviela, bet atzīmētajās vietās – a) neliela izmēra mikrokapsulas uz kaņepju spaļa virsmas; turpretī – b) atzīmētajā vietā ~15 μm liela mikrokapsula.



3.17. att. SEM attēlos PCM materiāla atrašanās vieta paraugos.

3.4. Izolācijas plātnes ekspluatācijas īpašības

Darba ietvaros veikts plātņu paraugu termisko, fizikāli ķīmisko, akustisko un mehānisko īpašību noteikšana un analizēšana.

3.4.1. Termiskās īpašības

Kā būtisks plātņu novērtēšanas posms ir to termisko īpašību noteikšana. Viena no precīzākajām un visplašāk izmantotajām mērīšanas metodēm ir siltuma plūsmas mērītāja izmantošana. Plātņu paraugiem aprēķinātas siltumvadītspējas, siltumietilpības un siltumpretestības vērtības, nosakot plātņu veiktspējas īpašības un novērtējot *PCM* ietekmi uz tām.

3.4.1.1. Siltumvadītspēja

Atbilstoši standartiem veikti siltumvadītspējas testi, un pēc iegūtajiem aprēķiniem un rezultātiem tie analizēti.

3.5. tabula

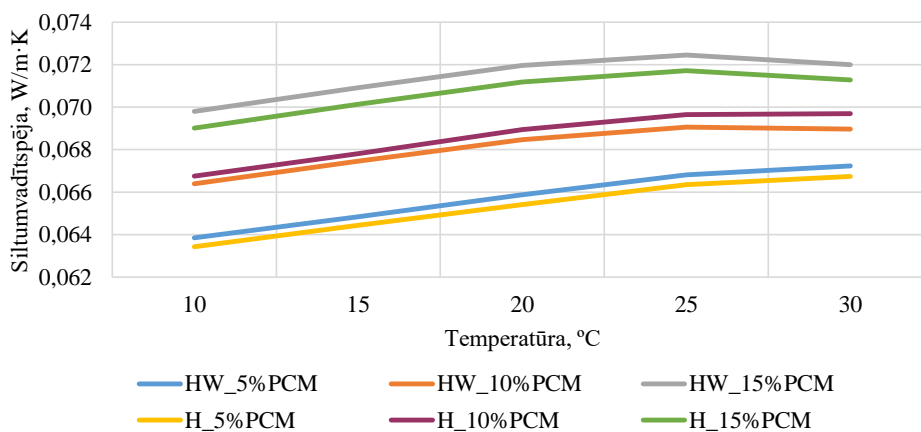
Siltumvadītspējas rezultāti un paraugu grupu kļūdas pielaiide

Paraugu grupas	Biezums, mm	Blīvums, kg/m ³	Siltumvadītspējas koeficients λ , W/m·K				
			10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
HW_5%PCM	25,15	284	0,064	0,065	0,066	0,067	0,067
± W/m·K			0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
HW_10%PCM	24,75	303	0,066	0,067	0,068	0,069	0,069
± W/m·K			0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
HW_15%PCM	24,45	316	0,070	0,071	0,072	0,072	0,072
± W/m·K			0,002	0,002	0,002	0,001	0,002
H_5%PCM	26,03	273	0,063	0,064	0,065	0,066	0,067
± W/m·K			0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
H_10%PCM	24,98	296	0,067	0,068	0,069	0,070	0,070
± W/m·K			0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
H_15%PCM	25,03	307	0,069	0,070	0,071	0,072	0,071
± W/m·K			0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
W	25,00	275	0,062	0,063	0,064	0,065	0,066
HW	24,00	296	0,066	0,066	0,067	0,069	
H	22,00	315	0,062	0,063	0,064	0,066	

Paraugu siltumvadītspējas koeficients noteikts temperatūrā, kas ir 10–30 °C amplitūdā ar intervālu 5 °C. Kā redzams 3.18. attēlā, 10–20 °C temperatūrā lambda paraugiem ar 10 % un 15 % *PCM* palielinās lineāri proporcionāli, savukārt paraugam ar 5 % – lineāri proporcionāli līdz 25 °C. Paraugiem ar 10 % un 15 % *PCM* pēc 20 °C vērojamas krasākas svārstības rezultātos, turpretī ar 5 % *PCM* svārstības sākas tikai 25 °C temperatūrā. Var secināt, ka paraugā ir lielāks *PCM* apjoms, jo svārstības ir lielākas, kas skaidrojams ar to, ka pie lielāka *PCM* apjoma ir lielāks ūdens bāzes dispersijas apjoms paraugā. Līdz 20 °C izdalās parauga mitrums, kas ietekmē lambda koeficientu, pēc 20 °C materiāla mitrums ir stabilizējies, un lambda koeficients uzlabojas vidēji par 1,41 %

Izvērtējot paraugus bez *PCM* piejaukuma 20 °C temperatūrā, labāko rezultātu uzrāda paraugs ar kaņepju spaljiem un garenfrēzēšanas skaidām, sasniedzot 0,064 W/m·K. Veidojot

parauga struktūru, izmantojot maisījumu 50 % kaņepju spaļus un 50 % koksnes garenfrēzēšanas skaidas, rezultāts samazinās par 4,69 %, veidojot 0,067 W/m·K.



3.18. att. Siltumvadītspējas vidējie rezultāti paraugu grupām ar mainīgu *PCM* sastāvu.

20 °C temperatūrā, nosakot siltumvadītspējas koeficientu, paraugiem ar pievienotu *PCM*, labākais rezultāts (zemākā lambda) ir kaņepju spaļu paraugam ar 5 % *PCM*, kam siltumvadītspējas koeficients λ ir 0,065 W/m·K, turklāt šim paraugam ir arī vislielākais biežums 26 mm un mazākais blīvums 273 kg/m³, kas piešķir materiālam labāku porainību un siltumvadītspēju. Ļoti tuvs rezultāts ir HW_5%PCM, kam siltumvadītspējas koeficients λ = 0,066 W/m·K ar līdzīgu blīvumu kā H_5%PCM. No visiem paraugiem augstākā siltumvadītspēja 0,07 W/m·K ir paraugu grupām H_15%PCM un HW_15%PCM ar augstāko blīvumu 308–316 kg/m³.

Analizējot rezultātus 3.5. tabulā un 3.18. attēlā, var novērot, ka mazāks siltumvadītspējas koeficients jeb labāka siltumizolācija ir paraugiem bez *PCM*, pieliekot kapsulas, λ palielinās, kas izteikti novērojams HW paraugu grupai. Palielinoties temperatūrai, visos variantos palielinās λ . Labāka siltumvadītspēja pie līdzīga blīvuma ir H grupas paraugiem, salīdzinot ar HW grupas paraugiem, kas ir saistīts gan ar to, ka kaņepju spaļiem ir labāka siltumvadītspēja nekā kokam, kā arī tas, ka kaņepju spaļi rada poraināku materiāla struktūru paraugā nekā skaidas.

3.4.1.2. Siltumietilpība

Atbilstoši standartam veikto siltumietilpības testu rezultāti atspoguļoti 3.6. tabulā iekļaujot, gan mērījumu rezultātā iegūtās, gan aprēķinātās siltumietilpības vidējās vērtības, pieņemot ticamības varbūtību 0,95, relatīvā vērtējumu kļūda nepārsniedz 5 %.

Siltumietilpības rezultātu analīzes pamatā ņemta informācija par *PCM* kušanas temperatūras amplitūdu, kas ir 23–28 °C. Kā redzams 3.19. attēlā, tad pie temperatūras 15 °C un 35 °C *PCM* aktivitāte nav novērojama, un izmaiņas rezultātos abās materiālu grupās temperatūras diapazonā HW un H ir 7 %, bet vienas materiālu grupas ietvaros atšķirības starp

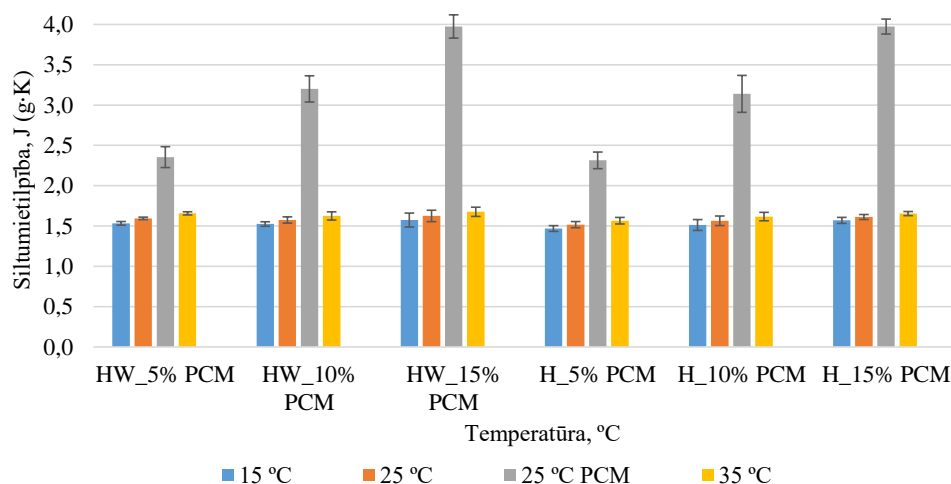
PCM apjomu paraugos ir 2 % apjomā. HW materiālu grupas siltumietilpība ir par 4 % lielāka kā H grupas paraugiem.

3.6. tabula

Paraugu grupas	Siltumietilpība, J/(g·K)					
	HW_5% PCM	HW_10% PCM	HW_15% PCM	H_5% PCM	H_10% PCM	H_15% PCM
15 °C	1,53	1,52	1,57	1,47	1,51	1,57
± J/(g·K)	0,02	0,03	0,09	0,04	0,07	0,04
25 °C	1,59	1,57	1,62	1,52	1,56	1,61
± J/(g·K)	0,02	0,04	0,07	0,04	0,06	0,03
25 °C PCM	2,35	3,20	3,97	2,31	3,14	3,97
± J/(g·K)	0,13	0,16	0,14	0,10	0,23	0,09
35 °C	1,66	1,62	1,68	1,57	1,62	1,65
± J/(g·K)	0,02	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03

Lai indikatīvi saprastu kāda siltumietilpības vērtība ir paraugiem ar PCM pie 25 °C temperatūras, to aprēķina kā vidēji svērtu vērtību starp 15 °C un 35 °C. Iegūtā lineāra sakarība liecina, ka visa parauga ietvaros siltumietilpība palielinās proporcionāli temperatūrai.

Analizējot rezultātus, ja nebūtu pievienots PCM, materiāla siltumietilpība, vidēji uz katriem 10 °C palielinātos 3–4 %. Starp 15 °C un 25 °C temperatūras siltumietilpība visām sešām paraugu grupām palielinājās robežās starp 3–4 % un starp 25 un 35 °C arī 3–4 %, kas ir salīdzinoši vienmērīgs materiāla siltumietilpības palielinājums temperatūrai paaugstinoties.



3.19. att. Paraugu siltumietilpības izmaiņas pie dažāda PCM apjoma 25 °C un šo paraugu aprēķinātās siltumietilpības vidējās vērtības un standartnovirze.

3.19. attēlā redzama izteikta siltumietilpības palielināšanās tieši 25 °C temperatūrā, kas sakrīt ar PCM kapsulu kušanas temperatūru gan materiālu grupās, gan arī vienas grupas

ietvaros, palielinoties *PCM* apjomam palielinās siltumietilpības apjoms. Materiālu grupās HW un H, palielinoties *PCM* apjomam par 5 %, siltumietilpības rādītājs palielinās vidēji 1,3 reizes, pie 15 % apjoma sasniedzot 3,97 J/(g·K).

Salīdzinot rezultātus HW grupā starp 15 °C, kad *PCM* nedarbojas, un 25 °C, kad *PCM* darbojas, vērojamas šādas izmaiņas: pie 5 % *PCM* materiāla siltumietilpība palielinās par 54 %, pie 10 % *PCM* ietilpība palielinās 2,1 reizi, pie 15 % *PCM* ietilpība palielinās no 1,57 J/(g·K) līdz 3,97 J/(g·K), sasniedzot 2,53 reizes lielu pieaugumu. H grupas paraugiem ir identiskas izmaiņas, vienīgi pie 5 % *PCM* apjoma ietilpība palielinās par 57 % no 1,47 līdz 2,31 J/(g·K), bet pie HW grupas paraugiem siltumietilpība ir 1,53 J/(g·K), kas ir par 7 % mazāk.

Salīdzinot paraugu datus 25 °C temperatūrā, ar datiem, kad *PCM* veikspēja aktivizējas, un materiālu aprēķinātās siltumietilpības lielumu, vērojama *PCM* siltumietilpības palielināšanās no 1,48 līdz 2,47 reizēm. Pie 5 % *PCM* HW grupai ietilpība palielinās par 48 %, H grupai – par 47 %, pie 10 % *PCM* siltumietilpība HW grupai palielinās 2,03 reizes, H grupai – 2,01 reizi, pie 15 % *PCM* W grupas siltumietilpība palielinās 2,45 reizes, H grupai – 2,47 reizes. Nosakot ietilpības palielināšanos 25 °C temperatūrā ar dažādu procentuālo *PCM* sastāvu, redzams, ka paraugu siltumietilpību var palielināt līdz pat 2,5 reizēm.

