DOI: 10.22616/lbtuthesis/2024.012

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte
Meža un vides zinātņu fakultāte

Būvniecības un kokapstrādes institūts

Mg.sc.ing. **Mārtiņš Andžs**

Promocijas darbs

TVAIKA SPRĀDZIENĀ NO KAŅEPJU SPAĻIEM IEGŪTI BERAMIE SILTUMIZOLĀCIJAS MATERIĀLI

LOOSE-FILL HEAT INSULATION MATERIAL OBTAINED FROM HEMP SHIVES BY STEAM EXPLOSION

zinātnes doktora grāda

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

iegūšanai

Promocijas darba vadītāja
Docente **Dr. sc. ing.** Inese Fiļipova _____

Promocijas darba vadītājs
Dr. habil. chem. Jānis Grāvītis _____

Promocijas darba autors _____

JELGAVA 2024

ANOTĀCIJA

Andžs, M. "Tvaika sprādzienā no kaņepju spaļiem iegūti beramie siltumizolācijas materiāli" Promocijas darbs. Jelgava, LBTU, 2024. – 112 lpp.

Promocijas darba tekstā ir iekļautas 10 tabulas, 60 attēli, 21 formula un 225 norādes uz izmantotajiem literatūras avotiem.

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūta Biorafinēšanas laboratorijā ar Eiropas Savienības 7. ietvarprogrammas Wood Wisdom "ProLignin" (2012-2014), Valsts pētījuma programmas "ResProd" (2014-2017), Eiropas Reģionālās attīstības fonda rezultātu komercializācijas projekta 1.2.1.2/16/I/001/ KC-PI-2020/13 "Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas komercializācija" (2020-2022) un Fundamentālo un lietišķo pētījumu projekta lzp-2021/1-0599 "Ekoloģiski draudzīgu siltumizolācijas materiālu izpēte no ilgtspējīgu atjaunojošos rūpniecisko kultūru atliekām" (2022-2024) atbalstu.

Eiropas Savienības regulas un globālās labās prakses tendences klimata pārmaiņu ierobežošanai Latvijai ir likušas īstenot darbības siltuma enerģijas racionālai patērēšanai un taupīšanai. Latvijā ir Eiropas Savienībā zemākā mājokļu kvalitāte, tostarp ēkas ir ar salīdzinoši zemu siltumnoturību. Eiropas Savienības regulas un sabiedrība pieprasa ilgtspējīgus, veselībai un videi draudzīgus siltumizolācijas materiālus. Kā risinājums aktuālai vajadzībai pēc jauna, no vietējās izcelsmes nekoksnes lignocelulozes biomasas ražota siltumizolācijas materiāla,– promocijas darba pētījumā no lauksaimniecības augu blakusprodukta – kaņepju spaļiem – izstrādāts jauns, aktuālajiem regulējumiem un vides prasībām atbilstošs beramais siltumizolācijas materiāls. Promocijas darbs ir detalizēts un fundamentāls, bet vienlaikus tehnoloģisks pētījums, kas iekļauj kaņepju spaļu tvaika sprādziena priekšapstrādes metodikas izstrādi, iegūto šķiedrveida materiālu īpašību izpēti un beramā siltumizolācijas materiāla paraugu izvērtējumu. Pētījumu rezultātā piemērota tvaika sprādziena metode videi draudzīga siltumizolācijas materiāla ieguvei. Izpētīta tvaika sprādziena tehnoloģijas mainīgo parametru ietekme uz iegūtā materiāla struktūru, īpašībām un pielietojuma iespējām siltuma un skaņas izolācijā, tādā veidā radot jaunas zināšanas par tvaika sprādziena tehnoloģijas pielietošanu lauksaimniecības atlieku apstrādē.

Optimālie tvaika sprādziena metodes apstrādes parametri beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanai no kaņepju spaļiem ir pie 235 °C temperatūras, 32 Bar spiediena ar atbrīvošanu uzreiz pēc tā sasniegšanas, t.i. izturēšanas laiks 0 minūtes. Viena no svarīgākajām zinātniskajām atziņām izstrādājot beramo siltumizolācijas materiālu ar tvaika sprādziena tehnoloģiju ir atklājums, ka būtiskākais ir adiabātiskais process (otrā fāze – sprādziens), kas veic parauga sašķiedrošanu, maksimāli saīsinot termoķīmisko procesu (pirmā fāze). Izvēloties optimālos apstrādes apstākļus, beramblīvumu iespējams samazināt līdz 2,3 reizēm, iegūstot labākos siltuminerces un siltumvadītspējas rādītājus. Izstrādātā šķiedru beramā materiāla siltumizolācijas īpašības (λ=0,043 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), ir līdzvērtīgas tirgū esošajiem analogiem.

Promocijas darba pētījumam ir būtiska praktiskā nozīmība, jo izstrādāta praktiski pielietojama tehnoloģija kaņepju šķiedru ražošanas blakusproduktu – kaņepju spaļu – pārstrādei produktos ar augstu pievienoto vērtību, tādā veidā radot zināšanu ietilpīgu, inovatīvu produktu ar komercializācijas un eksporta potenciālu. Izstrādātais produkts sniedz ieguldījumu pieaugošajā pieprasījumā pēc ilgtspējīgiem siltumizolācijas materiāliem, kā arī veicina Latvijas klimatneitralitātes mērķu sasniegšanu un CO_2 emisiju samazināšanu energoefektivitātes jomā.

SUMMARY

Andžs, M. “Loose-fill heat insulation material obtained from hemp shives by steam explosion”. Ph.D. thesis. Jelgava, LBTU, 2024. – 112 pages.

The thesis text includes 10 tables, 60 images, 21 formulas and 225 references to the used literature sources.

The doctoral thesis was developed in the Biorefining Laboratory of the Latvian State Institute of Wood Chemistry by support of the European Union 7th Framework Programme Wood Wisdom project “ProLignin” (2012-2014), National Research Program “ResProd” (2014-2017), European Regional Development Fund research results commercialization project No 1.2.1.2/16/I/001/ KC-PI-2020/13 "Commercialisation of the technology for the production of lignocellulosic bulk thermal insulation material" (2020–2022) and Fundamental and Applied Research lzp-2021/1-0599 “Investigation of eco-friendly thermal insulation materials from sustainable and renewable industrial crops residuals” project (2022–2024).

Regulations of the European Union and global best practice trends for limiting climate change have forced Latvia to implement actions for the rational consumption and saving of heat energy. Latvia has the lowest housing quality in the European Union, including buildings with relatively low thermal stability. EU regulations and society demand sustainable, health and environmentally friendly thermal insulation materials. As a solution to the urgent need for a new thermal insulation material produced from non-woody lignocellulosic biomass of local origin, a new loose-fill thermal insulation material that meets current regulations and environmental requirements has been developed from the by-product of agricultural plants – hemp shives – in the research of the doctoral thesis. The thesis is a detailed and fundamental, but at the same time a technological study, which includes the development of the pretreatment methodology for the hemp shives by the steam explosion of hemp shives, the study of the properties of the obtained fibrous materials and the evaluation of loose-fill thermal insulation material samples. As a result of the research, a steam explosion method was applied for the production of environmentally friendly thermal insulation material. The influence of the variable parameters of the steam explosion technology on the structure, properties and application possibilities of the obtained material in heat and sound insulation was studied, thus creating new knowledge about the application of the steam explosion technology in the processing of agricultural residues. The optimal processing parameters of the steam explosion method for obtaining loose-fill thermal insulation material from hemp shives are at a temperature of 235 °C, a pressure of 32 Bar with release immediately after reaching it, i.e. holding time 0 minutes. One of the most important scientific findings in the development of loose-fill thermal insulation material with steam explosion technology is the discovery that the most important is the adiabatic process (second phase – explosion), which performs fibrillation of the sample, maximally shortening the thermochemical process (first phase). By choosing the optimal processing conditions, it is possible to reduce the bulkiness up to 2.3 times, obtaining the best indicators of thermal inertia and thermal conductivity. The thermal insulation properties of the developed fiber loose-fill material (λ=0.043 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) are equivalent to analogs on the market.

The research of the thesis has a significant practical value, as a practically applicable technology has been developed for the processing of by-products of hemp fiber production – hemp shives – into products with high added value, thus creating a knowledge-intensive, innovative product with commercialization and export potential. The developed product contributes to the growing demand for sustainable thermal insulation materials, as well as contributes to the achievement of Latvia's climate neutrality goals and the reduction of CO_2 emissions in the field of energy efficiency.

SATURS

ATTĒLU SARAKSTS 6
TABULU SARAKSTS 8
FORMULU SARAKSTS 9
DARBA APROBĀCIJA 10
PATEICĪBA 12
SAĪSINĀJUMU UN APZĪMĒJUMU SARAKSTS 13
IEVADS 14
1. SITUĀCIJAS ANALĪZE 17
1.1. Energoefektivitāte - regulējumi un klimata mērķi 17
1.2. Latvijas ēku fonda energoefektivitāte 18
1.3. Siltumizolācija 21
1.3.1. Siltumizolācijas darbības veidi 21
1.3.2. Siltuma pārnese šķiedru materiālos 22
1.3.3 Siltumizolāciju raksturojošie lielumi 24
1.3.4 Siltumizolācijas materiāli 25
1.3.5. Dabisko šķiedru siltumizolācija 30
1.3.6. Dabisko šķiedru materiālu akustiskās īpašības 31
1.3.7. Dabisko škiedru materiālu ugunsreakcijas īpašības 33
1.4. Biorafinēšana 34
1.5. TS hidrolīze 38
1.5.1. Vēsture 38
1.5.2. Process 38
1.5.3. Pielietojums 40
1.6. Industriālo kaņepju resursi 41
1.6.1. Kaņepes pasaulē 41
1.6.2. Kaņepes Latvijā 41
1.6.3. Kaņepju audzēšana un kaņepju stiebra uzbūve 42
1.6.4. Kaņepju pārstrādes process 43
1.6.5. Kaņepju spaļu ķīmiskais sastāvs 44
1.6.6. Kaņepju pielietojums 45
1.7. Nodaļas secinājumi 46
2. MATERIĀLI UN METODES 48
2.1. Pētījuma metodoloģiskais pamats 48
2.2 Materiāli un reaģenti 49
2.3. Izolācijas materiāla iegūšana ar TS metodi 49
2.4. Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva noteikšana pirms un pēc TS 50
2.4.1. Minerālvielu satura noteikšana 50
2.4.2. Ekstraktvielu satura noteikšana 51
2.4.3. Lignīna satura noteikšana 51
2.4.4. Celulozes un citu ķīmisko savienojumu satura noteikšana ar HPLC 51
2.4.5. Furjē transformācijas infrasarkanā spektrometrija FTIR 51
2.4.6. Kodolmagnētiskā rezonanse KMR 52
2.5. Kaņepju spaļu struktūras pētījumi 52
2.5.1. Masas zudumi 52
2.5.2. Beramtilpums un beramblīvums 53
2.5.3. Frakcionālais sastāvs 53
2.5.4. Skenējošā elektronu mikroskopija SEM 53
2.5.5. Ūdens aizturēšanas spēja WRV 53
2.6. Kaņepju spaļu siltumizolācijas materiāla īpašību izpēte 54
2.6.1. Siltumvadītspējas koeficienta noteikšana ar karstās plāksnes metodi 54

2.6.2. Siltuma inerce 55
2.6.3. Ūdens tvaika pārvades raksturošana 56
2.6.4. Ugunsreakcijas pārbaude ar Koniskā kalorimetra metodi 58
2.6.5. Skaņas izolācijas mērīšana 58
2.7. Datu statistiskā apstrāde 59
3. REZULTĀTI 60
3.1. Materiālu iegūšana ar TS metodi 60
3.2. Kaņepju spaļu ķīmiskās īpašības 62
3.2.1. Ķīmiskā sastāva analīzes pirms un pēc TS 62
3.2.2. FTIR 64
3.2.3. Kodolmagnētiskā rezonanse 67
3.3. Kaņepju spaļu kā siltumizolācijas materiāla fizikālo izmaiņu pētījumi pirms un pēc TS 69
3.3.1. Masas zudumi 69
3.3.2. Beramtilpums un beramblīvums 70
3.3.3. Frakcionālais sastāvs 71
3.3.4. SEM 72
3.3.5. Ūdens aizturēšanas spēja 75
3.4. Siltumvadītspēja 76
3.5. Siltuma inerce 79
3.6. Ūdens tvaika pārvade 81
3.7. Ugunsreakcijas pārbaude ar Koniskā kalorimetra metodi 83
3.8. Skaņas izolācija īpašību analīze 90
4. EKONOMISKAIS IZVĒRTĒJUMS 93
4.1. Kopsavilkums 93
4.2. Produkta analogi un aizvietotāji 94
4.3. Produkta cena 96
4.2. Nodaļas secinājumi 97
SECINĀJUMI 98
REKOMENDĀCIJAS 99
Izmantotie informācijas avoti 100
PIELIKUMS 112

ATTĒLU SARAKSTS

Sk.	Nr.	Nosaukums	Lapa
1.	1.1	Ēku energoefektivitātes minimālais pieļaujamais līmenis jaunbūvēm, energoefektivitātes novērtējums apkurei	19
2.	1.2.	Ēku energoefektivitātes minimālais pieļaujamais līmenis ēku atjaunošanai un pārbūvei, energoefektivitātes novērtējums apkurei	19
3.	1.3	Ēku sadalījums Latvijā pēc to celšanas gada	20
4.	1.4.	Enerģijas patēriņa sadalījums mājsaimniecībās vidēji ES 2021.gadā	20
5.	1.5.	Siltuma pārvades veidi	21
6.	1.6.	Konvektīvo siltumizolācijas materiālu siltuma pārneses process	22
7.	1.7.	Vakuuma siltumizolācijas materiālu siltuma pārneses process	22
8.	1.8.	Siltumpārneses procesu modelēšanas piemērs šķiedru siltumizolācijā	23
9.	1.9.	Infrasarkanā stara trajektorijas vizualizācija starojuma siltuma pārneses modelēšanai šķiedru materiālā	23
10.	1.10.	Siltumizolācijas materiālu klasifikācija	26
11.	1.11.	Dažādu materiālu siltumizolācijas īpašību salīdzinājums. Vienāds siltumvadītspējas koeficients pie dažādiem biezumiem	27
12.	1.12.	Skaņas izolācijas un skaņas absorbcija	32
13.	1.13.	Globālās tendences izejvielu izmantošana rūpniecībā	35
14.	1.14.	Biorafinēšanas loma aprites ekonomikā un savstarpējās saistības shēma	36
15.	1.15.	Biomasas pārstrādes biorafinēšanas procesa piemērs ar TS hidrolīzi LVKĶI	37
16.	1.16.	Dažādos TS režīmos apstrādātas biomasas granulas	40
17.	1.17.	Kaņepju sējumu platība Latvijā	42
18.	1.18.	Kaņepju stiebra šķērsgriezuma vizualizācija	42
19.	1.19.	Kaņepju auga šūnas sieniņas celulozes uzbūves struktūras shematisks attēlojums	43
20.	1.20.	Kaņepju stiebru mehāniskās pārstrādes process	44
21.	1.21.	Kaņepju biomasas izmantošanas iespējas dažādās nozarēs	45
22.	2.1.	Pētījuma darba uzdevumu shēma	48
23.	2.2.	TS iekārta	49
24.	2.3.	Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva noteikšanas shematisks attēlojums	50
25.	2.4.	Izgatavotā beramā siltumizolācijas materiāla forma, siltumvadītspējas un siltuminerces noteikšanai	54
26.	2.5.	Izstrādātais kaņepju spaļu izolācijas materiāls	55
27.	2.6.	Izgatavotā simulācijas siltuminerces noteikšanas iekārta	55
28.	2.7.	Paraugu sagatvošana tvaika difūzijas mērījumu veikšanai	57
28.	2.8.	Pilnās pretestības skaņas izolācijas mērīšanas iekārta AcoustiTube	59
29.	3.1.	Kaņepju spaļu paraugs pirms un pēc TS	61
30.	3.2.	Kaņepju spaļu paraugu shematisks modelis pirms un pēc TS	61
31.	3.3.	Kaņepju spaļu FTIR absorbcijas spektri pirms un pēc TS	65
32.	3.4.	Kaņepju spaļu Klasona lignīna FTIR absorbcijas spektri pirms un pēc TS	66
33.	3.5.	Kaņepju spaļu KMR spektri pirms un pēc TS apstrādes	67
34.	3.6.	Galvenās lignīna monomēru struktūras kaņepju spaļu paraugos	69
35.	3.7.	Masas zudumi ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem	70

Sk.	Nr.	Nosaukums	Lapa
36.	3.8.	Beramtilpums un beramblīvums neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem	71
37.	3.9.	Frakcionālais sastāvs neapstrādātiem un ar tvaika TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem	72
38.	3.10.	Kaņepju spaļu SEM attēli pirms un pēc TS	73
39.	3.11.	Kaņepju spaļu SEM attēli pēc 30 sekunžu un 1 minūtes TS	74
40.	3.12.	Kaņepju spaļu izdalītā lignīna SEM attēli pirms un pēc TS	75
41.	3.13.	WRV neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industrāliem siltumizolācijas materiāliem	76
42.	3.14.	Siltumvadītspēja neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industrāliem siltumizolācijas materiāliem	77
43.	3.15.	Ārsienu biezums, kuriem ir vienāda U=0,23 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, atbilstoši siltuma caurlaidības koeficienta vērtība	78
44.	3.16.	Siltuminerce neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industrāliem siltumizolācijas materiāliem	79
45.	3.17.	Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industrāliem siltumizolācijas materiāliem	82
46.	3.18.	TI Aizdegšanās laiks neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem pie dažādiem blīvumiem	83
47.	3.19.	Kopējā siltuma izdalīšanās (THR) uz laukuma vienību 300 sekundēs neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem	84
48.	3.20.	Maksimālā degšanas jauda (HRR_{max}) uz laukuma vienību neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem	85
50.	3.21.	Tipiska termogravimetriskā līkne dabīgo šķiedru materiāliem	85
51.	3.22.	Ugunsgrēka attīstības modelis	86
52.	3.23.	Bora savienojumu liesmu slāpējošā iedarbība celulozes materiālos	86
53.	3.24.	TI Aizdegšanās laiks neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem pie dažādiem blīvumiem	87
54.	3.25.	Kopējā siltuma izdalīšanās (THR) uz laukuma vienību 300 sekundēs neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem ar antipirēna piedevu 10 un 15%	88
55.	3.26.	Maksimālā degšanas jauda (HRRmax) uz laukuma vienību neapstrādātiem un ar TS metodi apstrādātiem kaņepju spaļu paraugiem ar antipirēna piedevu 10 un 15%	89
56.	3.27.	Skaņas izolācijas indekss R	90
57.	3.28.	Skaņas izolācijas eksperimentālie līkne 75 mm starpsienas konstrukcijai. A – TS 0 min, B – TS 0,5 min, C – TS 1min salīdzinājumā ar kontroles paraugu	91
58.	3.29.	Skaņas izolācijas indekss R, vidējās vērtības visos frekvenču diapazonos	92
59.	4.1.	Siltumizolācijas materiālu siltumvadītspējas salīdzinājums	94
60.	4.2.	Izstrādātā materiāla un tirgū pieejamo produktu cenu salīdzinājums	96

TABULU SARAKSTS

Sk.	Nr.	Nosaukums	Lapa
1.	1.1	Neorganiskās un organiskās izcelsmes siltumizolācijas materiāli	27
2.	1.2.	Biorafinēšanas procesu klasificēšana	37
3.	1.3.	Latvijā audzētu kaņepju spaļu ķīmiskais sastāvs	44
4.	3.1.	Pētījumā iegūto un izmantoto siltumizolācijas materiālu apzīmējumi	60
5.	3.2.	Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva izmaiņas atkarībā no TS apstrādes	62
6.	3.3.	Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva izmaiņas, pārrēķinot pret masas zudumiem	63
7.	3.4.	Biomasas komponenšu saišu un funkcionālo grupu raksturīgās FTIR absorbcijas	64
8.	3.5.	TS apstrādāto kaņepju lignīna starpmonomēro saišu izmaiņas uz 100 fenilpropāna vienībām	68
9.	3.6.	Izstrādāto siltumizolācijas materiālu siltumietilpība un termiskā difūzija, salīdzinot ar tirgū esošajiem materiāliem	80
10.	4.1.	Siltumizolācijas materiālu īpašību salīdzinājums	95