3.4.1.3. Siltumpretestība

Paraugu siltumpretestība (R) aprēķināta atbilstoši 1.7.vienādojumam, temperatūru intervālā no 10 līdz 30 °C. Pēc iegūtajiem datiem izveidotajā grafikā (3.20. att.) uzskatāmi redzams, kurām paraugu grupām ir labāka siltumpretestība, tātad labāka izolācijas spēja salīdzinot ar citām paraugu grupām, kā arī 3.7. tabulā ir norādītas vidējās siltumpretestības un to novērtēšanas absolūtās kļūdas.

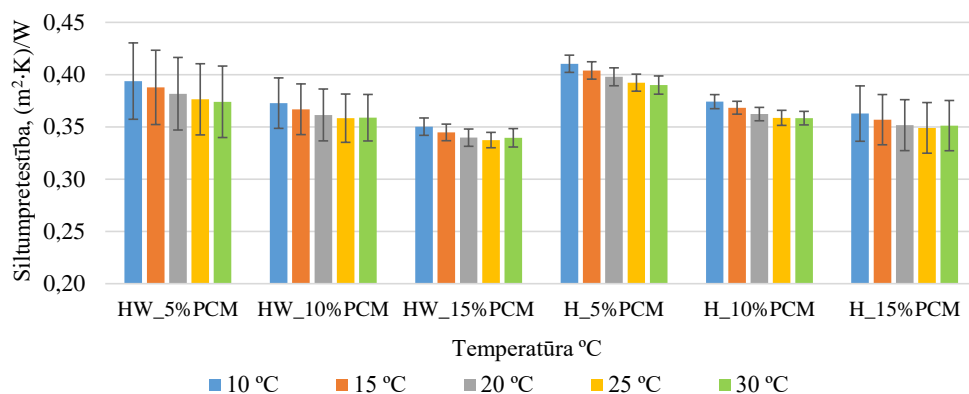
3.7. tabula

HW un H paraugu siltumpretestība

Paraugu grupas	Siltumpretestība (m ² ·K)/W				
	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
HW_5%PCM	0,394	0,388	0,382	0,376	0,374
± (m ² ·K)/W	0,037	0,036	0,035	0,034	0,034
HW_10%PCM	0,373	0,367	0,361	0,358	0,359
± (m ² ·K)/W	0,024	0,024	0,025	0,023	0,022
HW_15%PCM	0,350	0,345	0,340	0,337	0,340
± (m ² ·K)/W	0,008	0,008	0,008	0,007	0,009
H_5%PCM	0,410	0,404	0,398	0,392	0,390
± (m ² ·K)/W	0,008	0,008	0,009	0,008	0,009
H_10%PCM	0,374	0,368	0,362	0,359	0,358
± (m ² ·K)/W	0,007	0,006	0,006	0,007	0,006
H_15%PCM	0,363	0,357	0,352	0,349	0,351
± (m ² ·K)/W	0,026	0,024	0,024	0,024	0,024

3.20. attēlā redzams, ka H paraugu siltumpretestības, *PCM* saturam mainoties 5–15 % robežās, pārsniedz visā diapazonā atbilstošās HW vidējās vērtības par 3,9 līdz

4,1 procentpunktiem. Palielinoties temperatūrai, visu testēto variantu vidējā siltumpretestība samazinās, HW_5%PCM (rel. kl. > 9 %) un HW_10%PCM, kā arī H_15%PCM (rel. kl. ~ 7 %) variantiem ir liela mērījumu izkliede, kas, iespējams, saistīta ar nevienmērīgu materiālu komponentu daļiņu izkliedi paraugu šķērsgriezumā, kā arī skaidrojams ar nelielu paraugu daudzumu katrā grupā, radot absolūto kļūdu 0,02–0,04 apjomā. H paraugu vidējā siltumpretestība apskatīto temperatūru diapazonā samazinās par 4,9 %; savukārt HW – par 5,1 %, un šīs atšķirības nav uzskatāmas par būtiskām.

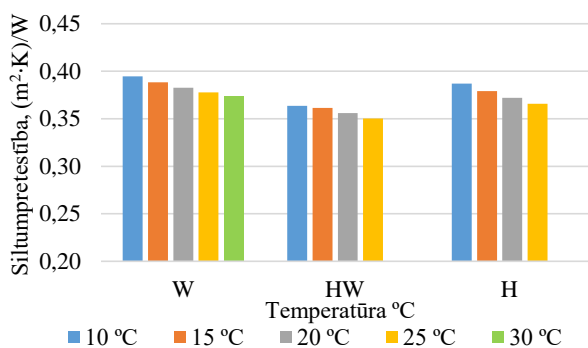


3.20. att. Siltumpretestības rezultāti pie dažādām temperatūrām

Kopumā augstākie rezultāti ir H_5% grupai, R ir 0,39–0,41 ($m^2 \cdot K/W$), ar mazāko blīvumu no visām paraugu grupām vislabāk telpā nodrošinātu izolācijas īpašības. Nākamais materiāls ar augstāko rezultātu ir HW_5%, kas skaidrojams arī ar sakarību starp blīvumu un siltumvadītspējas īpašībām, kas abām paraugu grupām ar 5 % PCM piejaukumu ir vislabākās.

Ar 10 % PCM piejaukumu abu grupu materiālu īpašības ir praktiski vienādas, sasniedzot 0,37 ($m^2 \cdot K/W$). Pie 15 % PCM piejaukuma sasniedz rezultātu 0,36 ($m^2 \cdot K/W$), ar nedaudz sliktāku rezultātu HW_15%PCM grupa ar rezultātu 0,35 ($m^2 \cdot K/W$).

Kopumā pretestības rezultāts ir robežās 0,34–0,41 ($m^2 \cdot K/W$), no kuriem nedaudz augstākus rezultātus parādīja kaņepju paraugu grupa – 0,35–0,41 ($m^2 \cdot K/W$).



3.21. att. Siltumpretestības rezultāti pie dažādām temperatūrām.

3.21. attēlā redzami siltumpretestības rezultāti paraugiem W, HW un H bez *PCM* piejaukuma. Rezultāti H un W grupās ir proporcionāli, W rezultāti ir augstāki nekā H. Apvienojot šos abus materiālus, to siltumpretestības īpašība samazinās par 4 %. HW_5%PCM rezultāts ir praktiski vienāds W paraugu rezultātam. HW ir 3 % atšķirība no H_15%PCM rezultāta.

3.4.2. Fizikāli ķīmiskās īpašības

Būtisks aspekts ir plātņu uzliesmošanas īpašību noteikšana un *PCM* ietekme uz kopējiem rezultātiem. Kā jau minēts iepriekš, fāzmaiņu materiāliem pastāv uzliesmošanas risks, un, iestrādājot *PCM* iekšējo sienu apdares plātnēs, nav novērtēta to ugunsreakcija. Iegūtos rezultātus projektētāji var izmantot, lai līdzsvarotu potenciālo enerģijas ietaupījumu, izmantojot *PCM*, ar pilnīgāku izpratni un paredzamību par saistīto ugunsgrēka risku, lietojot piedāvātās plātnes. Tas ļauj arī lietot atbilstošas riska mazināšanas stratēģijas.

3.4.2.1. Ugunsreakcijas tests

Materiālu ugunsreakcijas īpašības noteiktas ar konisko kalorimetru, un degšanas procesā iegūti rezultāti paraugu grupām H un H_10%PCM. Abas paraugu grupas savā starpā ar rezultātiem ir līdzīgas, tāpēc tālākie dati ir atbilstoši analizēti un salīdzināti H_10%PCM pret H iegūtajiem datiem, lai saprastu materiāla īpašības degot un *PCM* ietekmi uz degšanas īpašībām.

3.8. tabula

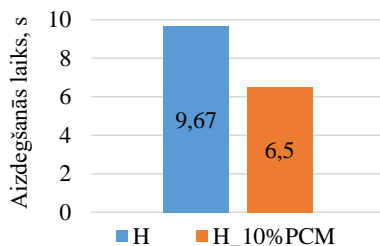
Materiālu ugunsreakcijas īpašības

	H	H_10%PCM
Apkārtējais spiediens kPa	102,20	102,15
Kopējais izdalītais siltuma daudzums, MJ/m²	45,00	51,85
Kopējais patērētais skābeklis, g	28,13	32,2
Masas zudums, g/m²	4369,53	4326,75
Vidējais specifiskais masas zuduma koeficients, g/(s·m²)	6,97	6,89
Kopējais izdalītais dūmu daudzums, m²	0,27	0,40
MARHE, kW/m²	101,83	117,95

3.8. tabulā attēloti rezultāti, kur abu paraugu grupu siltuma atdeve ir līdzīga, bet H_10%PCM grupai ir par 6 MJ/m² vai 15 % augstāka siltuma atdeve nekā H grupai.

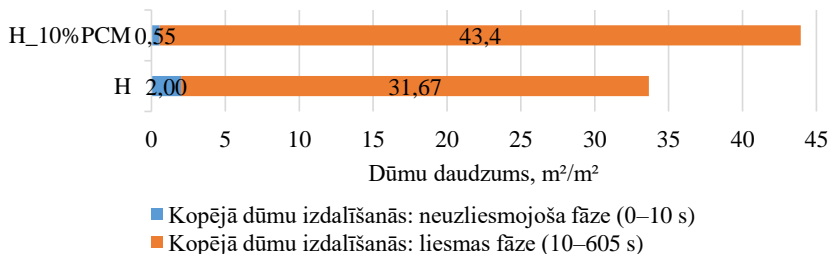
Abām paraugu grupām kopējais izdalītais siltuma daudzums ir robežās no 45 līdz 51 MJ/m², bet patērētais skābeklis ir robežās no 28 līdz 32 g, kur H_10%PCM grupai salīdzinājumā ar H grupas paraugiem skābeklis ir patērēts par 14 % jeb 4,5 g vairāk. Tas būtu skaidrojams ar papildus izejvielas piejaukumu, kam arī nepieciešams vairāk skābekļa sadegšanai.

Abām paraugu grupām masas zuduma atšķirība ir 1 % robežās. Paraugu grupām specifiskais zuduma koeficients atšķiras par 0,3 %, kur H grupai zudums ir 6,89 g/(s·m²), bet H_10%PCM grupai zudums ir 6,97 g/(s·m²).



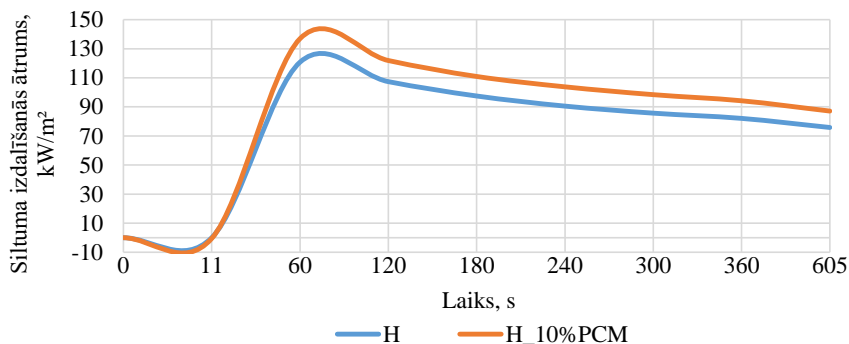
3.22. att. Paraugu aizdegšanās laiks.

Paraugi ar *PCM* sastāvā aizdegās 1,49 reizes ātrāk nekā paraugi bez *PCM*, un tas nozīmē, ka kapsulas veicina paraugu degšanu un ir jādodomā par papildu aizsardzību pret aizdegšanos. H paraugu grupa aizdegās pēc 9,67 s, savukārt H_10%PCM grupa – pēc 6,5 s (3.22. att.).



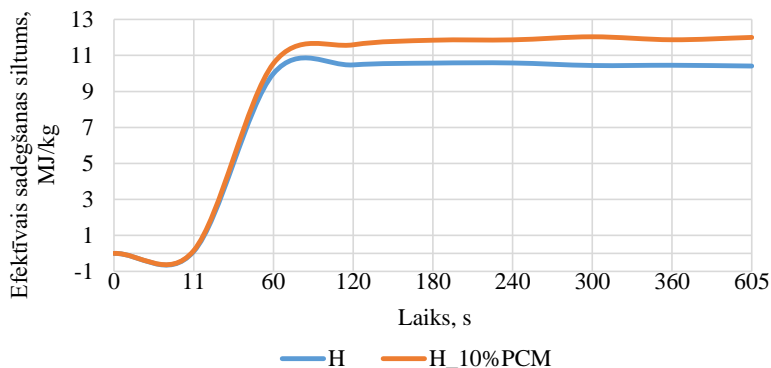
3.23. att. Paraugu dūmu daudzums.

Dūmu izdalīšanās degšanas rezultātā kopējais dūmu daudzums laika posmā 0–605 s ir: H grupai – 33,70 m²/m²; H_10%PCM grupai – 43,95 m²/m². Tas ir, visa testa laikā H_10%PCM, salīdzinot ar H grupu, izdalīja par 30 % vairāk dūmu. H paraugu grupa pirmajās 10 s, kas ir neuzliesmojošā fāzē, izdalīja 3,6 reizes vairāk dūmu nekā H_10%PCM paraugu grupa. Savukārt laika posmā 10–605 s, tas ir, liesmu fāzē, 1,4 reizes vairāk dūmus izdalīja paraugi ar *PCM* sastāvu: H grupa – 31,67, H_10%PCM grupa – 43,4 m²/m². No iegūtajiem rezultātiem secināts, ka dūmu daudzumu ietekmē *PCM* sastāvs paraugos (3.23. att.).