FORMULU SARAKSTS

Sk.	Nr.	Nosaukums	Lappuse
1.	1.1.	U – siltuma caurlaidības koeficients	24
2.	1.2.	R – termiskā pretestība	24
3.	1.3.	R – termiskā pretestība	24
4.	1.4.	Kopējā termiskā pretestība	25
5.	1.5.	P – siltuma inerce	25
6.	1.6.	R_0 – barguma faktors	39
7.	2.1.	W% – sausnes koeficients	50
8.	2.2.	Pelnu masas daļu procentos	50
9.	2.3.	Ekstraktvielu masas daļu procentos	51
10.	2.4.	Lignīna masas daļu procentos	51
11.	2.5.	Masas zudumi	52
12.	2.6.	Absolūti sausa parauga masa	52
13.	2.7.	D – beramblīvums	53
14.	2.8.	WRV – šķiedru ūdens noturība	54
15.	2.9.	A – termiskā difūzija	56
16.	2.10.	G – masas izmaiņas laikā	56
17.	2.11.	g – ūdens tvaika caurlaidības ātrums	56
18.	2.12.	W – ūdens tvaika vadītspēja	56
19.	2.13.	Z – ūdens tvaika pretestība	57
20.	2.14.	δ – ūdens tvaika caurlaidība	57
21.	2.15.	μ – ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients	57

DARBA APROBĀCIJA

Publikācijas par promocijas darba tēmu:

1. **Andzs M.,** Tupciauskas R.,Veveris A., Andze L., Abolins J., Gravitis J. (2017) Biomass conversion into blow-in heat insulation materials by steam explosion. Holzforschung, 71(7-8), 641-644. DOI 10.1515/hf-2016-0188. ***SCOPUS***
2. **Andzs M.,** Tupciauskas R., Gravitis J., Veveris A., Abolins J. (2016) Biorefinery technology for biomass conversation to heat insulation material. Proceedings for poster presentations of 14th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp, June 28 – July 1, 2016, pp. 147 – 150.
3. Gravitis J., Ozols-Kalnins V., Kokorevics A., Abolins J., Kukle S., Putnina A., **Andzs M.,** Tupciauskas R., Veveris A. (2015) Zero Emissions and Bio-refineries for Natural Fibers, Biomaterials and Energy: Genesis of Concepts. Review. In: W.L. Filho, D. Bērziņa, A. Ūbelis (eds.) *Sustainable Development, Knowledge Society and Smart Future Manufacturing Technologies",* World Sustainability Series, Springer International Publishing Switzerland, 125 – 147. (DOI:10.1007/978-3-319-14883-09) ***Grāmata***
4. **Andzs M.,** Tupciauskas R., Veveris A., Gravitis J. (2015) Impact of wood fraction, moisture and steam explosion on the development of an innovative insulation material. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Rezekne, Latvija I: 11 – 15. (DOI:10.17770/etr2015voll.210). ***SCOPUS***
5. **Andzs M.,** Gravitis J., Veveris A. (2013) "Extraction lignin from hemp shives". Environment. Technology. Resources Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference. Volume 1. Latvia, Rezekne June 20 – 23, 2013. 103.p – 105.p. ***SCOPUS***
6. **Andzs M.,** Skrupskis V. (2011) "Possible use of hemp and wood in production of the heat insulation materials". Rēzeknes Augstskola. Vide. Tehnoloģija. Resursi. VIII starptautiskās zinātniski praktiskās konferences materiāli 2011. gada 20.-22. Jūnijs. 1.sējums. Rēzekne 2011. 323.lpp – 329.lpp. ***SCOPUS***

Publikācijas, kas saistītas ar promocijas darba tēmu

1. Reinerte, S., **Andzs, M.,** Tupciauskas, R., Veveris, A., Gravitis, J. (2017) Steam explosion as a pre-treatment method for bio-refined hybrid aspen lignocellulose. Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Rezekne, Latvija. VoI. III: 276 – 281.
2. Freivalde L., Kukle S., **Andzs M.,** Buksans E., Gravitis J. (2014) Flammability of raw insulation materials made of hemp. Composites: Part B, 67, 510-514 ***SCOPUS***

Patenta apliecības:

1. Tupčiauskas, R., Andžs, M., Grāvītis, J., Pavlovičs, G., Bērziņš, A. (iesniegts 21.03.2022). Paņēmiens lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanai. PCT/LV2022/050004. (Patenta iesniegums)
2. Tupčiauskas, R., Andžs, M., Grāvītis, J., Pavlovičs, G., Bērziņš, A. **(2024)** (iesniegts 18.03.2022). Paņēmiens lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanai. LVP2022000023. Latvijas Republikas Patents Nr. LV 15772 B. (Saņemts patents)
3. Andžs, M., Grāvītis, J., Tupčiauskas, R., Vēveris, A. (**2019**). Lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls un tā iegūšanas paņēmiens (Loose-fill thermal insulation material made from lignocellulose and production method thereof). LV 15328 B (*priority: 21.10.2016*). *Espacenet.* (Saņemts patents)

Dalība zinātniskajās konferencēs par promocijas darba tēmu

1. **Andzs M**., Tupciauskas R., Andze L., Veveris A., Abolins J., Gravitis J. 2017 6th International Conference on Innovative Natural Fibre Composites for Industrial Applications. Sapienza Universita di Roma. October 4–7. Roma, **Italy.**
2. **Andzs M.** 2017 The influence of Steam Explosion severity factor om fibre fractional content. Rezekne Academy of Technologies, June 15–17, Rezekne, **Latvija.**
3. **Andžs M**., Reinerte S., Vēveris A., Tupčiauskas R., Āboliņš J., Grāvītis J. 2017 LVKĶI. Vienam atkritums, otram izejviela – bioekonomika. Starptautiskā zinātniski praktiskā konference ZINĀTNE UN PRAKSE NOZARES ATTĪSTĪBAI. LLU Meža fakultāte 15.–17. Marts. Jelgava, **Latvija.**
4. **Andzs M.,** Tupciauskas R., Veveris A., Gravitis J. 2015 Impact of wood fraction, moisture and steam explosion on the development of an innovative insulation material. Section 3. Atbrivosanas aleja 115, k-4. Rezekne Academy of Technologies, June 18–20, Rezekne, **Latvija.**
5. **Andzs M.** 2015 Frakcijas, mitruma un tvaika sprādziena ietekme uz koksnes sašķiedrošanos. Starptautiskā zinātniski praktiskā konference ZINĀTNE UN PRAKSE NOZARES ATTĪSTĪBAI. LLU Meža fakultāte, Kokapstrādes katedra 16. –19. Marts. Jelgava, **Latvija.**
6. **Andzs M.,** Gravitis J., Abolins J. 2012. A Novel Ecological Heat-Insulating Composite of Steam Exploded. The Twentieth Annual International Conference on COMPOSITES/NANO ENGINEERING (ICCE-20). Session 11c BIO. 2 Thursday 2:00 PM-4:25 PM room C. July 26, **2012** . Beijing, **China.**
7. **Andzs M.,** Gravitis J., Abolins J. 2012 "Content of lignin hemp shives gained by steam explosions" 8th meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE), Radisson hotel, September 13–14, Kaunas, **Lithuania.**
8. **Andzs M.,** Gravitis J., Abolins J. 2012. A novel ecological heat-insulating composite of a steam-exploded biomass. 17th International conference Mechanics of composite materials. Structure and properties of constituents. Fotonika. Hotel "Jurmala SPA", Jomas str. 47/49., Section 1, June 28–July 01. Jūrmala, **Latvija.**
9. **Andzs M.,** 2012 Tvaika sprādziena ietekme uz šķiedru īpašībām. LLU, MF konference zinātne un prakse nozares attīstībai. LLU MF Kokapstrādes katedra, 18. marts, Jelgava, **Latvija.**

Citas aktivitātes saistībā ar promocijas darbu

1. Finālists RTU doktorantu konkursā «ResearchSlam», 2013/2014. Par tēmu "Kaņepe un tvaika sprādziens – mājas siltumam".
2. Doktorantūras kursi "Wood Chemistry, Biocomposites and Building Materials" (7.5 ECTS), Prof. Dr .Roger Rowell 3. –11. aprīlis, 2012. Zviedrijas Karaliskais tehnoloģiju institūts, Stokholma, Zviedrija.
3. Doktorantūras kursi: "NOVA", "Koksnes struktūra, īpašības, bioloģiskās noārdīšanās process un koksnes impregnēšana" (3ECTS), 23.–28. maijs, 2011. Zviedrijas Lauksaimniecības zinātņu universitāte, Meža produktu institūts. Uppsala, Zviedrija.

PATEICĪBA

Darba autors izsaka īpašu pateicību darba vadītājiem – LBTU, Doc., Dr. sc. ing. Inesei Fiļipovai un Dr. habil. chem. Jānim Grāvītim.

Paldies visiem tiem, kas neaizmirsa man regulāri un daudzu gadu garumā pajautāt: „ Kad būs, kā veicas, cik tālu ar disertāciju?"

Pateicība tiek izteikta Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūtam, īpaši Biorafinēšanas laboratorijas kolēģiem par kopīgu projektu īstenošanu, kā arī par praktisko un teorētisko atbalstu promocijas darba tapšanā.

Paldies kolēģim Dr. sc. ing. Ramūnam Tupčiauskam par ticības nešanu, par karstām zinātniskām diskusijām, par kopīgiem maziem un lieliem darbiem. Kolēģiem – Dr. sc. ing. Gunāram Pavlovičam un Mg. sc. ing Andrim Bērziņam.

Pateicība tiek izteikta Prof. José C. del Río -Instituto de recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, Spain., par KMR darbu veikšanu.

LVKĶI direktorei Mg. oec. Karīnai Orlovai par ieguldīto darbu ekonomiskā izvērtējumu tapšanā.

Īpaša pateicība maniem vecākiem – Sarmai Andžei un Miervaldim Andžam – par mīlestību, atbalstu un ticību. Māsai Lienei Andžei-Jansonei un viņas ģimenei par būšanu kopā priekos un bēdās.

Paldies maniem sievas vecākiem, Zigetai un Aivaram Vīķeļiem, par bērnu pieskatīšanu promocijas darba rakstīšanas laikā un ticību, ka viss izdosies.

Maniem bērniem – Regnāram un Lībai (zinātnieku un arheologu komandai) – par jokiem un lielo jautājumu: "Tēti, Tu jau uzrakstīji disertāciju? Vai mēs varam beidzot iet uz randiņu?"

Pateicība Tev, mana sieva, Dr. chem. Laura Andže, kas ar savu neatlaidību un manis turēšanu mērķa virzienā, vismaz gulēšanu šajā virzienā, ļāva nonākt līdz smaidīgam finišam. Tu esi mans balsts un jauda!

SAĪSINĀJUMU UN APZĪMĒJUMU SARAKSTS

ANO	Apvienoto Nāciju Organizācija
ASTM	Amerikas Testēšanas un materiālu apvienība (American Society for Testing and Materials)
AS	Akciju sabiedrība
ASV	Amerikas Savienotās Valstis
EM	Ekonomikas ministrija
EVC	Ekovate Climax
EVT	Ekovate TERMEX
EK	Eiropas Komisija
ES	Eiropas Savienība
FTIR	Furjē transformācijas infrasarkanā spektometrija
HPLC	Augstas izšķirtspējas šķidruma hromatogrāfija (High performance liquid chromotography)
IBC	Starptautiskais būvniecības kods (The International building code)
ISO	Starptautiskā standartizācijas organizācija (International Organization for Standardization)
KEM	Klimata un enerģētikas ministrija
KMR	Kodolmagnētiskā rezonanse
LLKC	Latvijas Lauku konsultāciju centrs
LCA	Dzīves cikla novērtējums (Life cycle assesment)
LVKĶI	Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūts
LVS	Latvijas Valsts standarts
LR	Latvijas Republika
LBN	Latvijas būvnormatīvs
RIS	Viedās specializācijas stratēģija
PVO	Pasaules Veselības organizācija
SI	Starptautiskā mērvienību sistēma
STC	Trokšņu caurlaidības klase (Sound transmission class)
SEM	Skenējošā elektronu mikroskopija
SCAN	Skandināvijas standarts
TRL	Tehnoloģiju gatavības līmeņi (Technology Readiness Levels)
TAPPI	Celulozes un papīra industrijas asociācija (Technical Association of the Pulp and Paper Industry)
TS	Tvaika sprādziens
THC	Tetrahidrokanabinols
UNEP	Apvienoto Nāciju Organizācijas Vides programma
VARAM	Viedās administrācijas un reģionālās attīstības ministrija
WRV	Ūdens aizturēšanas spēja (Water retention value)

IEVADS

Promocijas darba tēmas izvēles pamatojums un aktualitāte

Eiropas Savienība (ES) regulas un globālās labās prakses tendences klimata pārmaiņu ierobežošanai Latvijai ir likušas īstenot darbības siltuma enerģijas racionālai patērēšanai un taupīšanai. Šis enerģētikas aspekts kļuvis īpaši svarīgs pēc Krievijas iebrukuma un agresijas Ukrainā, jo pēdējo divu gadu laikā enerģijas cenas paaugstinājušās vairākas reizes, kas padarījis enerģijas taupīšanas aspektu ne tikai par politisku un ekoloģisku, bet arī par ekonomiski svarīgu jautājumu. Latvijā 2023. gadā izveidota Klimata un enerģētikas ministrija (KEM), kuras galvenie uzdevumi ir koordinēt klimata un enerģijas politiku Latvijā un kopumā rūpēties par valsts virzību enerģijas aprites ilgtspējas virzienā.

Lai gan pēdējo gadu laikā īstenota daudzdzīvokļu māju energoefektivitātes programma ar ES fondu atbalstu, energo-neefektīvu ēku daudzums Latvijā joprojām ir ļoti liels, bet visizteiktākā problēma vērojama tieši padomju okupācijas laikā būvētajās daudzstāvu ēkās. Kā secināts pētījumā par ēku kvalitāti un siltumnoturību ES, Latvijā ir zemākā mājokļu kvalitāte, ēkas ir ar salīdzinoši zemu siltumnoturību, jo ~15% ēku ir būvētas līdz 1940. gadam, kad celtniecībā pārsvarā izmantoja ķieģeļa, akmens mūra un koka konstrukcijas. Savukārt 65% iedzīvotāju dzīvo ēkās, kas uzbūvētas līdz 20. gadsimta deviņdesmitajiem gadiem, kad izmantoja materiālus, kas neatbilst mūsdienu siltumtehniskajām prasībām . Lai taupītu apkurei nepieciešamo enerģiju un izmaksas un pildītu ES regulu prasības par ēku siltumefektivitāti, ēkas nepieciešams siltināt atbilstīgi valsts minimālajām prasībām (Eiropas Savienības parlaments un padome, 2010). Latvijā šīs prasības apkopotas Ministru kabineta noteikumos Nr. 280 "Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 002-19 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika". Tomēr par atbilstošām šobrīd spēkā esošajām siltumtehniskajām prasībām var uzskatīt tās ēkas, kas uzbūvētas pēc 2015. gada (Ekonomikas Ministrija, 2020). Šo iemeslu dēļ šobrīd notiek un arī turpmāk gaidāma intensīva ēku fonda energoefektivitātes uzlabošana, respektīvi – ēku siltināšana.

Cilvēces rīcībā nav bezgalīgu enerģijas resursu, un Eiropā šis fakts sāpīgi izjusts gan pirmās degvielas krīzes laikā (20. gadsimta 70. gados), gan šobrīd, kad Krievijas iebrukums Ukrainā un gāzes piegāde tiek izmantota kā ierocis, kas izraisījis līdz šim nepieredzētu enerģētikas krīzi ES. Tāpēc īpaši aktuāla ir nepieciešamība ierobežot atkarību no fosiliem resursiem – naftas un tās produktiem, kas līdztekus pielietojumam degvielas veidā tiek izmantota arī siltuma enerģijas iegūšanai. Turklāt nafta un naftas produkti ir ne tikai pasaulē izmantotākie enerģijas avoti un kurināmais, bet arī galvenie oglekļa dioksīda emisijas avoti, kam ir būtiska ietekme uz klimata izmaiņām.

Enerģijas taupīšanas kontekstā pirmie regulējumi mājokļu energoefektivitātes jomā Eiropā parādījās 20. gadsimta septiņdesmitajos gados un turpmāk bija neatņemama projektēšanas un būvniecības procesa sastāvdaļa. Pakāpeniski mājokļu minimālās energoefektivitātes prasības tika *padarītas stingrākas* un radīts arvien pieaugošs pieprasījums pēc siltumizolācijas materiāliem. Sākotnēji komerciālie siltumizolācijas materiāli tika ražoti no neilgtspējīgiem sintētiskiem un minerālas izcelsmes materiāliem. Tomēr gan ES regulu, gan sabiedrības uz ilgtspēju un ekoloģiskiem aspektiem orientēto vēlmju iespaidā tirgus pieprasa alternatīvus siltumizolācijas materiālus – ilgtspējīgus, veselībai un videi draudzīgus produktus ar pozitīvu iespaidu uz telpas klimatu un vienlaikus ar minimālu ietekmi uz vidi un klimata izmaiņām. Šiem nosacījumiem atbilst no biomasas iegūti izolācijas materiāli, tomēr tie ir dārgāki nekā no neatjaunojamiem resursiem ražotie.

Globālajā tirgū ~80% no alternatīvajiem izolācijas materiāliem ir ražoti no koksnes celulozes un kokšķiedrām, tomēr kopumā alternatīvo izolācijas materiālu tirgus ir daudzpusīgs un plašs. Tiek piedāvāti vairāk nekā 60 dažādi izolācijas materiāli no celulozes, korķa, kaņepēm, aitas vilnas, niedrēm un citiem dabiskiem materiāliem, turklāt katram no tiem ir savas priekšrocības un trūkumi (Von Hans Koret, 2002). Patērētājam mūsdienās ir būtiskas ne tikai

siltumizolācijas īpašības, bet arī produkta ķīmiskais sastāvs un ietekme uz apkārtējo vidi, tāpēc joprojām pastāv liels pieprasījums pēc no biomasas ražotiem izolācijas materiāliem, kuriem būtu zemas ražošanas izmaksas un minimāla ietekme uz vidi.

Aizstājot biežāk lietoto šķiedru izejmateriālu – koksni – ar citiem lignocelulozes resursiem, piemēram, viengadīgu lauksaimniecības augu atlikumiem jeb blakusproduktiem, tiek nodrošināts ieguldījums racionālā un ilgtspējīgā biomasas resursu izmantošanā. Piemēram, viens hektārs kaņepju piesaista 9 līdz 15 tonnas CO_2, kas ir līdzvērtīgi jaunam mežam, taču laika ziņā patērē tikai piecus mēnešus, kas padara kaņepju augu pievilcīgu daudzveidīgai izmantošanai dažādu jaunu produktu radīšanā (Eiropas Komisija, 2023b). Gan Eiropā, gan Latvijā pieaug kaņepju audzēšanas apjomi. Galvenais auga audzēšanas mērķis ir garās lūksnes šķiedras, kas tiek pārdotas autobūves industrijai Vācijā un Francijā, bet pāri palikušos blakus produktu mazvērtīgo spaļu daļu transportēt tālāk par 60–120 km no ražotnes nav ekonomiski izdevīgi, tāpēc kaņepju spaļi ir pieejami lielā daudzumā un par zemu samaksu (Laizāns, 2010). Izmantojot lauksaimniecības augu atlikumus jaunu, ilgtspējīgu produktu ražošanā, tiek radīts būtisks ieguldījums vietējo resursu izmantošanā, un rezultātā tiek atbalstīts vietējais darbaspēks, stimulēta uzņēmējdarbība, nodrošināta stabila peļņa zemniekiem un *veicināta* ekoloģiska vide, kurā patīkami atrasties.