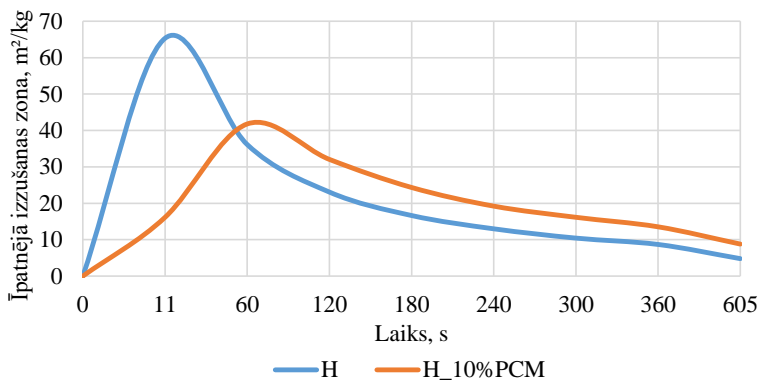
3.24. att. Siltuma izdalīšanās ātrums.

Analizējot siltuma izdalīšanās datus, secināms, ka paraugu grupai ar *PCM* pie 60 s rezultāts ir lielāks – 136,92 kW/m², savukārt H grupai – 120,7 kW/m², kas ar līdzvērtīgu rezultātu starpību arī samazinājās, iegūstot to, ka 605 s joprojām lielāks siltuma izdalīšanās ātrums 87,11 kW/m² pret H grupu 75,82 kW/m² (3.24. att.).



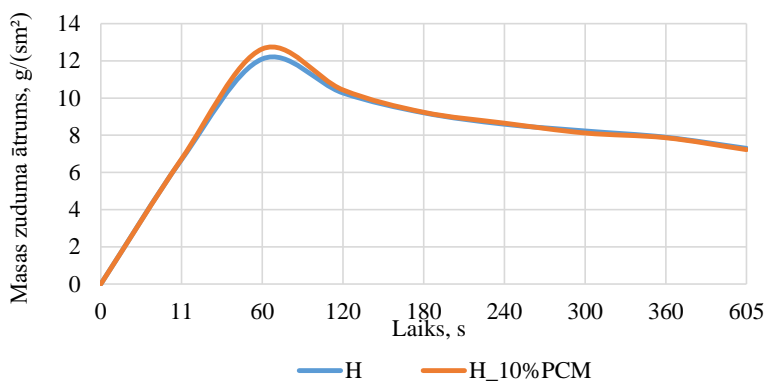
3.25. att. Efektīvais sadegšanas siltums.

3.25. attēlā redzami efektīvā sadegšanas siltuma rezultāti, kur pirmajās 60 s sadegšanas siltums izdalās strauji, pēc 10 s, iestājoties degšanas fāzei, sadegšanas siltums līdz 60 s strauji palielinās. Laika posmā no 60 s līdz 605 s notiek izmaiņas, nostabilizējoties rezultātam, iegūstot: H_10%PCM grupai – 12 MJ/kg, H grupai –10,41 MJ/kg.



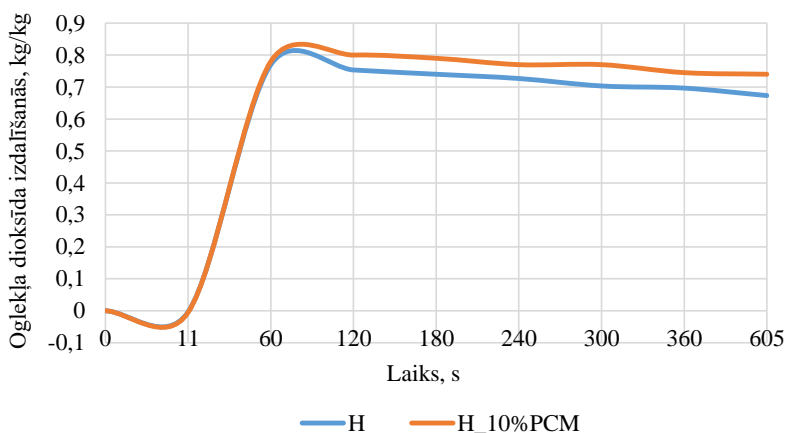
3.26. att. Īpatnējās izžušanas koeficients.

Īpatnējās izžušanas koeficients ir krasi atšķirīgs abām grupām, kā redzams 3.26. attēlā, grupai ar *PCM* tas notiek lēnāk un vienmērīgāk pirmajās 60 s, sasniedzot maksimālo vērtību 41,78 m²/kg, un pēc tam šī vērtība vienmērīgi samazinās. Savukārt H grupas paraugiem maksimālā vērtība sasniegta jau pirmajās 11 s, sasniedzot 65,3 m²/kg, un līdz 60 s jau strauji krītas, tālāk vienmērīgi samazinoties. H grupas vērtība pirmajās 11 s sasniedz četras reizes augstāku īpatnējās izžušanas koeficientu.



3.27. att. Masas zuduma koeficients.

Masas zuduma mērijumus izmanto, lai analizētu gruzdēšanas attīstību kaņepju spaļu izolācijas plātnē. Masas zuduma ātrums strauji sasniedz maksimumu H grupai $12,1 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, H_10%PCM grupai $12,64 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$. Masas zudums abām paraugu grupām sāk samazināties no 60 s, un tas turpina samazināties līdzvērtīgi atlikušo pārbaudes laiku. Lielākā daļa no kopējā masas zuduma ir uz leju vērstā gruzdēšanas režīma laikā, neskatoties uz reģistrēto zemo izdalīšanās temperatūru. Tas ir tāpēc, ka sākotnējā degšana ietver pirolīzes procesu, kura laikā lielākā daļa masas tiek zaudēta, tālākā procesā notiek pārogļošanās oksidēšanās reakcijas, līdz ar to masas zudums ir mazāks (3.27. att.).



3.28. att. Oglekļa dioksīda izdalīšanās.

Pirmajās 60 s ir straujākais degšanas process, kura laikā izdalās oglekļa dioksīds (CO_2). Vērojams, ka turpmākajā degšanas procesā izdalītais CO_2 daudzums samazinās. H_10%PCM grupas rezultāti ir nedaudz augstāki, ko varētu ietekmēt pievienotā mikroiekapsulētā PCM dispersija (3.28. att.).

3.4.3. Akustiskās īpašības

Trokšņa piesārņojums uzskatāms par stresa faktoru, kas var ilgstoši nelabvēlīgi ietekmēt cilvēka veselību. Porainus, absorbējošus materiālus izmanto dažādu skaņu un trokšņu pasīvai kontrolei. Zinot tehnisko kaņepju spaļu augsto porainību, ir būtiski noteikt izgatavotās plātnes akustiskās īpašības. Paraugiem noteiktas akustiskās īpašības, nosakot, vai materiāls ir skaņas absorbents, aprēķināts skaņas absorbcijas un NRC koeficienti, noteikta absorbcijas klase.

3.4.3.1. Skaņas absorbcijas koeficients, skaņas absorbcijas klases, NRC koeficients

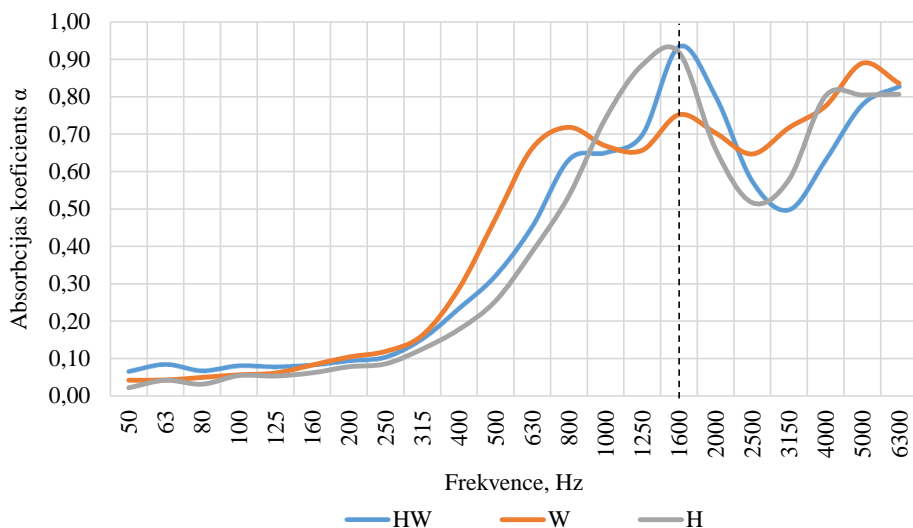
Pēc testa veikšanas iegūtie dati apstrādāti datorprogrammā "Pulse" un apkopoti 3.9. tabulā. Veicot eksperimentu, ir definēts, ka paraugs sāk darboties kā absorbents diapazonā virs 500 Hz. Iemesls tam, ka materiāls neslāpē skaņu zem 500 Hz ir materiāla īpašība. Tā kā materiāls ir neviendabīgs, salīdzinoši porains, paraugi savā starpā atšķiras ar materiāla iekšējo struktūru, kāda ir frakciju orientācija pret skaņas vilni, šo faktoru kopums ietekmē materiāla absorbciju, kas ietekmē mērījumu rezultātus.

3.9. tabula

Skaņas absorbcijas koeficienti

Paraugu grupa	HW		W		H	
Frekvence f (Hz)	Skaņas absorbcijas koeficients					
	Vidēji	±	Vidēji	±	Vidēji	±
50	0,07	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03
250	0,10	0,02	0,12	0,04	0,09	0,01
500	0,32	0,05	0,47	0,09	0,25	0,07
1000	0,65	0,08	0,67	0,22	0,74	0,07
2000	0,80	0,10	0,70	0,36	0,66	0,14
4000	0,63	0,17	0,78	0,16	0,80	0,11
6300	0,83	0,08	0,84	0,12	0,81	0,19

Skaņu absorbcijas testos vērojama rezultātu nevienmērība, kas skaidrojama gan ar materiālu struktūru atšķirībām, gan ar materiālu paraugu sagatavošanu un to novietojumu impedances caurulē. Rezultātu novirzi rada tas, ka konkrētajai iekārtai, lai iegūtu plašu frekvenču diapazonu, jāveido divu izmēra paraugi. Iegūtie rezultāti datorprogrammā jāsavieno vienā grafikā. Datu apvienošanu vienā grafikā var manīt pie 1600 Hz, kas ar raustītu līniju iezīmēts 3.17. attēlā. Datus analizējot, var secināt, ka blīvums ietekmē absorbcijas pakāpi un ka ir liela rezultātu izkliede, bet kopumā konkrētās frekvencēs īpašību tendences saglabājas.



3.29. att. Paraugu HW, W un H grupu vidējie absorbcijas koeficienta α 1/3 oktāvu frekvenču joslu rezultāti.

HW paraugu grupai (3.29. att.) materiālu var uzskatīt par absorbējošu, absorbcijas koeficients ir virs 0,5, sākot no ~ 650 Hz frekvencē. Izstrādātais materiāls līdz 400 Hz galvenokārt ir atstarojošs. Absorbcijas līkne aug līdz 1600 Hz, sasniedzot augstāko vērtību 0,93. Tālāk līknei veidojas absorbcijas samazinājums līdz 3150 Hz, iegūstot 0,5 vērtību, kur absorbcija atkal palielinās, 5000–6300 Hz frekvences posmā sasniedzot absorbcijas koeficientu 0,78 līdz 0,83 robežās. Starp paraugiem HW grupā ir nelielas atšķirības, lielākās atšķirības ir ap 4000 Hz, kur absolūtā nevienmērība sasniedz 0,17.

W grupas paraugi savā starpā uzrāda nevienmērīgus rezultātus, jo šo materiālu grupu vissarežģītāk bija apstrādāt, lai iegūtu maza diametra paraugus, kur arī novērojamas lielas absolūtās kļūdas novirzes 0,12–0,36 – 1000–6300 Hz frekvences apgabalā. W paraugi kā absorbents strādā 550–6300 Hz frekvences joslā ar koeficientu 0,65–0,9.

H paraugu grupas paraugi G, H, I un 7., 8., 9. veido līdzīgus rezultātus, līdz 1500 Hz nepārsniedzot absolūto kļūdu 0,07, savukārt 2000–6300 Hz frekvencē kļūda ir 0,11–0,19. Materiālu var uzskatīt par absorbējošu, sākot ar 700 Hz. Augstāko blīvumu paraugs uzrāda nedaudz zemāku absorbcijas pakāpi. Labākie rezultāti un absorbcijas koeficients ir 0,75–0,95 robežās 1000–2000 Hz un 4000–6300 Hz frekvences diapazonos. Pēc paraugu apvienošanas posmā 1600–3000 Hz absorbcijas koeficients vidēji ir 0,55–0,66.

Visu trīs grupu materiāli kā absorbents strādā līdzīgi, paraugi savā starpā atšķiras nebūtiski, ar koeficienta vērtību virs 0,5 frekvenču joslā no 700 līdz 6300 Hz. Līdz 400 Hz materiāls pamatā ir atstarojošs. Visefektīvākā absorbcija ir frekvencēs 1000–2000 Hz un 4000–6300 Hz. Visvienmērīgāk pēc 500 Hz absorbē W grupas paraugi, H un HW rezultāti ir ļoti līdzīgi. Visu trīs grupu materiālus var saukt par skaņas absorbentiem.