Visi iepriekšminētie konstatējumi un faktori rada pamatotu un aktuālu vajadzību pēc jauna, no vietējās izcelsmes nekoksnes lignocelulozes biomasas ražota siltumizolācijas materiāla izstrādes. Izmantojot Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūta (LVKĶI) attīstīto Tvaika sprādziena (TS) tehnoloģiju, no plaši pieejama lauksaimniecības augu blakusprodukta – kaņepju spaļiem – ir nepieciešams iegūt jaunu beramo siltumizolācijas materiālu ar zemām izmaksām un aktuālajiem regulējumiem atbilstīgām prasībām pret vidi. Lai maksimāli lietderīgi izmantotu izejmateriālu un izveidotu materiālu, kas var konkurēt ar komerciāli pieejamiem izolācijas materiālu produktiem, nepieciešams detalizēts un fundamentāls, bet vienlaikus augsti tehnoloģisks pētījums, kas iekļauj kaņepju spaļu TS priekšapstrādes metodikas izstrādi, iegūto šķiedrveida materiālu īpašību izpēti un beramā siltumizolācijas materiāla paraugu izvērtējumu.

Promocijas darba hipotēze – aizstāvāmā tēze: no kaņepju šķiedru ražošanas blakusproduktiem – kaņepju spaļiem – ar TS metodi iespējams iegūt beramo siltumizolācijas materiālu ar līdzvērtīgām vai labākām siltumizolācijas īpašībām nekā komerciāli pieejamiem analogiem siltumizolācijas materiāliem.

Zinātniskā darba mērķis – jaunu beramo siltumizolācijas materiālu izstrāde no Latvijā audzētu kaņepju spaļiem, izmantojot TS metodi.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi **pētnieciskie uzdevumi**:

1. izstrādāt metodi kaņepju spaļu apstrādei ar TS tehnoloģiju;
2. izveidot kaņepju spaļu šķiedru beramo siltumizolācijas materiālu paraugus;
3. noteikt beramo siltumizolācijas materiālu fizikālās un ķīmiskās īpašības, kā arī tās ietekmējošos faktorus;
4. noteikt beramo siltumizolācijas materiālu siltumizolācijas īpašības un tās ietekmējošos faktorus;
5. noteikt/plānot/prognozēt/ieteikt kaņepju spaļu šķiedru beramo siltumizolācijas materiālu pielietošanas iespējas atkarībā no iegūtajām īpašībām.

Šajā pētījumā iegūts un pētīts jauns izolācijas materiāls no kaņepju spaļiem, izmantojot TS apstrādi. Kā izejmateriāls lietota biomasa no Bialobrzeskie (Polija, kods 893), (*Cannabis sativa* L.) kaņepju šķirnes, kas ir pārbaudīta un labi aug Latvijā. Izolācijas materiāla izstrādei kaņepju spaļi apstrādāti ar TS metodi – ar ūdens tvaiku paaugstinātā spiedienā noslēgtā vidē. Pēc apstrādes laika biomasa dekompresijas ietekmē sašķiedrota, veidojot šķiedras un šķiedru kūļus. Iegūtajam materiālam pārbaudītas fizikālās un ķīmiskās īpašības, tās salīdzinātas ar

citiem siltumizolācijā lietotajiem materiāliem. No kaņepju spaļiem iegūtais materiāls definēts kā beramā (birstošā) izolācija.

Pētījuma zinātniskā nozīmība

1. Izstrādāts inovatīvs siltumizolācijas materiāls no kaņepju spaļiem ar TS tehnoloģiju.
2. Atrasts jauns TS pielietojums videi draudzīga siltumizolācijas materiāla ieguvē.
3. Izpētītas TS tehnoloģijas pielietojuma iespējas kaņepju spaļu pārveidei beramā siltumizolācijas materiālā.
4. Izpētīta TS tehnoloģijas mainīgo parametru ietekme uz iegūtā materiāla struktūru, īpašībām un pielietojuma iespējām siltuma un skaņas izolācijā.
5. Radītas jaunas zināšanas par TS tehnoloģijas pielietošanu lauksaimniecības atlieku apstrādē.

.

Pētījuma praktiskā nozīmība

1. Papildināta Latvijas kopējā zināšanu bāze par no biomasas radītiem produktiem.
2. Radīti zināšanu ietilpīgi, inovatīvi produkti ar augstu pievienoto vērtību un eksporta potenciālu.
3. Būtisks ieguldījums Latvijas klimatneitralitātes un CO_2 emisiju samazināšanas mērķu sasniegšanā energoefektivitātes jomā.
4. Izstrādāta praktiski pielietojama tehnoloģija kaņepju šķiedru ražošanas blakusproduktu – kaņepju spaļu pārstrādei produktos ar augstu pievienoto vērtību.
5. Sniegts ieguldījums pieaugošajā pieprasījumā pēc ilgtspējīgiem siltumizolācijas materiāliem.

1. SITUĀCIJAS ANALĪZE

Nodaļa satur uz promocijas darba tematiku attiecināmo tematu literatūras un starptautisko un nacionālo regulējumu apskatu, kā arī situācijas analīzi. 1.1. apakšnodaļā apskatīti klimata mērķi, energoefektivitātes jēdziens un ar šiem aspektiem saistītā situācija pasaulē, analizēti saistošie regulējumi un Latvijas nacionālie dokumenti, stratēģijas un mērķi. 1.2. apakšnodaļā analizēta Latvijas ēku fonda energoefektivitātes situācija – *status quo,* mērķi, veiktās un plānotās aktivitātes. 1.3. apakšnodaļā apskatīti un skaidroti siltuma vadīšanas fizikālie aspekti un siltumizolācijā lietotie materiāli. 1.4. apakšnodaļā aprakstīts biorafinēšanas princips un tā svarīgākie aspekti. 1.5. apakšnodaļā raksturotas TS hidrolīzes iespējas. 1.6. apakšnodaļā izvērtēta industriālo kaņepju resursu pieejamība lokāli un globāli, bet 1.7.apakšnodaļā sniegti būtiskākie nodaļas secinājumi un pamatota promocijas darba tematika un pētījums.

1.1. Energoefektivitāte – regulējumi un klimata mērķi

Saskaņā ar Eiropas Padomes direktīvu energoefektivitāte "ir attiecība starp iegūto jaudu, pakalpojumu, precēm vai enerģiju un ieguldīto enerģiju", savukārt energoefektivitātes uzlabošana ir definēta kā "energoefektivitātes pieaugums, kas panākts tehnoloģisku pārmaiņu, paradumu maiņas un/vai ekonomisku pārmaiņu rezultātā" (Eiropas Savienības parlaments un padome, 2012).

ES ir apņēmusies līdz 2050. gadam kļūt par pirmo klimatneitrālo pasaules daļu. Lai sasniegtu mērķi, plānots līdz 2030. gadam samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas vismaz par 55%, salīdzinot ar 1990. gada līmeni (pirmais gads, par kuru pieejami emisijas dati). Plāna sasniegšanai ir pieņemts Eiropas zaļais kurss, kura galvenie pamatprincipi enerģētikas jomā ir mērķēti uz siltumnīcefekta gāzu emisijas samazināšanu un cilvēku dzīves kvalitātes uzlabošanu kopumā, kā vienu no prioritātēm izvirzot ēku energoefektivitāti un tās uzlabošanu (Eiropas Komisija, 2022).

Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO) Ilgtspējīgas attīstības mērķi Latvijā attiecībā uz energoefektivitātes uzlabošanu nosaka, ka laikposmā līdz 2027. gadam cilvēkiem tiks palielinātas iespējas iegūt pietiekami kvalitatīvu un energoefektīvu mājokli (LR Pārresoru koordinācijas centrs, 2021).

Lai kopumā nodrošinātu Eiropas resursu ilgtspēju, jau 2007. gadā pieņemta pamatiniciatīva "Stratēģija 2020" jeb "Resursu ziņā efektīva Eiropa", kuras mērķis bija cīnīties pret klimata izmaiņām un ierobežot resursu izmantošanas radīto ietekmi uz vidi ar precīziem sasniedzamiem rādītājiem – par 20% zemāks enerģijas patēriņš visās nozarēs 2020. gadā (Eiropas Savienības parlaments un padome, 2012). 2018. gadā iniciatīva papildināta ar mērķi 2030. gadam – par 32,5% zemāks enerģijas patēriņš. Gadu gaitā enerģijas patēriņš Eiropā kopumā ir svārstījies, jo enerģijas vajadzības ietekmē gan ekonomikas norises, gan strukturālās izmaiņas rūpniecībā, gan energoefektivitātes pasākumu īstenošana, kā arī specifiski laikapstākļi (piemēram, aukstas vai siltas ziemas). 2020. gadā galvenais faktors, kas ietekmēja ES enerģijas patēriņu, bija ar Covid-19 saistītie ierobežojumi (piemēram, komandantstundas un ceļošanas ierobežojumi). Šo ierobežojumu dēļ 2020. gadā bija zemākais enerģijas patēriņa līmenis ES kopš 1990. gada, pārsniedzot plānoto 2020. gada mērķi par 5,5%. Tomēr 2021. gadā enerģijas patēriņš palielinājās, atpaliekot par 0,9% no 2020. gada mērķa un par 14,4% no 2030. gada mērķa (Eurostat, 2022). Latvijas ieguldījums kopējā enerģijas patēriņa līmenī ir bijis mainīgs, tomēr jaunākie dati liecina, ka 2021. gadā enerģijas patēriņš valstī samazinājies par 2,3%, salīdzinot ar vidējo patēriņu periodā no 2017. līdz 2019. gadam. 2023. gada (Eiropas Komisija) EK vienojās, un Eiropas Parlaments apstiprināja izmaiņas direktīvās, kas nosaka konkrētus enerģijas taupīšanas plānus, paredzot, ka enerģijas taupīšanas aktivitātēm jābūt vēl efektīvākām un mērķis jāsasniedz straujāk (Eiropas komisija, 2023a).