3.10. tabula

Vidējais skaņas absorbcijas koeficients dažādās frekvencēs.

	50–6300 Hz	500–6300 Hz	500–4000 Hz
HW grupa	0,49	0,65	0,60
H grupa	0,48	0,65	0,61
W grupa	0,52	0,69	0,66

Vidējais skaņas absorbcijas koeficients (3.10. tab.) pēc sakrītības H grupai 50–6300 Hz frekvencē ir 0,48, HW grupai – 0,47. Rezultāti ir ļoti līdzvērtīgi, ņemot vērā līdzīgo struktūru un paraugu blīvumu. W grupas rezultāts ir augstāks visās frekvenču joslās, ņemot vērā to, ka šādas struktūras materiāliem novērtē rezultātu augstākā frekvencē, tad H, HW un W paraugiem 500–6300 Hz frekvencē absorbcijas koeficients ir 0,65–0,69 robežās.

NRC koeficients ir noteikts 250–2000 Hz frekvences diapazonā. HW materiālu grupai koeficients ir 0,47, H grupai – 0,44, W grupai – 0,49. Rezultāti ir līdzīgi ar absorbcijas koeficientu 50–6300 Hz frekvencē, bet, ņemot vērā to, ka pie *NRC* aprēķināšanas neņem vērā zemās un augstās frekvences, tad rezultāti nav vienādi.

3.11. tabula

Skaņas absorbcijas klase dažādās frekvencēs

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz					
HW grupa	0,10	–	0,32	D	0,65	C	0,80	B	0,63	C
H grupa	0,09	–	0,25	E	0,74	C	0,66	C	0,80	B
W grupa	0,12	–	0,47	D	0,67	C	0,70	C	0,78	C

Skaņas absorbcijas klase noteikta katrā paraugu grupā, atsevišķi apskatot, kādā frekvencē materiāls vislabāk absorbē, lai noskaidrotu, vai šis izstrādātais materiāls darbojas arī kā absorbcijas materiāls (3.11. tab.).

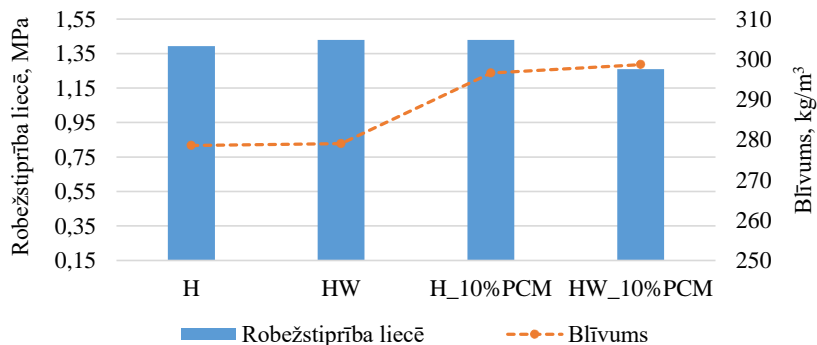
3.4.4. Mehāniskās īpašības

Sagatavotajiem plātņu paraugiem veikti mehānisko īpašību indikatīvi mērījumi, lai noskaidrotu plātnes robežstiprības liecē noturību un skrūvju aksiālās izraušanas pretestību. Šie divi testi raksturo plātņu materiāla lietojumu kā brīvtāvošu elementu un tā fiksācijas iespēju pie sienas ar atbilstošiem stiprinājumiem.

3.4.4.1. Robežstiprība liecē

Robežstiprības tests liecē veikts H un HW paraugiem un paraugu grupām ar pievienotu 10 % *PCM* (3.30. att.), to biezums – 25 mm, blīvums – 278–298 kg/m³ robežās. Salīdzinot H un HW rezultātus, robežstiprība atšķiras 0,04 MPa, labāko rezultātu uzrādot HW paraugiem 1,39 MPa. H un H_10%PCM paraugu grupām rezultāti ir ar 0,04 MPa starpību, sliktāku rezultātu uzrādot paraugiem ar *PCM* sastāvā. Turpretī, salīdzinot paraugus HW un HW_10%PCM, paraugos ar *PCM* vērojams rezultāta samazinājums par 13 %. Lai arī, pievienojot *PCM*, materiāla blīvums palielinās par 7 %, rezultāta kritums skaidrojams ar

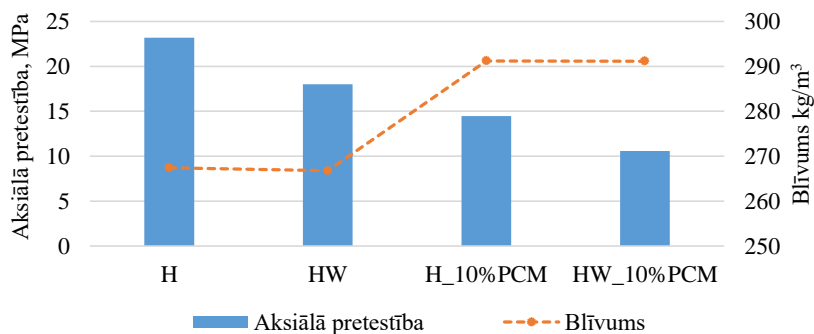
sastāva izmaiņām – saistvielā esošais ūdens daudzums pievienots vairāk, jo *PCM* dispersijas sastāvā arī ir ūdens, kas kopumā ietekmē paraugu stiprību ar garenfrēzēšanas skaidām. Vidējā lieces izturība paraugiem ir salīdzinoši zema – 1,38 MPa, kas nozīmē, ka tos vislabāk ir izmantot rāmju pildīņu konstrukcijās vai slodzi nenesošās konstrukcijās, piemēram, skrūvējot pie stabilas virsmas. Konkrēto materiālu nevar izmantot kā brīvēstāvošu horizontālu elementu.



3.30. att. Robežstiprība liecē.

3.4.4.2. Pretestības noteikšana skrūvju aksiālai izraušanai

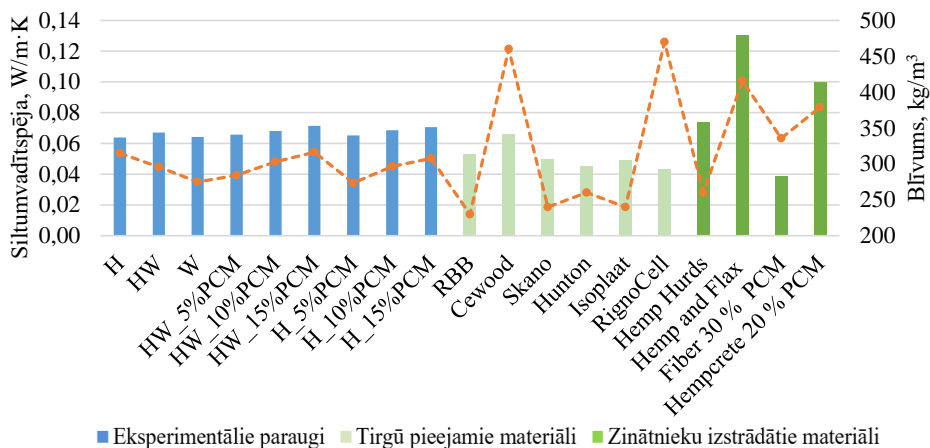
Veicot testu, jau sākotnēji paraugos skrūves skrūvētas, neveicot priekšurbumu, jo materiāls ir zema blīvuma. Pēc 10 % *PCM* pievienošanas paraugiem aksiālās stiprības rezultāts samazinājās 1,6 reizes. Salīdzinot H un HW grupu paraugus, 1,3 reizes izturīgāki ir H grupas paraugi, H sasniedzot 23 MPa, HW – 18 MPa (3.31. att.).



3.31. att. Pretestība skrūvju aksiālai izraušanai.

3.5. Īpašību salīdzinājums ar citiem izolācijas materiāliem

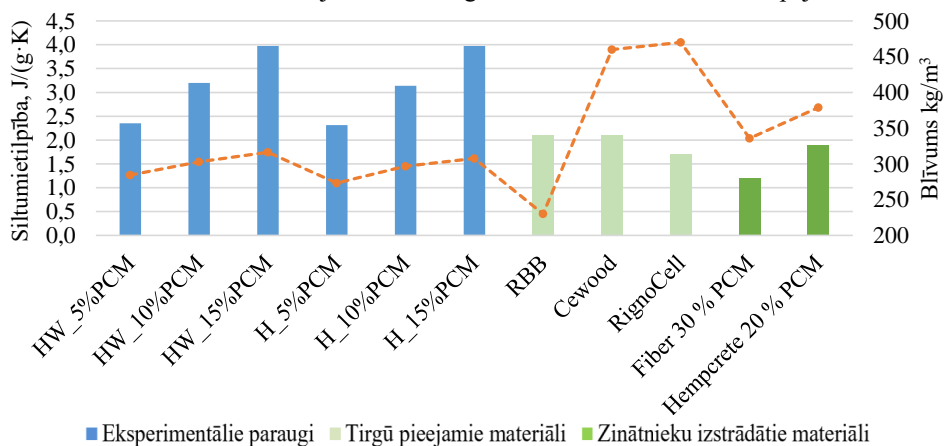
Izpētot tirgū pieejamos izolācijas materiālus un zinātnieku izstrādātos materiālus gan ar *PCM*, gan bez *PCM*, veikta salīdzinošā analīze, lai noteiktu izstrādātā materiāla priekšrocības un vājās vietas. Salīdzināšanai izvēlēti materiāli ar līdzīgiem blīvumiem – tirgū pieejamo materiālu blīvums 230–460 kg/m³ robežās; zinātnieku izstrādāto materiālu blīvums 185–416 kg/m³, autores izstrādāto plātņu blīvums 296–316 kg/m³.



3.32. att. Siltumvadītspējas salīdzinošie dati.

Siltumvadītspēja ir salīdzināta sešiem izolācijas materiāliem (3.32. att.), kas ir iegādājami tirgū, un četriem zinātnieku izstrādātiem materiāliem, no kuriem divos ir iestrādāts *PCM*. Labākie siltumvadītspējas rezultāti ir tirgū pieejamajiem siltumizolācijas materiāliem –0,043–0,053 W/(m·K) robežās. *Cewood* akustikas plātnēm un Lietuvas zinātnieku radītajām kaņepju spaļu plātnēm ar cietes saistvielu ir līdzīgākais rezultāts ar autores izstrādātajiem prototipiem – 0,066–0,074 W/(m·K).

Siltumvadītspējas vidējie rezultāti tirgū ir 0,051 W/(m·K), zinātnieku izstrādātajiem materiāliem – 0,086 W/(m·K), autores izstrādātajiem materiāliem – 0,067 W/(m·K). Siltumvadītspēja autores izstrādātajiem materiāliem, salīdzinot ar tirgū esošajiem materiāliem, ir vidēji par 32 % sliktāka, vairumam materiālu ir zemāks blīvums, taču līdz pat 28 % labāka nekā lielākajai daļai zinātnieku izstrādātajiem materiāliem, kur viena no sastāvdaļām ir lauksaimniecības atlikumi. Vienam no pētniecības materiāliem, kur ģipša kaņepju betonam pievienots 20 % *PCM*, ir novērojama *PCM* negatīva ietekme uz siltumvadītspējas rezultātu.



3.33. att. Siltumietilpības salīdzinošie dati.

3.33. attēlā redzams, ka izstrādātajiem materiāliem ir sasniegta augstāka siltumietilpība ar vidējo rezultātu 3,16 J/(g·K), tirgū pieejamajiem materiāliem vidējā siltumietilpība sasniedz 1,97 J/(g·K), savukārt zinātnieku izstrādātajiem materiāliem – 1,55 J/(g·K).

Siltumietilpība izgatavotajos izolācijas materiālos ar vienādu biezumu un 15 % *PCM* sastāvā ir augstākā, sasniedzot 3,97 J/(g·K), kas ir divas reizes augstāks rezultāts nekā tirgū pieejamajiem materiāliem, kas ir 1,7–2,1 J/(g·K) robežās. Salīdzinot H un HW vidējos rezultātus ar tirgū pieejamajiem materiāliem, iegūtais rezultāts ir par 1,6 reizēm labāks. Salīdzinot labāko autores rezultātu ar zinātnieku izstrādātajiem materiāliem ar 20 % līdz 30 % pievienotu *PCM*, kur iegūtais rezultāts ir 1,2–1,9 J/(g·K) robežās, autores izstrādātās plātnes sasniedz 2,6 reizes labāku rezultātu.

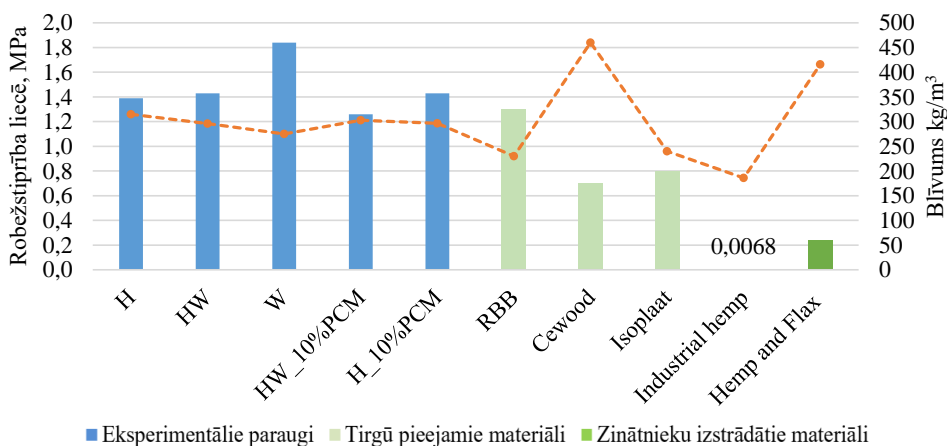
3.12. tabula

Ugunsreakcijas klases salīdzinošie dati

Materiāls	H	Cewood	HW_10%	RBB	ISOPLAAT	SKANO	HUNTON
Ugunsreakcijas klase	B*	B	C*	E	E	E	F

Salīdzinot autores izstrādāto materiālu ar izolācijas materiāliem (3.12. tab.), ko var iegādāties būvniecības veikalos, ugunsreakcijas klase, kas šobrīd gan ir teorētiska (iegūta dažos testos), ir pat salīdzinoši augsta. Grūtāk ir konkurēt ar materiāliem, kas izstrādāti no betona vai kaļķa. Šeit ir iespēja meklēt risinājumus nākotnē, izmantojot papildu pildvielas, lai samazinātu arī aizdegšanās reakciju un ātrumu.

Cewood uzņēmums raksta, ka skaņas absorbciju var sasniegt 0,9, bet tas ir dažāds, tāpat kā autora izstrādātajā darbā, dažādās frekvencēs materiāls dažādi reaģē, bet sasniedz vidēji koeficientu 0,6–0,7. Svarīgi, ka materiāli, kuriem ir izolācijas īpašības, papildus nodrošina telpas akustisko komfortu, samazina skaņu vibrācijas un uzlabo telpas izolāciju. Pētot dažādu akustisko plātņu īpašības, secināts, ka svarīgākais, lai materiāls būtu absorbējošs un koeficients virs 0,5.



3.34. att. Robežstiprība liecē – salīdzinošie dati.

Salīdzinot eksperimentālo plātņu robežstiprību liecē ar rūpnieciski ražotiem un zinātnieku izstrādātiem materiāliem, vērojams, ka autores izstrādātie materiāli ir vienā līmenī ar *RBB* kokšķiedras plātņi, sasniedzot 1,3 MPa, bet par 1,8 reizēm pārsniedz *Cewood* un *Isoplaat* materiālus (3.34. att.). Augstākie rezultāti autores izstrādātajiem materiāliem ir 1,26–1,43 MPa robežās. Zinātnieku izstrādāto materiālu robežstiprība liecē ir 0,0068–0,24 MPa robežās.

3.6. Īss materiāla raksturojums un paredzamais lietojums

Lignocelulozes izolācijas plātne iekštelpu mikroklimate nodrošināšanai

Plātņveida izolācijas materiālu ražošanā būtisks motīvs ir ilgtspēja un vietējo ražošanas pārpalikumu vai atjaunīgo dabas resursu efektīva izmantošana. Pētījuma gaitā izstrādātas zema blīvuma iekšējo sienu izolācijas plātnes no lauksaimniecības un kokapstrādes blakusproduktiem, variējot ar struktūru un mikroiekapsulētu fāzmaiņu materiāla apjomu plātnē līdz 15 %.

Inovācija

Jaunā produkta inovācija balstīta lielajā latentā siltuma izmantošanas potenciālā, integrējot fāzmaiņas materiālu ražošanas pārpalikumos balstītā izolācijas materiālā.

Izejmateriāli un ražošana

Kaņepju spaļi, priedes garenfrēzēšanas skaidas, UF saistviela, mikroiekapsulēta fāzmaiņas materiāla dispersija *MikroCaps PCM-S50* (Slovēnija).

PCM izmantots kā latentā siltumenerģijas krātuve iekštelpu mikroklimate pašregulācijai atkarībā no vides temperatūras. Plātņu paraugi ražoti, izmantojot aukstās presēšanas tehnoloģiju, kas nodrošina samazinātu CO₂ emisijas ražošanas procesā. *PCM* fāzes maiņa izvēlētajā intervālā ir nozīmīgs solis, lai sasniegtu gandrīz nulles emisiju ēkas norobežojošo konstrukciju. Fāzmaiņas materiāli ir atzīti par efektīvu veidu, kā uzlabot ēkas energopārvaldību, pateicoties fāzes pārejai, šādi materiāli spēj uzkrāt lielu enerģijas daudzumu. Apvienojot kaņepju spaļu un koksnes garenfrēzēšanas skaidu siltumizolācijas materiālus ar *PCM* materiālu, iespējams palielināt ēkas siltuma ietilpību līdz 2,5 reizēm, nodrošinot vienmērīgu klimatu telpā, praktiski nepalielinot ēkas masu, un plātnes porainā struktūra spēj samazināt trokšņa līmeni.

Materiāla vizuālās un apstrādes iespējas

Materiālu var izmantot gan kā funkcionālu – latentā siltuma uzkrāšanas un telpas trokšņa slāpēšanas, akustikas uzlabošanas, gan kā dizaina elementu, presēšanas procesā veidojot reljefa virsmu dekoratīvo sienu un griestu paneļos. Stiprinot paneļus rāmja konstrukcijā, tie var kalpot arī kā telpu atdaloši elementi.

Iespējams veikt mehānisko apstrādi – zāģēšanu, frēzēšanu, urbšanu, slīpēšanu.

Apdares risinājumi – iespējams krāsot gan masā, gan tikai uz ārējās virsmas (labākais variants – krāsošana ar pistoli), kā arī aplīmēt ar dažādiem dekoratīviem materiāliem.

Lietošanas vide

Iekštelpās, kur relatīvais mitrums nepārsniedz 60 ± 5 %, kā funkcionāli dekoratīvu paneli (klimata un akustikas uzlabošanai) vai izolācijas plātņi energoefektivitātes uzlabošanai, veicot iekštelpas sienu un griestu apdari.

Stiprināšana – skrūvējot, līmējot, liekot rāmjeida konstrukcijā.

Tehniskā specifikācija

- Siltumvadītspēja 0,064–0,072 W/m·K.
- Siltumietilpība 0,352–0,394 J/(g·K).
- Siltumpretestība 2,35–3,97 (m²·K)/W.
- Skaņas absorbcija 500–6300 Hz $\alpha = 0,65–0,69$.
- NRC koeficients 250–2000 Hz $\alpha = 0,44–0,49$.
- Skaņas absorbcijas klase 1000–4000 Hz B un C.
- Blīvums 290 ± 20 kg/m³.
- Biezums 25 mm.
- Materiāla mitruma saturs 8 ± 2 %.
- Ugunsreakcijas klase B–C.
- Robežstiprības liece 1,26–1,43 MPa.
- Aksiālā pretestība 10,6–23,2 MPa.

NODAĻAS KOPSAVILKUMS

Izejmateriālu raksturojums

• Kaņepju spaļu (H) frakciju mitrums ir 7,9 %, priedes skaidu (W) frakciju vidējais mitrums 8,8 %, vidējais mitruma saturs iekļaujas saistvielas ražotāja noteiktajā līmējamā materiāla mitruma intervālā 8 ± 2 %, kas ļauj lietot izvēlēto UF saistvielu.

• Granulometriskajā analizē noskaidrots, ka frakcijas, kas mazākas par 500 μm, kaņepju spaļu frakciju sastāvā ir 3,7 %, koksnes garenfrēzēšanas skaidās – 6,6 %, ko atdala pirms plātņu izgatavošanas, plātņu izgatavošanā izmanto frakcijas, kas lielākas par 500 μm.

Plātņu izgatavošana

• Darba procesā strādāts pie eksperimentālajām plātnēm, variējot plātņu mainīgos – biezumu, izejmateriālu un izejvielu proporcijas, izejmateriālu frakciju lielumus, veidojot dažāda veida slāņu salikumu plātnes, veidojot virsmas ar reljefu, kā arī virsmas aplīmējot. Izvēlēts veidot plātnes no viena izejmateriāla vai jaucot divus izejmateriālus proporcijā 50 : 50.

Saistvielas apjoma noteikšana un saistīto īpašību analīze

• Saistvielas apjoma noteikšanā un saistīto īpašību analīzē secināts, ka plātnes nepieciešams izgatavot ar vismaz 10 % saistvielu, presē izturēt vairāk nekā 10 h zem spiediena, lai mazinātu ģeometrisku deformāciju. Ātrā žūšanas procesā un īsā slogošanas laikā plātnes ģeometrija izmainās.

• Izdaloties mitrumam no parauga, tā masa mainās līdz 4 %, attiecīgi, jo lielāks saistvielas procentuālais daudzums izvēlēts, jo lielāka masas izmaiņa prognozējama. Materiālu laboratorijas apstākļos pirms turpmāko pārbaužu veikšanas nepieciešams izturēt minimums piecas dienas, vēlams 7–10 dienas, kad plātnes masa nemainās vairāk par 1,5 % dienā.

Plātņu materiālu īpašības

- Plātņu tālāko apstrādi var veikt pēc 10–14 dienām, kad plātne pēc presēšanas iegūst līdzsvara mitrumu.

- Plātņu blīvuma vienmērība 200 mm × 200 mm paraugiem pret 50 mm × 50 mm paraugiem ir 1 % robežās. Plātnēm nevienmērīgāks blīvums novērots tuvāk malām, kā arī izteiktāka nevienmērība – W grupas plātnēm.

- Materiāla ūdens uzsūktspējas un uzbrišanas testā noteikts, ka visas trīs paraugu grupas pirmajās 15 testa minūtēs strauji uzņem ūdeni. H grupas paraugi mainīja savu biezumu 1,9 reizes no sākotnējā biezuma, drupa un izjuka ūdenī. Lielākas masas izmaiņas bija W grupai – 3,8 reizes no sākotnējās paraugu grupas vidējās masas, bet tas neietekmēja parauga īpašības, un ūdenī tas nesadalījās frakcijās. HW paraugi ir labs kompromiss starp abiem izejmateriāliem, kaņepju plātnēm pievienojot garenfrēzēšanas koksnes skaidas, tās neuzbriest un nesadalās frakcijās.

- SEM attēlos identificētas dažāda izmēra mikroapsulas uz kaņepju spaļu virsmām.

Termiskās īpašības

- Plātnes masā pievienojot *PCM*, materiāla siltumvadītspēja samazinās, jo lielāks procentuālais sastāvs, jo lielāks samazinājums. Labākie rezultāti ir paraugu grupām bez *PCM*. Pie 10 °C – H 0,062 W/m·K; HW 0,066 W/m·K; W 0,062 W/m·K; H grupas paraugiem ar 5–15 % *PCM* ir 0,063–0,069 W/m·K; HW grupas paraugiem ar 5–15 % *PCM* ir 0,064–0,070 W/m·K. Pie 20 °C – H 0,064 W/m·K; HW 0,067 W/m·K; W 0,064 W/m·K; H grupas paraugiem ar 5–15 % *PCM* ir 0,065–0,071 W/m·K; HW grupas paraugiem ar 5–15 % *PCM* ir 0,066–0,072 W/m·K.

- Siltumietilpība *PCM* 23–28 °C kušanas temperatūras amplitūdā palielinās. Nosakot ietilpības palielināšanos 25 °C temperatūrā ar 5–15 % *PCM* sastāvu, noteikts, ka paraugu siltumietilpību var palielināt līdz pat 2,53 reizes. HW grupai pie 5 % *PCM* paraugu siltumietilpība palielinājās 1,48 reizes, kas ir 2,35 J/(g·K); pie 10 % *PCM* – 2,03 reizes, kas ir 3,20 J/(g·K); pie 15 % *PCM* – 2,45 reizes, sasniedzot 3,97 J/(g·K). H grupas paraugiem palielinājās siltumietilpība pie 5 % *PCM* – 1,53 reizes, kas ir 2,31 J/(g·K); pie 10 % *PCM* – 2,01 reizes, kas ir 3,14 J/(g·K); pie 15 % *PCM* – 2,47 reizes, kas ir 3,97 J/(g·K).

- Siltumpretestības rezultāts paraugu grupās ir 0,34–0,41 (m²·K)/W robežās, augstāko rezultātu – 0,41 (m²·K)/W – uzrādīja kaņepju spaļu (H) paraugu grupa.

Ugunsreakcijas tests

- Abām paraugu grupām kopējais izdalītais siltuma daudzums ir 45– 51 MJ/m² robežās, masas zuduma atšķirība – 1 % robežās; masas zuduma ātrums strauji sasniedz maksimumu H grupai – 12,1 g/(s·m²), H_10%PCM grupai – 12,64 g/(s·m²); specifiskais zuduma koeficients atšķiras par 0,3 %.

- Patērētais skābeklis ir 28–32 g robežās, H_10%PCM skābeklis ir patērēts par 14 % jeb 4,5 g vairāk.

- H grupas paraugi aizdegās pēc 9,67 s, H_10%PCM grupas paraugi – pēc 6,5 s, kas ir 1,49 reizes ātrāk.