Apmēram 50% no ES energopatēriņa rada siltumapgāde un aukstumapgāde, savukārt, aptuveni 80% no šī apjoma izmanto tieši ēku siltumapgādē un aukstumapgādē, un šis apjoms rada 36% no visām CO_2 emisijām. Tieši tāpēc ES enerģētikas un klimata mērķu sasniegšana ir cieši saistīta ar ēku fondu atjaunošanu, energoefektivitāti izvirzot kā prioritāti un ieviešot principu "energoefektivitāte pirmajā vietā" (Eiropas Savienības parlaments un padome, 2018). 2019. gadā publicēts informatīvais ziņojums (LR Ministru kabinets, 2020a), kurā Latvija izvirza savus mērķus saskaņā ar ES direktīvās noteikto. 2020. gadā apstiprināts aktuālais Latvijas Nacionālais enerģētikas un klimata plāns kā vienu no galvenajām prioritātēm paredz ēku energoefektivitātes uzlabošanu, iekļaujot tādas darbības kā energoietaupījumu uzskaiti, ēku renovāciju, ne-emisiju tehnoloģijas, nodokļu politikas izmaiņas un jauna dzīvojamā fonda stratēģiju (LR Ministru kabinets, 2020c). Nacionālā plāna mērķi pilnībā saskan ar 2014. gadā EK apstiprināto Klimata un enerģētikas satvaru laika posmam līdz 2030. gadam (Eiropadome, 2014).

Līdz 2022. gada beigām ēku energoefektivitātes uzlabošanas pasākumus Latvijā īstenoja divas ministrijas – Viedās administrācijas un reģionālās attīstības ministrija (VARAM) ar atbildību par sabiedriskajām ēkām un Ekonomikas ministrija (EM) ar atbildības jomu par daudzdzīvokļu ēku siltināšanu un par energoefektivitātes politiku valstī kopumā. 2023. gada 1. janvārī darbu uzsāka KEM, kas tapa, reorganizējot EM un VARAM, pārņemot visas funkcijas, kas saistītas ar enerģētikas un klimata politikas jomu. Tuvākajos gados sagaidāmas nozīmīgas aktivitātes klimata mērķu sasniegšanā gan Latvijas līmenī, gan globāli, īpaši uzsverot ar energoefektivitāti saistītos aspektus.

1.2. Latvijas ēku fonda energoefektivitāte

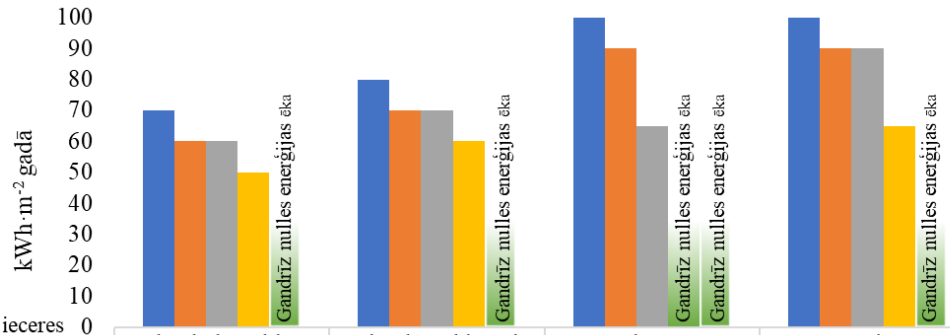
2017. gadā izstrādātā un 2020. gadā atjaunotā Ēku atjaunošanas ilgtermiņa stratēģija regulē un veicina Latvijas dzīvojamo un nedzīvojamo ēku (gan publisko, gan privāto) fonda renovāciju, lai līdz 2050. gadam būtiski uzlabotu fonda energoefektivitāti un dekarbonizēšanas līmeni, veicinot esošo ēku izmaksefektīvu pārveidošanu par gandrīz nulles enerģijas ēkām (Ekonomikas Ministrija, 2020). Saskaņā ar dokumentā minēto informāciju vidējais ēku patēriņa novērtējums apkurei 2016.gadā izsniegtajos energosertifikātos bija 157 $kWh \cdot m^{-2}$ gadā, savukārt 2019.gadā tas samazinājās līdz 140 $kWh \cdot m^{-2}$ gadā.

2014.–2020. gada ES fondu plānošanas periodā ēku energoefektivitātes uzlabošanas jomā Latvijā īstenotas vairākas atbalsta programmas:

- 4.1.1.specifiskais atbalsta mērķis „Veicināt efektīvu energoresursu izmantošanu, enerģijas patēriņa samazināšanu un pāreju uz AER apstrādes rūpniecības nozarē (LR Ministru kabinets, 2019a)";
- 4.2.1.1.pasākums "Veicināt energoefektivitātes paaugstināšanu dzīvojamās ēkās (LR Ministru kabinets, 2016a)";
- 4.2.1.2.pasākums "Veicināt energoefektivitātes paaugstināšanu valsts ēkās (LR Ministru kabinets, 2018)";
- 4.2.2. specifiskais atbalsta mērķis "Atbilstīgi pašvaldības integrētajām attīstības programmām sekmēt energoefektivitātes paaugstināšanu un atjaunojamo energoresursu izmantošanu pašvaldību ēkās (LR Ministru kabinets, 2016b)".

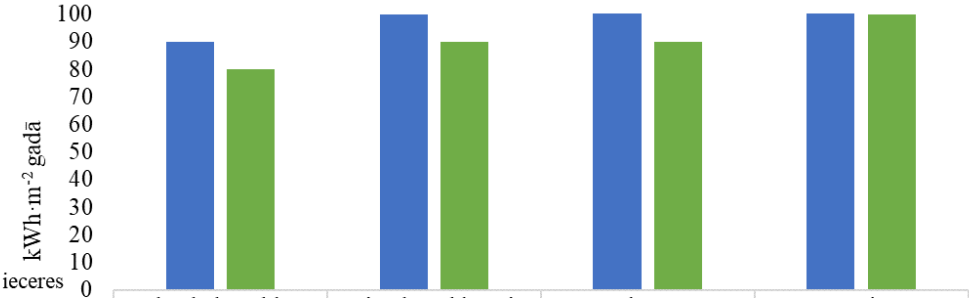
2020. gada 1. janvārī spēkā stājies Latvijas būvnormatīvs LBN 002-19 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika" (LR Ministru kabinets, 2020b), kas nosaka aktuālās Minimālās energoefektivitātes prasības un aizstāj Latvijas būvnormatīvu LBN 002-15 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika". Jaunajā normatīvā ir samazināta pieļaujamā U vērtība atsevišķiem elementiem, taču pastiprinātas prasības ēku energoefektivitātes minimālajam pieļaujamajam līmenim, energoefektivitātes novērtējumam apkurei gan jaunbūvēm, gan atjaunotajām un pārbūvētajām ēkām (1.1. att., 1.2. att.), kas sekmē direktīvās noteikto mērķi, lai, ēkas atjaunojot, padarītu tās par gandrīz nulles enerģijas ēkām un 2050.

gadā sasniegtu ēku dekarbonizācijas mērķi. Lai ēka būtu klasificējama kā gandrīz nulles enerģijas ēka, tai jāatbilst virknei prasību, kas iekļauj gan energoefektivitātes rādītājus (apkures rādītājs atbilst A klasei, vienlaikus nodrošinot telpu mikroklimata atbilstību normatīvo aktu prasībām), gan maksimālo pieļaujamo kopējo primārās enerģijas patēriņu apkurei, karstā ūdens apgādei, mehāniskajai ventilācijai, dzesēšanai, apgaismojumam(ne vairāk kā 95 kWh uz kvadrātmetru gadā), gan prasības ēkā izmantotajām ventilēšanas un apkures sistēmām, gan jānosaka, ka ēkā nav uzstādītas zemas lietderības fosilo kurināmo apkures iekārtas (LR Saeima, 2012).



Ēkas būvniecības ieceres dokumentācijas akceptēšanas periods	daudzdzīvokļu ēkas	viendzīvokļa vai divdzīvokļu ēkas	valsts un pašvaldības ēkas	pārējās nedzīvojamās ēkas
Līdz 31.12.2016	70	80	100	100
01.01.2017.-31.12.2017.	60	70	90	90
01.01.2018.-31.12.2018.	60	70	65	90
01.01.2019.-31.12.2020.	50	60	Gandrīz nulles enerģijas ēka	65
No 01.01.2021.	Gandrīz nulles enerģijas ēka	Gandrīz nulles enerģijas ēka	Gandrīz nulles enerģijas ēka	Gandrīz nulles enerģijas ēka

1.1. att. **Ēku energoefektivitātes minimālais pieļaujamais līmenis jaunbūvēm, energoefektivitātes novērtējums apkurei** (LR Ministru kabinets, 2020b)



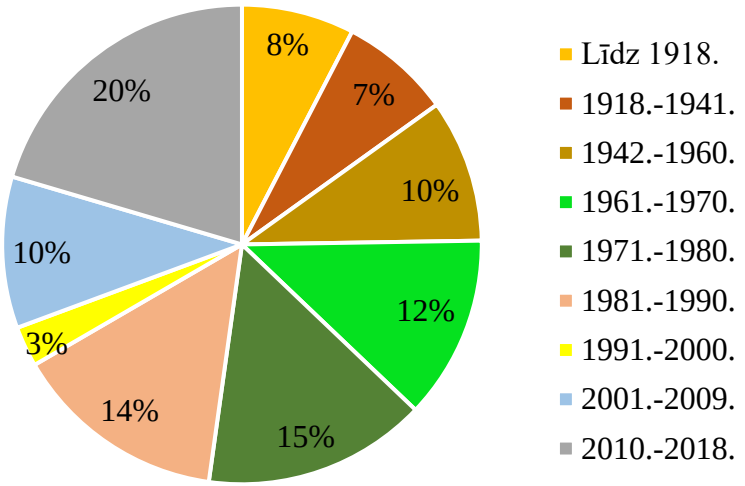
Ēkas būvniecības ieceres dokumentācijas akceptēšanas periods	daudzdzīvokļu ēkas	viendzīvokļa vai divdzīvokļu ēkas	valsts un pašvaldības ēkas	pārējās nedzīvojamās ēkas
21.11.2015.-31.12.2020.	90	100	110	110
No 01.01.2021.	80	90	90	100

1.2. att. **Ēku energoefektivitātes minimālais pieļaujamais līmenis ēku atjaunošanai un pārbūvei, energoefektivitātes novērtējums apkurei** (LR Ministru kabinets, 2020b)

Sabiedrības informēšanai un iesaistei energoefektivitātes uzlabošanā un CO_2 izmešu samazināšanā Latvijā ir īstenotas vairākas informatīvas kampaņas un citi pasākumi, piemēram, "Dzīvo siltāk!" (LR Ekonomikas ministrija, 2011), konkurss "Energoefektīvākā ēka Latvijā" (LR Ekonomikas Ministrija, 2010), AS "Latvenergo" Energoefektivitātes centrs (AS Latvenergo, 1997).