- Dūmu izdalīšanās daudzums laika posmā 0–605 s H grupai – 33,70 m²/m², H_10%PCM grupai – 43,95 m²/m², rezultātā visa testa laikā H_10%PCM grupa, salīdzinot ar H grupu, izdalīja par 30 % vairāk dūmu.

- Siltuma izdalīšanās paraugiem ar *PCM* 60 s rezultāts ir lielāks – 136,92 kW/m², H grupai – 120,7 kW/m².

Akustiskās īpašības

- Visas paraugu grupas ir skaņas absorbenti, visefektīvāk absorbē frekvenču joslā no 1000–2000 Hz un 4000–6300 Hz.

- Pie frekvencēm 500–6300 Hz absorbcijas koeficients ir: H 0,65; HW 0,65 un W 0,69.

- *NRC* koeficients noteikts pie frekvencēm 250–2000 Hz. HW materiālu grupai koeficients ir 0,47, H grupai ir 0,44, W grupai 0,49.

- Skaņas absorbcijas klases no 1000–4000 Hz ir B un C.

Mehāniskās īpašības

- Izstrādātās plātnes prototipa robežstiprība liecē sasniedz 1,26–1,43 MPa.

- Skrūvju aksiālās izraušanas pretestības rezultāts H paraugiem 23,2 MPa, bet HW paraugiem 18 MPa; H_10%PCM paraugiem 14,5 MPa un HW_10%PCM paraugiem 10,6 MPa.

Īpašību salīdzinājums pret citiem izolācijas materiāliem

- Autores izstrādāto materiālu siltumvadītspēja, salīdzinot ar lielāko daļu zinātnieku izstrādātajiem materiāliem, ir par 28 % labāka, taču par 32 % sliktāka nekā rūpnieciski ražotajiem materiāliem. Analizējot rezultātus, novērojama negatīva tendence, ka materiāliem ar pievienotu *PCM* pasliktinās siltumvadītspējas rezultāti.

- Autores izgatavoto izolācijas materiālu ar 15 % *PCM* piejaukumu siltumietilpība ir augstākā, sasniedzot 3,97 J/(g·K), kas ir divas reizes augstāks rezultāts nekā tirgū pieejamajiem materiāliem, kas ir 1,7–2,1 J/(g·K) robežās. Salīdzinot ar zinātnieku izstrādātajiem materiāliem ar 20–30 % *PCM* piejaukumu, kur iegūtais rezultāts ir 1,2–1,9 J/(g·K) robežās, autores izgatavotās plātnes sasniedz 2,6 reizes labāku rezultātu.

- Ugunsreakcijas klase ir konkurētspējīga un augstāka nekā tirgū esošajiem izolācijas materiāliem.

Paredzamais lietojums, vide un apstrāde

- Materiāls paredzēts iekštelpām, kur relatīvais mitrums nepārsniedz 60 ± 5 %.

- To var izmantot kā funkcionālu (latentā siltuma uzkrāšanas un telpas trokšņa slāpēšanas, akustikas uzlabošanai) un estētisku (kā dizaina elementu) izolācijas plātni iekštelpas sienu, griestu apdarei, stiprinot paneļus rāmja konstrukcijā, plātnes var kalpot arī kā telpu atdaloši elementi.

- Apdares risinājumi – iespējams krāsot gan masā, gan tikai uz ārējās virsmas (labākais variants ar krāsošanas pistoli), kā arī aplīmēt ar dažādiem dekoratīviem materiāliem.

- Iespējams veikt mehānisko apstrādi – zāģēšanu, slīpēšanu, frēzēšanu, urbšanu.

- Stiprināšana – skrūvējot, līmējot, liekot rāmjeida konstrukcijā.

SECINĀJUMI

- Veiktais publicēto un nepublicēto materiālu apskats un analīze liecina, ka galvenās tēmas ir: 1) atjaunīgo resursu un ražošanas blakusproduktu lietojums; 2) fāzmaiņu materiāli, to darbības principi, vēsturiskās attīstības apskati, klasifikācija, iestrāde, lietojuma jomas; 3) izolācijas materiāli, gan esošie, gan zinātnieku eksperimentāli jaunradītie; 4) plātņu materiālu izgatavošanas metodes, tehnoloģijas un īpašības, veikspējas uzlabošana un atjaunīgu komponentu lietojums.

- Promocijas darbā, pamatojoties uz veikto pētījumu apskatu un praktisko analīzi, pirmo reizi laboratorijas apstākļos, izmantojot aukstās presēšanas metodi, izgatavotas industriālo kaņepju spaļu plātnes ar masā iekļautu mikroiekapsulētu *PCM* dispersiju līdz 15 % apjomā un noteiktas plātņu variantu fizikālās un mehāniskās īpašības.

- Promocijas darba mērķis sasniegts, kompleksu pētījumu rezultātā integrējot kaņepju blakusproduktus iekšējai apdares izolācijas plātņu sastāvā, uzlabojot to veikspēju, iestrādājot plātņu struktūrā mikroiekapsulētus bioloģiskas izcelsmes fāzmaiņu materiālus funkcionālo īpašību intensifikācijai.

- Izstrādātā aukstās presēšanas plātņu izgatavošanas tehnoloģija mikroiekapsulētu *PCM* dispersijas iestrādāšanai plātnes izgatavošanas procesā un lietotie materiāli nodrošina temperatūras regulāciju iekšējās un vienmērīgu klimatu telpā, praktiski nepalielinot ēkas masu.

- Izstrādātie plātņu prototipi no kaņepju spaļiem un priedes garenfrēzēšanas skaidām proporcijā 50 : 50 ar 10 % karbamīda-formaldehīda sveķu līmi un mikroiekapsulēto *PCM* dispersijas procentuālo apjomu no 5 % līdz 15 % ir noturīgākas pret ūdens uzsūktspēju.

- Noteiktās termiskās, fizikālās, akustiskās un mehāniskās īpašības liecina, ka plātnes ir labs siltuma un akustikas izolācijas materiāls.

- Siltumvadītspēja samazinās, palielinoties *PCM* procentuālajam sastāvam; sasniegtie labākie siltumvadītspējas rezultāti bez *PCM* H un HW grupu paraugiem ir 0,062–0,063 W/m·K, siltumpretestības labākie rezultāti ir H grupas paraugiem – 0,41 (m²·K)/W.

- Iestrādātās fāzmaiņu mikroiekapsulas spēj palielināt plātnes siltumietilpību, sasniedzot labāko rezultātu 3,97 J/(g·K) pie 15 % *PCM*, palielinot rādītāju par 147 %, salīdzinot ar plātnēm bez *PCM*.

- Labas skaņas absorbcijas īpašības 500–6300 Hz frekvencē, labākais absorbcijas koeficients $W = 0,69$, plātnes porainā struktūra spēj uzlabot akustikas īpašības. Plātnes visefektīvāk absorbē skaņu 1000–2000 Hz un 4000–6300 Hz frekvences joslās; tas atbilst skaņas absorbcijas B un C klasei (1000–4000 Hz).

- Ugunsreakcijas testi liecina, ka plātnes ar mikroiekapsulēto *PCM* sastāvā izdala par 30 % vairāk dūmus (43,95 m²/m²); patērē par 14 % vairāk skābekli; 1,49 reizes ātrāk aizdegas; kopējais izdalītais siltuma daudzums ir 45 līdz 51 MJ/m² robežās, masas zuduma atšķirība ir 1 % robežās; specifiskais zuduma koeficients atšķiras par 0,3 %; siltuma izdalīšanās paraugiem ar *PCM* 60 s ir 120,7 līdz 136,92 kW/m² robežās.

- Mehānisko īpašību analīzes rezultātā secināts, ka izolācijas plātņu prototipu robežstiprības lieces izturība ir salīdzinoši maza – 1,26–1,43 MPa, zemāka paraugiem ar *PCM*

sastāvā, tos nav ieteicams izmantot kā brīvstāvošus, bet ieteicams lietot rāmju konstrukcijās kā pildīņus vai stiprināt slodzi nenesošās konstrukcijās, piemēram, stiprinot ar skrūvēm pie virsmas. Sasniegtā augstākā skrūvju aksiālās izraušanas pretestība – 23,2 MPa – ir H grupas paraugiem.

- Izstrādātā tehnoloģija ļauj plātnes tonēt, pievienot citas pildvielas, kā arī veidot virsmu ar reljefu.
- Izstrādātie plātņu prototipi lietojami iekštelpās, sausā vidē, pateicoties porainībai, tie spēj absorbēt troksni; ar iestrādātiem *PCM* telpā veido vienmērīgu klimatu.

Priekšlikumi, nākotnes vīzija – tēmas pētījumu iespējamais turpinājums

- Materiāla īpašību paaugstināšana pret degšanu, pievienojot mikrokapsulas ar antipirēnu pildījumu.
- Utilizācijas iespējas maļot vai dedzinot, materiāla ietekme uz vidi.
- Izstrādāt tehnoloģiju, lai izgatavotu vairākslāņu plātnes, variējot ar slāņu biezumu un optimālāko *PCM* slāņa novietojumu pret telpu.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Torgal F.P. Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. *Constr. Build. Mater.* 2014, Vol. 51, p. 151–162.
2. Berardi U. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, Vol. 123, p.230–241.
3. Haghghat, F. Applying Energy Storage in Ultra-low Energy Buildings – Final report, 2014.
4. Raluca I., Tamas-Gavrea T., Daniela D.M., Claudiu A. Physical and Mechanical Property Characterization of Hemp Shive Reinforced Gypsum Composite Board. *Advanced Engineering Forum*, 2017, p. 262–271.
5. U.S. Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2017*. US Energy Information Administration Report, September 2017. [Tiešsaiste]: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) (Citēts: 2019. gada 23. septembrī).
6. El Wazna M., Gounni A., El Bouari A., El Alami M., Cherkaoui O. Development, characterization and thermal performance of insulating nonwoven fabrics made from textile waste. *Journal of Industrial Textiles*, 2019, Vol. 48, p. 1167–1183.
7. Rofie S. Novel Low Density Particleboard from Hemp Shives. //Doctoral Thesis. University of Wales, UK, 2005.
8. Lee S., Shupe T.F., Hse C. Mechanical and physical properties of agro-based fiberboard. *Holz Roh Werkst*, 2005, Vol. 64, p. 74–79.
9. Manaia J.P., Manaia A.T., Rodrigues L.H.M. Industrial Hemp Fibers: An Overview. *Fibers*, 2019, Vol. 7, p.106.
10. Ryms M., Klugmann-Radziemska E. Possibilities and benefits of a new method of modifying conventional building materials with phase-change materials (PCMs). *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 211, p.1013–1024.
11. Whiffen T., Russell-Smith G., Riffat S. Active thermal mass enhancement using phase change materials. *Energy Build.* 2016, Vol.111, p.1–11.
12. Pomianowski M.Z., Heiselberg P., Jensen R.L., Cheng R., Zhang Y. A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. *Cement and Concrete Research*, 2014, Vol. 55, p. 22–34.
13. Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling, H. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 2003, Vol. 23, p. 251–283.
14. Ryms M., Januszewicz K., Kazimierski P., Łuczak J., Klugmann-Radziemska E., Lewandowski W.M. Post-Pyrolytic Carbon as a Phase Change Materials (PCMs) Carrier for Application in Building Materials. *Materials* ,2020, Vol. 13, p.1268.
15. Madad A., Mouhib T., Mouhsen A. Phase Change Materials for Building Applications: A Thorough Review and New Perspectives. *Buildings*, 2018, Vol. 8, p.63.
16. Rao Z., Wang S., Zhang Z. Energy saving latent heat storage and environmental friendly humidity-controlled materials for indoor climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, Vol. 16, p.3136–3145.
17. Cao L., Su D., Tang Y., Fang G., Tang F. Properties evaluation and applications of thermal energy storage materials in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Vol. 48, p. 500–522.
18. Memon S.A. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, Vol. 31, p. 870–906.
19. Schossig P., Henning H.-M., Gschwander S., Haussmann T. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, Vol. 89, p. 297–306.
20. Lai C.-M., Chen R., Lin C.-Y. Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM. *Energy Build*, 2010, Vol. 42, p.1259–1266.
21. Mathis D., Blanchet P., Lagièrre P., Landry V. Performance of Wood-Based Panels Integrated with a Bio-Based Phase Change Material: A Full-Scale Experiment in a Cold Climate with Timber-Frame Huts. *Energies*, 2018, Vol. 11, 3093.