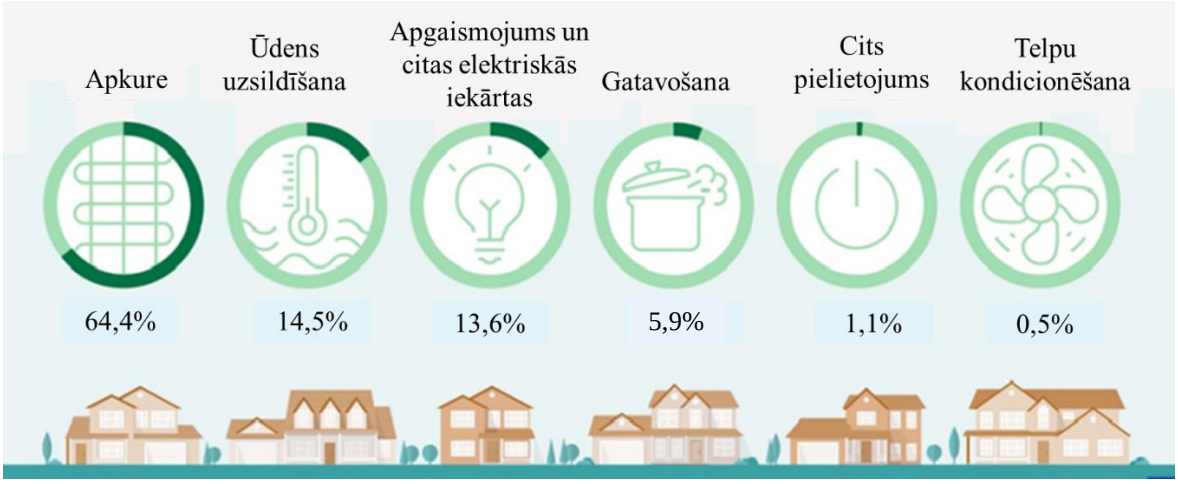
Kopumā, salīdzinot ar citām Eiropas valstīm, organizatoriskie un tiesiskie pasākumi māju fonda atjaunošanai, renovācijai un siltināšanai Latvijā norisinās lēnāk, tomēr pēdējos gados vērojams straujš aktivitātes pieaugums, kas saistīts tieši ar klimatneitralitātes mērķiem un

pieejamo ES finansējumu. Lai arī strauji attīstās jaunu ēku celtniecība, tomēr vēl joprojām lielu īpatsvaru (vairāk nekā 50% no dzīvojamā fonda) ieņem ēkas, kas celtas laika posmā no 1942. –1990. gadam (1.3. attēls). Būtībā tikai pēc 2015. gada uzbūvētās ēkas var uzskatīt par atbilstīgām pašreiz spēkā esošajiem energoefektivitātes normatīviem. Nedaudz zemākas energoefektivitātes īpašības ir no 2003. līdz 2015. gadam būvētajām ēkām (Ekonomikas Ministrija, 2020).



1.3. att. **Ēku sadalījums Latvijā pēc to celšanas gada** (Oficiālās Statistikas Portāls, 2023)

Lielāko daļu no ēkas kopējā enerģijas patēriņa sastāda tieši siltumenerģija, radot lielākos ar enerģijas patēriņu saistītos izdevumus (1.4. attēls). 80% no mājokļu skaita ES ir ar platību līdz 1000 m^2, un, lai samazinātu emisijas rādītājus, ir nepieciešams šīs ēkas efektīvi siltināt (Štrausa et al., 2011).



1.4. att. **Enerģijas patēriņa sadalījums mājsaimniecībās vidēji ES 2021.gadā** (Eurostat, 2022)

Salīdzinot ar dažu desmitgažu senu vēstures periodu (1960.–1990.), apkures sezonas garums Latvijā ir samazinājies līdz vidēji 198,7 dienām, bet apkures sezonas vidējā gaisa temperatūra paaugstinājusies līdz +1,1 °C (LR Ministru kabinets, 2019b). Arī nākotnes klimata pārmaiņu scenāriji paredz, ka turpmāk ziemas vidējā gaisa temperatūra turpinās ievērojami paaugstināties. Prognozēts, ka līdz 2100. gadam ziemas vidējā temperatūra paaugstināsies par 0,6 °C līdz 2,7 °C (Avotniece et al., 2017). Ir secināts, ka Latvijas klimats kļūst arvien siltāks, tomēr tas nesamazina energoefektivitātes veicināšanas nozīmi. Siltinātām ēkām ir priekšrocība karstuma viļņu laikā – lielāka siltuma inerce nodrošina ēkas un tās konstrukcijas neuzkaršanu karstās vasarās.

Enerģijas taupīšanas un enerģētikas aspekts kopumā kļuvis īpaši svarīgs pēc Krievijas iebrukuma un agresijas Ukrainā, jo šis notikums multireģionāli paaugstinājis cenu siltumenerģijai par 62,6–112,9% (Guan et al., 2023), kas padarījis enerģijas taupīšanas aspektu ne tikai par politisku un ekoloģisku, bet arī par ekonomiski svarīgu jautājumu.

Energoefektivitātes uzlabošana kā viena no prioritātēm ir iekļauta arī Latvijas Nacionālajā attīstības plānā 2021.–2027. gadam, paredzot visaptverošus energoefektivitātes pasākumus enerģijas patēriņa mazināšanai un nosakot, ka princips "energoefektivitāte pirmajā vietā" ir prioritāri vērtējams, pieņemot jebkurus lēmumus par politiku un investīcijām infrastruktūrā (Pārresoru koordinācijas centrs, 2020).

Līdz šim īstenoto ES atbalsta programmu pasākumu kopums ir sekmējis būtisku enerģijas ietaupījumu un siltumnīcefekta gāzu samazinājumu gan attiecībā uz apstrādes rūpniecības ražošanas ēkām, gan valsts un pašvaldību ēkām, gan privātīpašumā esošajām ēkām. Tomēr Latvijai ir jāveic vēl daudz politisku un praktisku soļu, lai sasniegtu gan dažādu ES direktīvu un Zaļā kursa mērķus, gan nacionālajos stratēģiskajos dokumentos plānoto. Tomēr no praktiskā viedokļa vislielāko ieguldījumu ēkas energoefektivitātes uzlabošanā sniedz tieši ārējo konstrukciju siltumizolēšana.

1.3. Siltumizolācija

1.3.1. Siltumizolācijas darbības veidi

Eksistē trīs siltuma pārneses veidi (1.5. attēls):

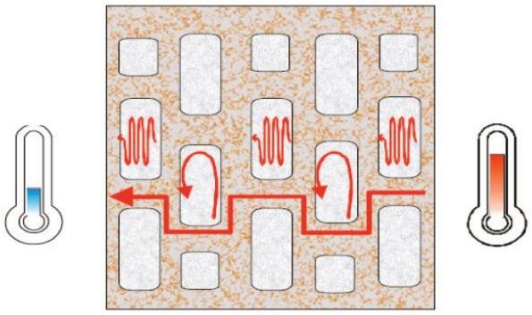
1. Siltuma vadīšana jeb pārvade – siltuma izplatīšanās cietā ķermenī, šķidrumā vai gāzē daļiņu tiešā saskarē no siltākas ķermeņa daļas uz aukstāku. Šo procesu izraisa temperatūras starpība jeb temperatūras gradients.

1.5. att. **Siltuma pārvades veidi** (*Mācību Platforma "Uzdevumi.Lv,"* 2023)

Siltuma pārvade notiek, jo daļiņas ar lielāku enerģiju (augstāku temperatūru) atdod enerģiju daļiņām ar mazāku enerģiju (zemāku temperatūru). Katrai vielai un materiālam ir noteikts siltumvadītspējas koeficients λ (lambda), un tas ir atkarīgs no vielas īpašībām un parametriem. No siltumizolācijas aspekta siltuma vadīšana ir siltuma zudumi caur ēkas konstrukciju vai izolācijas materiālu, un katram siltumizolācijā lietotajam materiālam ir noteikta siltumvadītspēja, kas raksturo tā efektivitāti. Siltumvadīšanas mehānismu 19. gs. sākumā pētīja Žans Batists Furjē (Francija) (Fļorovs et al., 1985), bet siltumvadīšanas likumu sauc par Furjē likumu.