22. Ramakrishnan S., Sanjayam J., Wang X. Experimental Research on Using Form-stable PCM-Integrated Cementitious Composite for Reducing Overheating in Buildings. *Buildings*, 2019, Vol. 9, 57.
23. Castell A., Martorell I., Medrano M., Pérez G., Cabeza L. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy Build*, 2010, Vol. 42, p. 534–540.
24. Bravo J.P., Venegas T., Correa E., Alamos A., Sepúlveda F., Vasco D.A., Barreneche C. Experimental and Computational Study of the Implementation of mPCM-Modified Gypsum Boards in a Test Enclosure. *Buildings*, 2020, Vol. 10, 15.
25. Zhu N., Ma Z., Wang S. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. *Energy Conversion and Management*, 2009, Vol. 50, p. 3169–3181.
26. Kuznik F., Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*, 2009, Vol. 86, p. 2038–2046.
27. Asdrubali F. Survey on the Acoustical Properties of New Sustainable Materials for Noise Control. *Acta Acustica united with Acustica, EURONOISE*, 2006, Finland.
28. Liu L., Li H., Lazzaretto G., Manente C., Tong Q., Liu N. The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 69, p. 912–932.
29. Palumbo M., Lacasta A. M., Giraldo M. P., Haurie L., Correal E. Bio-based insulation materials and their hygrothermal performance in a building envelope system (ETICS), *Energy and Buildings*, 2018, Vol. 174, p. 147–155.
30. Torres-Rivas A., Palumbo M., Haddad A., Cabeza L. F., Jiménez L., Boer D. Multi-objective optimization of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk, *Applied Energy*, 2018, Vol. 224, p. 602–614.
31. Kirilovs E. Ikgadēji atjaunojamu izejvielu efektīva izmantošana šķiedru plātņu un kompozītu izgatavošanai. // Promocijas darbs. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2013.
32. Páez D. A., Herrera Martínez M., Calderón Bermúdez L.A. Possibilities for the Development of Acoustic-Mechanical Systems based on Colombian Typical Fibres. In. *Proceedings of ICSV23*, Athens, 2016.
33. Herrera M., Martínez A., Mosquera G., Rincón Flórez R.E. System and Software Development to Measure Cylindrical Pipes based on Acoustic Reflectometry. In: *Tecciencia*, 2013.
34. Korjenic A., Petránek V., Zach J., Hroudová J., Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy and Buildings*, 2011, Vol. 43, p. 2518–2523.
35. La Mantia F.P., Morreale M., *Green Composites: a brief review. Composites: Part A*, 2011, Vol. 42, p. 579–588.
36. Kūliņš L., Griņevičs G., Laiveniece L., Spulle U. Līmēto materiālu ražošana. Jelgava: Talsu tipogrāfija, 2019, lpp. 122. ISBN 978-9934-8735-6-0.
37. Rowell R.M. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. USA-CRC press, 2005. p. 246–255. ISBN 0-8493-1588-3.
38. Brzyski P., Barnat-Hunek D., Suchorab Z., Łagód G. Composite Materials Based on Hemp and Flax for Low-Energy Buildings. *Materials*, 2017, Vol. 10(5), 510.
39. Barnat-Hunek D., Smarzewski P., Brzyski P. Properties of Hemp-Flax Composites for Use in the Building Industry. *Natural Fibers*, 2017, Vol. 14/3, p. 410–425.
40. Balčiūnas G., Vėjelis S., Lekūnaitė L., Kremensas A. Assessment of structure influence on thermal conductivity of hemp shives composite. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2016, Vol. 15/3, p. 699–706.
41. Walker R., Pavia S. Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes. *Construction and building materials*, 2014, Vol. 64, p. 270–276.
42. Stevulova N., Kidalova L., Junak J., Cigasova J., Trepakova E. Lightweight Composites Containing Hemp Hurds. *Procedia Engineering*, 2012, Vol 42, p. 69–74.
43. LVS EN 316:2009. Kokšķiedru plātnes. Definīcijas, klasifikācija un simboli.
44. Nagle A. Atjaunojamu dabas resursu kompozītmateriāls ar skaņas absorbcijas īpašībām. // Maģistra darbs. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2016.
45. LVS EN 312: 2011. Kokskaidu plātnes. Specifikācijas.
46. Amziane S., Sonebi M. Overview on bio-based building material made with plant aggregate. *Rilem Technical Letters*, 2016, Vol. 1, p. 31–38.

47. Herrera Martínez M., Páez Soto D.A. Renewable Insulation Materials Constructed from Colombian Materials According to the Principles of Sustainable Development: a Review. *Tecciencia ECCI*, 2018, Vol.13/ 24, p. 27–42 .
48. Stevenson F., Williams N. Sustainable Housing Design Guide for Scotland. HMSO, The University of Sheffield, 2007.
49. Wines J. *Green Architecture*. London: Taschen, 2000, p. 240. ISBN 978-3822863039
50. Närep M. Industrial hemp based insulation materials and their properties.// Master Thesis. Tallin: Tallin University of technology, 2017.
51. Viel M., Collet F., Lanos C. Development and characterization of thermal insulation materials from renewable resources. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol.214, p. 685–697.
52. Brzyski P., Duda S., Raczkowski A. Two-dimensional heat transfer analysis of timber structure walls filled with hemp-lime composite. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 252, 2019.
53. Brencis R., Pleiksnis S., Skujans J., Adamovics A., Gross U. Lightweight Composite Building Materials with Hemp (*Cannabis Sativa L.*) Additives. *Chemical engineering transactions*, 2017, Vol. 57, p. 1375–1380.
54. Brzyski P., Łagód G., Suchorab Z. Properties of a thermal-insulating wall material based on hemp shives and lime binder. *AIP Conference Proceedings*, 2019, Vol.2170, p.1–7.
55. Balčiūnas G., Vėjelis S., Vaitkus S., Kairytė A. Physical Properties and Structure of Composite Made by Using Hemp Hurds and Different Binding Materials. *MBMST Procedia Engineering*, 2013, Vol 57, p. 159 – 166.
56. Balducci F., Harper C., Meinschmidt P, Dix B., Sanasi A. Development of Innovative Particleboard Panels. *Drvna Industrija*, 2008, Vol.59/3, p. 131–136.
57. Cigasova J., Stevulova N., Schwarzova I., Junak J. Innovative Use of Biomass Based on Technical Hemp in Building Industry. *Chemical engineering transactions*, 2014, Vol. 37, p. 685–690.
58. Pleiksnis S., Sinka M., Sahmenko G. Experimental justification for spropel and hemp shives use as a thermal insulation in Latvia. *Environment. Technology. Resources.*, 2015, Vol.I, p. 175–181.
59. Sassonia E., Manzia S., Motoria A., Montecchid M., Canti M. Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, 2014, Vol. 77, p. 219–226.
60. Kirilovs E., Kukle S., Beļakova D., Borodiņecs A., Ruciņš Ā., Stramkale V. Thermal Conductivity of Hemp Based Boards. *Environment. Technology. Resources.*, 2015, Volume I, p. 61–66.
61. Kallakas H., Närep M., Närep A., Poltimäe T., Kers J. Mechanical and physical properties of industrial hemp-based insulation materials. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2018, Vol. 67/2, p.183–192.
62. Araba S., Brew S. The use of flax and hemp resource for particleboard. // Doctoral Thesis. Vancouver: University of British Columbia Library, 2017, p. 320.
63. Bozsaky D. Nature-based thermal insulation materials from renewable resources – a state-of-the-art review. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2019, Vol. 27, p. 52–59.
64. Pleiksnis S., Dovgiallo I. Thermal Insulation Materials From Spropel And Hemp Shives (*Cannabis Sativa L.*). *Environment. Technology. Resources.*, 2013, Vol. 3, p.57–61.
65. From crop to building material. [Tiešsaiste] 2021. [Citēts: 2021. gada. 15. oktobris.] Linex Prograss BV. <http://www.linex-pg.nl>.
66. Al-Shdaifat M. Smart construction materials incorporating microencapsulated phase change materials// Doctoral Thesis. Concordia University, 2019, p. 180.
67. Hyun D.C., Levinson N.S., Jeong U., Xia Y. Emerging applications of phase-change materials (PCMs): teaching an old dog new tricks. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, Vol. 53, p. 3780–3795.
68. Fang Y. A comprehensive study of Phase Change Materials (PCMs) for building wall applications// Doctoral Thesis. University of Kansas, 2009.
69. Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy*, 1983, Vol. 30, p. 313–332.
70. Nazari M., Jebrane M., Terziev N. Bio-Based Phase Change Materials Incorporated in Lignocellulose Matrix for Energy Storage in Buildings—A Review. *Energies*, 2020, Vol. 13, p.1–25.

71. Zhang X., Shi Q., Luo L., Fan Y., Wang Q., Jia G. Review Research Progress on the Phase Change Materials for Cold Thermal Energy Storage. *Energies*, 2021, Vol. 14, p.1–46.
72. Voronin D.V., Ivanov E., Gushchin P., Fakhruллин R., Vinokurov V. Review Clay Composites for Thermal Energy Storage: A Review. *Molecules*, 2020, Vol. 25, 1504.
73. Podara V.C., Kartsonakis I.A., Charitidis C.A. Review Towards Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Classification, Improvements and Applications in the Building Sector. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, 1490.
74. Wang X, et al. Heat storage performance of the binary systems neopentyl glycol/pentaerythritol and neopentyl glycol/trihydroxy methylaminomethane as solid–solid phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2000, Vol. 41, p.129–134.
75. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. *Journal of Energy Storage*, 2021, Vol. 33,101913.
76. Kushwah A., Gaur M.K., Pandit R.K. The Role of Phase Change Materials for Lifetime Heating of Buildings in Cold Climatic Conditions. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 2020, Vol. 7/3, p. 81–96.
77. Rathod M.K., Banerjee J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, Vol.18, p. 246–258.
78. Mehrjardi A.A., Khademi A., Ushak S., Alotaibi S. Melting process of various phase change materials in presence of auxiliary fluid with sinusoidal wall temperature. *Journal of Energy Storage*, 2022, Vol. 52, 104779.
79. Fang X.M., Zhang Z.G. A novel montmorillonite-based composite phase change material and its applications in thermal storage building materials. *Energy and Buildings*, 2006, Vol.38(4), p. 377–380.
80. Zhu N., Ma Z.J., Wang S.W. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review. *Energy Conversion and Management*, 2009, Vol. 50(12), p. 3169–3181.
81. Khudhair A.M., Farid M.M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2004, Vol. 45(2), p. 263–275.
82. Tyagi V.V., Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: a state of art. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2007, Vol. 11(6), p. 1146–1166.
83. Wang X., Zhang Y.P., Xiao W., Zeng R.L., Zhang Q.L., Di H.F. Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese Science Bulletin*, 2009, Vol. 54(6), p. 920–928.
84. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A. Phase change materials for building applications: a state of the art review. *Energy and Buildings*, 2010, Vol. 42(9), p. 1361–1368.
85. Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heattransfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 2003, Vol. 23(3), p. 251–283.
86. Verma P., Varun Singal S.K. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008, Vol. 12(4), p. 999–1031.
87. Jegadheeswaran S., Pohekar S.D. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, Vol. 13(9), p. 2225–2244.
88. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, Vol. 13(2), p. 318–345.
89. Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Smyth M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, Vol. 14, p. 615–628.
90. Zhang Z.G., Fang X.M. Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material. *Energy Conversion and Management*, 2006, Vol. 47(3), p. 303–310.

91. Fang X.M., Zhang Z.G., Chen Z.H. Study on preparation of montmorillonite-based composite phase change materials and their applications in thermal storage building materials. *Energy Conversion and Management*, 2008, Vol. 49(4), p. 718–723.
92. Fang Y.T., Kuang S.Y., Gao X.N., Mang Z.G. Preparation and characterization of novel nanoencapsulated phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2008, Vol. 49(12), p. 3704–3707.
93. Zhu N., Ma Z.J., Wang S.W. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review. *Energy Conversion and Management*, 2009, Vol. 50(12), p. 3169–3181.
94. Khudhair A.M., Farid M.M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2004, Vol. 45(2), p. 263–275.
95. Kozłowski R., Mieleniak B., Muzyczek M., Mańkowski J. Development of Insulation Composite Based on FR Bast Fibers and Wool. 2008.
96. Kajaks J., Zelča Z., Kukle S. The Effect of Modification Methods on Performance Characteristics of Composites based on Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) and Natural - Hemp Fibres. *Mechanics of Composite Materials*, 2015, Vol. 51, p.677–682.
97. Kukle S., Šutka A., Grāvētis J. Hemp Fibres and Shives, Nano- and Micro-Composites. No: Sustainable Development, Knowledge Society and Smart Future Manufacturing Technologies World Sustainability Series. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 291–305.
98. Castellón C. et.al. Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels. *Renewable Energy*, 2010, Vol. 35, p. 2370–2374.
99. Ukrainczyk N. et al. Thermophysical Comparison of Five Commercial Paraffin. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2010, Vol. 24(2), p. 129–137.
100. Zhang H.L., Baeyens J., Degève J., Pitié F. Latent Heat Storage with Phase Change Materials (PCMs). *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, 2013, Vol. 2, p. 340–351.
101. Kośny J., Shukla N., Fallahi A. Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates. *Energy Efficiency & Renewable Energy*, 2013, p.74.
102. Kurdi A., Almoatham N., Mirza M., Ballweg T., Alkahlan B. Potential Phase Change Materials in Building Wall Construction—A Review. *Materials*, 2021, Vol. 14, 5328.
103. Mili M. et.al. Novel lignin as natural-biodegradable binder for various sectors - A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, Vol. 139, p. 1–24.
104. Asokan P., Firdous M., Sonal W. Properties and potential of bio fibres, bio binders, and bio composites. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2012, Vol. 30(3), p. 254–261.
105. Aik Fei Ang et.al. Lignin-based copolymer adhesives for composite wood panels – A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, Vol. 95, 102408.
106. Vitrone F. et.al. Binderless fiber boards for sustainable construction. *Materials, production methods and applications. Journal of Building Engineering*, 2021, Vol. 44, 102625.
107. Peng H. et.al. A review on synthesis, characterization and application of nanoencapsulated phase change materials for thermal energy storage systems, *Applied Thermal Engineering*, 2021, Vol. 185, 116326.
108. Sabbah R., Farid M.M., Al-Hallaj S. Micro-channel heat sink with slurry of water with micro-encapsulated phase change material: 3D-numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 2009, Vol. 29, p. 445–454.
109. Zhou D., Zhao C.Y., Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 2012, Vol. 92, p. 593–605.
110. Li J.L., Xue P., Ding W.Y., Han J.M., Sun G.L. Micro-encapsulated paraffin/high density polyethylene/wood flour composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, Vol. 93(10), p.1761–1767.
111. Hunger M., Entrop A.G., Mandilaras I., Brouwers H.J.H., Founti M. The behaviour of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Cement & Concrete Composites*, 2009, Vol. 31(10), p. 731–743.
112. Wu K., Wang Z.Z., Hu Y. Micro encapsulated ammonium polyphosphate with urea–melamine–formaldehyde shell: preparation, characterization, and its flame retardance in polypropylene. *Polymers for Advanced Technologies*, 2008, Vol. 19(8), p. 1118–1125.

113. Lee S.H., Yoon S.J., Kim Y.G., Choi Y.C., Kim J.H., Lee J.G. Development of building materials by using micro-encapsulated phase change material. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2007, Vol. 24(2), p. 332–335.
114. Kim M.J., Inaba H., Kim M.H., Park K.W. Melting heat transfer characteristics of micro-encapsulated phase change material slurries with plural microcapsules having different diameters. *Proceedings of the 3rd Asian conference on refrigeration and air-conditioning vols*, 2006, p. 799–802.
115. Gschwander S., Schossig P., Henning H.M. Micro-encapsulated paraffin in phase-change slurries. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, Vol. 89, p. 307–315.
116. Schossig P., Henning H.M., Gschwander S., Haussmann T. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, Vol. 89, p. 297–306.
117. Zhang Y.P., Hu X.X., Yang R., Wang X., Xu H., Hao Q. Preparation, thermal performance and potential application of micro encapsulated PCM slurry and phase change micro-emulsion in the field of HVAC. *Cryogenics and refrigeration*, 2003, p. 709–716.
118. Fang X.M., Zhang Z.G. A novel montmorillonite-based composite phase change material and its applications in thermal storage building materials. *Energy and Buildings*, 2006, Vol. 38(4), p. 377–380.
119. Cabeza L.F., Castell A., Barreneche C., Gracia A., Fernández A.I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, Vol. 15, p. 1675-1695.
120. Gutcho M.M. *Microcapsules and microencapsulation Techniques*. New Jersey, USA: Noyes Data Co, 1976, p. 351. ISBN 978-0815506256.
121. Arshady, R. *Microspheres, microcapsules, and liposomes*. London, United Kingdom: Citrus Books, 1999, p. 576. ISBN 9780953218714.
122. Castell A., Medrano M., Castellón C., Cabeza L.F. Experimental results and simulation models for the use of PCM in buildings. 6th Workshop IEA/ECES IA, Sevilla, Spain, 2008.
123. Hauer A., Mehling H., Schossig P., Yamaha M., Cabeza L.F., Martin V., Setterwall F. International Energy Agency Implementing Agreement on Energy Conservation through energy storage, Final Report, 2005.
124. Krancane L., Vanaga R., Blumberga A. Modeling of building envelope's thermal properties by applying phase change materials. *Energy Procedia*, 2016, Vol. 95, p. 175–180.
125. Kuznik F., Virgone J., Noel J. Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering*, 2008, Vol. 28, p. 1291–1298.
126. Jahns E. Microencapsulated phase change material. International Energy Agency Energy Conversation through Energy Storage Program (ECES), 1999.
127. Wang X., Niu J. Raising evaporative cooling potentials usin combined cooled ceiling and MPCM slurry storage. *Energy and Buildings*, 2008, Vol. 40, p. 1691–1698.
128. Zhao C.Y., Zhang G. H. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, Vol. 15, p. 3813-3832.
129. Dakhli Z., Chaffar K., Lafhaj Z. The Effect of Phase Change Materials on the Physical, Thermal and Mechanical Properties of Cement. *Preprints.org*, 2020.
130. Cao V.D. et al. Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications. *Energy Conversion and Management*, 2017, Vol. 133, p. 56–66.
131. Kośny J., Yarbrough D.W., Miller W.A., Kenneth E. Analysis of the dynamic thermal performance of fibrous insulations containing phase change materials. DWY Final Report, 2009.
132. Schossig P., Henning H.M., Gschwander S., et al. Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, Vol. 89, p. 297–306.
133. Gowreesunker B.L., Tassou S.A. Effectiveness of CFD simulation for the performance prediction of phase change building boards in the thermal environment control of indoor spaces. *Building and Environment*, 2013, Vol. 59, p. 612–625.

134. Abdellatef Y., Kavgic M. Thermal, microstructural and numerical analysis of hempcrete-microencapsulated phase change material composites. *Applied Thermal Engineering*, 2020, Vol. 178, 115520.
135. Abdellatef Y., Kavgic M. Thermal and Moisture Buffering Properties of Novel Hemp-Lime Composites Integrated with Microencapsulated Phase Change Materials. 4th International Conference on Bio-Based Building Materials, Barcelona, Spain, 2021.
136. Hunger M., Entrop A.G., Mandilaras I., Brouwers H.J.H., Founti M. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials. 2009, *Cement and Concrete Composites*, 2009, Vol. 31, p. 731–743.
137. Cieślíkiewicz Ł., Łapka P., Dietrich F., Wendołowicz M., Brzyski P. Experimental investigation of heat transfer in bio-based building block with microencapsulated PCM. *Journal of Physics*, 2022, Vol. 2423, p. 1–6.
138. Bake M., Shukla A., Liu S. Development of gypsum plasterboard embodied with microencapsulated phase change material for energy efficient buildings. *Materials Science for Energy Technologies*, 2021, Vol. 4, p. 166–176.
139. Zamalloa A., Embil A. J., Zuñiga J. et al. PCM containing indoor plaster for thermal comfort and energy saving in buildings. [Tiešsaistē] <https://my.stockton.edu/>
140. Bumanis G., Bajare D. PCM Modified Gypsum Hempcrete with Increased Heat Capacity for Nearly Zero Energy Buildings. *Environmental and Climate Technologies*, 2022, Vol. 26, p. 524–534.
141. Van der Werf, H.M.G. Life cycle analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental impacts. *Euphytica*, 2004, Vol. 140, p. 13–23.
142. UK Flax and Hemp Production: The Impact of Changes in Support Measures on the Competitiveness and Future Potential of UK Fibre Production and Industrial Use. Department for Environment Food and Rural Affairs, London, UK, 2005.
143. Ip K., Miller A. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resources Conservation and Recycling*, 2012, Vol. 69, p. 1–9.
144. Zampori L., Dotelli G., Vernelli V. Life cycle assessment of hemp cultivation and use of hemp-based thermal insulator materials in buildings. *Environmental Science and Technology*, 2013, Vol. 47, p. 7413–7420.
145. Boutin M.P., Flamin C., Quinton S., Gosse G. Analyse du cycle de vie de mur en béton chanvre banché sur ossature en bois (Life Cycle Analysis of A Cast Hemp-Lime Timber Framed Wall). INRA: Lille, France, 2005.
146. Lawrence M., Fodde E., Paine K., Walker P. Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. *Key Engineering Materials*, 2012, Vol. 517, p. 413–421.
147. Pervaiz M., Sain M.M. Carbon storage potential in natural fiber composites. *Resources Conservation and Recycling*, 2003, Vol. 39, p. 325–340.
148. Kremensas A., Vaitkus S., Vejelis S., Członka S., Kairyte A. Hemp shivs and corn-starch-based biocomposite boards for furniture industry: Improvement of water resistance and reaction to fire. *Industrial Crops and Products*, 2021, Vol. 166, 113477.
149. Ingrao C. et al. Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, p. 29–42.
150. Bourdot A., et al. Characterization of a hemp-based agromaterial: influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy and Buildings*, 2017, Vol. 153, p. 501–512.
151. Jiang Y., Lawrence M., Hussain A., Ansell M., Walker P. Comparative moisture and heat sorption properties of fibre and shiv derived from hemp and flax. *Cellulose*, 2019, Vol. 26, p. 823–843.
152. Absorbing the Potential of Wood Waste in EU Regions and Industrial Bio-based Ecosystems. [Tiešsaiste] 2019. [Citēts: 2022. gada 25.jūlijs.] <https://cordis.europa.eu/project/id/727958>
153. Krasavcevs I., Liše S., Būmanis K. Koksnes kā enerģijas avota informācijas apzināšana un datu sagatavošana. [Tiešsaiste] 2020. gada 15. novembrī [Citēts: 2022.gada 20. maijs.] <https://www.zm.gov.lv/lv/media/2208/download?attachment>
154. LVS EN 322:1993. Koksnes plātnes – Mitruma saturs noteikšana
155. Zarei A. Characterization of szego-milled hemp fibres // Doctoral Thesis. Toronto: University of Toronto, 2010.

156. LVS EN 933-1:2013. Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana - 1.daļa:Daļiņu izmēra sadalījuma noteikšana. Sijāšanas metode.
157. LVS EN 933-2:2020. Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana - 2.daļa: Daļiņu izmēra sadalījuma noteikšana - Testēšanas sieti, atvēruma nominālie izmēri.
158. LVS EN 923:2016. Līmes. Termins un definīcijas.
159. Han H.J., Lee S.E., Yang S.M., Choi C., Kang S.G. Evaluation of formaldehyde emission from wood-based panels using accelerated collection method. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2019, Vol. 47, p. 129–144.
160. Kūliņš L., Griņevičs G., Laiveniece L., Spulle U. Līmēto materiālu ražošana. Jelgava: SIA “Talsu tipogrāfija”, 2019
161. MikroCapsPCM-S50 data sheet [Tiešsaiste] 2019. gada 20. septembris. https://us.v-cdn.net/6032193/uploads/attachments/232aaa0a-76c8-4d5d-8d37-aa610153505c/b630dc2b-f6ef-4ced-9053-aa6c00be0df8_pcm-data-sheet.pdf
162. Freivalde L., Kukle S., Andžs M., Bukšāns E., Grāvītis J. Flammability of raw insulation materials made of hemp. Composites Part B: Engineering, 2014, Vol. 67, p. 510–514.
163. Asdrubali F. Survey on the Acoustical Properties of New Sustainable Materials for Noise Control. EURONOISE, Finland, 2006.
164. LVS EN 322:1993. Koksnes plātnes - Mitruma satura noteikšana.
165. LVS EN 323:2000. Koka skaidu plāksnes - Blīvuma noteikšana.
166. LVS EN 317:2000. Koka skaidu plāksnes un kokšķiedru plāksnes - Uzbrīšanas noteikšana pēc iegremdēšanas ūdenī.
167. LVS EN ISO 29767:2019. Siltumizolācijas materiāli būvniecībā. Ūdens absorbcijas noteikšana, īslaicīgi un daļēji iegremdējot ūdenī.
168. LVS ISO 8302:2001 Siltuma izolācija. Siltuma pretestība un ar to saistīto īpašību noteikšana stacionārā režīmā - Norobežotās karstās plāksnes ierīce.
169. Buksans E. Different factor influence on fire safety of wood materials and prediction of the reaction to fire. // Doctoral Thesis.- Jelgava: LUA; 2009, p. 127.
170. LVS ISO 5660-1:2015/A1:2021 Ugunsreakcijas testi. Siltuma izdalīšanās, dūmu veidošanās un masas zuduma ātrums. 1.daļa: Siltuma izdalīšanās ātrums (koniskā kalorimetra metode) un dūmu veidošanās ātrums (dinamiskie mērījumi). 1.grozījums.
171. LVS EN ISO10534-2:2002. Akustika. Skaņas absorbcijas koeficienta un pilnās pretestības noteikšana pilnās pretestības caurulēs. 2.daļa: Pārejas funkcijas metode.
172. LBN 016-11. Būvakustika. (Būvnormatīvs skaņas izolācijas vai telpu akustikas deklarētām robežvērtībām.)
173. LVS EN ISO 11654:2021. Akustika. Skaņas absorbētāji ēkās. Skaņas absorbcijas parametri
174. LVS EN 310:2001. Koka skaidu plāksnes. Elastības moduļa un lieces spēka noteikšana
175. LVS EN 12089:2013. Siltumizolācijas materiāli lietošanai būvniecībā. Lieces īpašību noteikšana.
176. LVS EN 325:2012. Koksnes plātnes. Testēšanas paraugu izmēru noteikšana.
177. LVS EN 320:2011. Kokskaudu un kokšķiedru plātnes. Pretestības noteikšana skrūvju aksiālai izraušānai.



Inga Zotova dzimusi 1991. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi produktu dizainera kvalifikāciju materiālu tehnoloģijā un dizainā (2014) un profesionālā maģistra grādu materiālu dizainā un tehnoloģijā (2016). Kopš 2016. gada strādā RTU. Patlaban ir Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes (MLĶF) Dizaina tehnoloģiju institūta zinātniskā asistente. Ieguvusi RTU Studentu parlamenta Gada balvu "Gada studentu atbalsts MLĶF 2020". Zinātniskās intereses saistītas ar atjaunīgo resursu plātņu pētniecību un izstrādi.