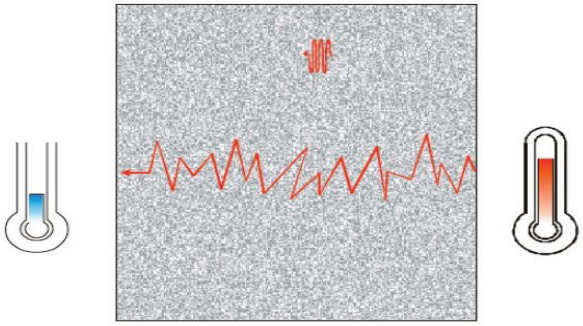
2. Konvekcija – siltuma izplatīšanās šķidrumā vai gāzē, pārvietojoties vielas slāņiem. Konvekciju izraisa temperatūras, blīvuma vai spiediena starpība. Pastāvot temperatūru un līdz ar to arī blīvumu, un spiedienu starpībai starp dažādiem gāzes vai šķidruma slāņiem, rodas

vielas daļiņu plūsma, kas virzīta, lai samazinātu spiedienu starpību (1.6. attēls) (Fļorovs et al., 1985). Daļiņu pārnesto enerģiju sauc par siltuma daudzumu. Ēku siltumizolācijas aspektā dabisko konvekciju apskata kā temperatūras izmaiņu izraisītu gaisa kustību ap siltuma avotu, savukārt piespiedu konvekcija, piemēram, vēja ietekmē, veido spiediena gradientus ēkas apvalkā, kas var būtiski ietekmēt siltumizolācijas darbību.



1.6. att. **Konvektīvo siltumizolācijas materiālu siltuma pārneses process** (Štrausa et al., 2011)

3. Siltuma starojums – siltuma izplatīšanās telpā vai starp ķermeņiem, siltam ķermenim izstarojot enerģiju elektromagnētisko viļņu jeb infrasarkano staru veidā (Fļorovs et al., 1985). Tas ir vienīgais siltumpārvades veids, kas darbojas vakuumā. Mūsdienas arvien lielāku pielietojumu siltumizolācijā gūst vakuumizolācijas materiāli (1.7. attēls) un atstarojošā siltumizolācija (Beltran et al., 2009; Jakovičs, 2014; Jakovičs et al., 2013; Johansson, 2012).



1.7. att. **Vakuuma siltumizolācijas materiālu siltuma pārneses process** (Johansson, 2012)

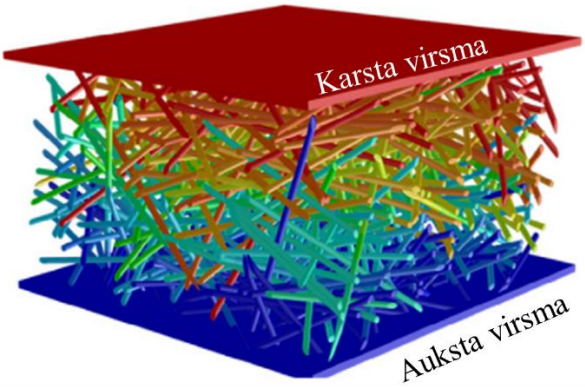
Vakuuma siltumizolācijas gadījumā, lai sasniegtu siltumizolācijas materiāla biezuma samazinājumu pie nemainīgas siltuma aizsardzības, gaiss no izolācijas slāņa tiek izsūkts. Šāda tipa siltumizolācijas materiālu ierīkošanai ir nepieciešams augsti kvalificēts darbaspēks, lai nodrošinātu siltumizolācijas materiāla efektīvu ekspluatāciju (Jakovičs et al., 2013; Štrausa et al., 2011). Siltumtehnikā kā atstarojošo jeb reflektīvo siltumizolācijas materiālu lieto virsmas pārklājumus ar augstu atstarošanas pakāpi (virs 90 %), kas siltumstarojuma veidā siltumu atstaro atpakaļ telpā.

Siltumizolācijas materiāla efektivitāti nosaka tā siltumvadītspēja (siltumvadītspējas koeficients), spēja pretoties konvekcijai un siltuma starojumam (Al-Homoud, 2005).

1.3.2. Siltuma pārnese šķiedru materiālos

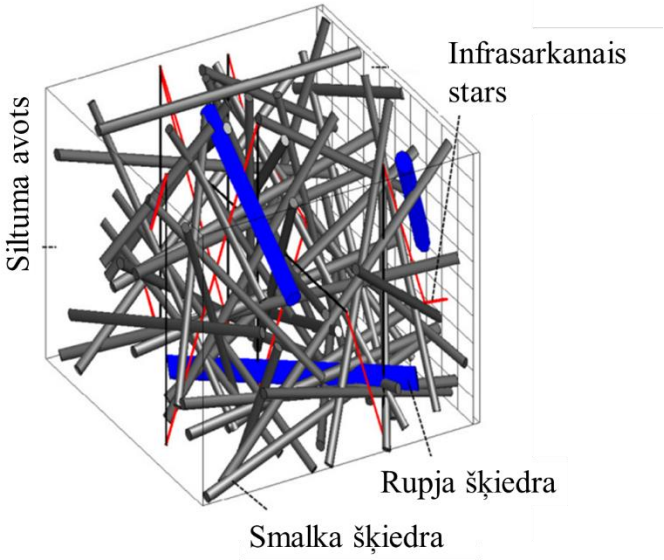
Šķiedru izolācijas materiālos var pilnībā novērst siltuma konvekciju, kā arī samazināt siltumpārvades un siltuma starojuma procesus. Siltumpārvade šķiedru materiālā notiek gan uz piesaistītā mitruma un šķiedrās klātesošā gaisa rēķina, gan cietā fāzē šķiedru saskares vietās, tāpēc šādu materiālu siltumvadītspēja atkarīga no mikrostrukturālajiem parametriem,

piemēram, cietās fāzes tilpuma daļas un blīvuma, cietās fāzes un starpšūnās esošā ūdens un gaisa siltumvadītspējas, šķiedru izmēriem un orientācijas, šķiedru saskares virsmas. Lai izprastu un modelētu siltuma pārneses procesus, veidoti šķiedru materiālu modeļi (1.8. attēls) un aprēķināts, ka šķiedru siltumizolācijas siltumvadītspēja palielinās, ja palielina šķiedru orientāciju plaknē, bet šķiedru mikrostrukturālie parametri neietekmē materiāla veiktspēju, ja cietās fāzes un piesaistītā ūdens un gaisa siltumvadītspēja ir līdzīga (Arambakam et al., 2013). Ja materiāls sastāv no dažāda veida šķiedrām, tad siltumizolācijas efektivitāti ietekmē vairāk parametru.



1.8. att. **Siltumpārneses procesu modelēšanas piemērs šķiedru siltumizolācijā** (Arambakam et al., 2013)

Šķiedru materiālos siltums tiek pārnests arī starojuma veidā. To iespējams prognozēt, izmantojot komplicētus diferenciālvienādojumus, ņemot vērā gan eksperimentāli, gan analītiskos aprēķinos iegūtus materiāla raksturlielumus, piemēram, atsevišķu šķiedru īpašības, starojuma izkliedes īpašības, šķiedras diametru, šķiedru optiskās īpašības, materiāla porainību un biezumu (1.9. attēls) (Arambakam et al., 2012).



1.9. att. **Infrasarkano staru trajektorijas vizualizācija starojuma siltuma pārneses modelēšanai šķiedru materiālā** (Arambakam et al., 2012)

Pētījumi, kurā kombinētas un salīdzinātas šķiedru materiālu siltumpārvades simulācijas un eksperimentālo mērījumu metodes, parādīja, ka ir virkne citu parametru, kam ir ietekme uz faktisko materiāla siltumvadītspēju. Dažādu kapilāro parādību dēļ būtiska ietekme uz

temperatūras sadalījumu un pārdali ir šķiedrās esošajam mitrumam. Piemēram, ja paraugā iekļūst mitrs gaiss, materiāla aukstākos apgabalos var veidoties ledus (Arambakam et al., 2014; Zach et al., 2016).

1.3.3 Siltumizolāciju raksturojošie lielumi

Lai iespējami efektīvi samazinātu siltuma zudumus caur sienu konstrukciju, nepieciešams pielietot izolācijas materiālus, izvērtējot to tehniskos rādītājus, kā arī ievērojot normatīvu LNB 002-19. Siltumizolāciju raksturojošie lielumi ir:

- tilpummasa ρ (rho) – SI (Starptautiskā mērvienību sistēma) mērvienība kilograms uz kubikmetru ($kg \cdot m^{-3}$). Lielums, kas raksturo masas attiecību pret visu tā aizņemto tilpumu, kurā ietvertas arī poras un tukšumi. Katru izolācijas materiālu raksturo tā optimālā tilpummasa. Konvektīvajiem materiāliem, ja ir mazāka tilpummasa, tad ir labākas siltumizolējošās īpašības, bet, neskatoties uz to, katram materiālam ir optimālais blīvums, kuru sasniedzot, iegūst optimālos masas un siltumvadītspējas īpašības. Samazinoties optimālajai tilpummasai, siltumvadītspējas koeficients pieaug, un izolācijas īpašības pasliktinās (Noviks, 2002; Paroc, 2021; Sihabut & Laemsak, 2010).
- siltumvadītspējas koeficients λ (lambda) – SI mērvienība vats uz metru un kelvinu ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Siltumvadītspējas koeficients raksturo materiāla īpatnējo siltumvadītspēju laboratorijas apstākļos. Pie vienāda siltumizolācijas biezuma labāk siltumu aizturēs materiāls ar zemāku lamda īpatnējo vērtību. Siltumvadītspēja apraksta siltuma daudzumu, kas izplūst caur vienu vienību materiāla virsmas vienā laika vienībā, kad uz to iedarbojas temperatūras gradients. Siltumvadītspēja ir atkarīga no materiāla mitruma un materiāla temperatūras (Abdou & Budaiwi, 2013; Al-Homoud, 2005; Korjenic et al., 2011; Ratnieks, 2014).
- U – siltuma caurlaidības koeficients. SI mērvienība vats uz kvadrātmetru un kelvinu ($W \cdot m^{2} \cdot K^{-1}$). Vērtību U raksturo siltumizolācijas materiāla biezums un siltumvadītspējas koeficienta lielums. Koeficients norāda, kāds siltuma daudzums laika vienībā izplūst caur konstrukcijas vienu m^2 lielu laukumu, ja temperatūras starpība starp norobežojošo konstrukciju abām pusēm ir viens grāds. Jo mazāka ir U vērtība, jo mazāki zudumi ir caur konstrukciju (Jakovičs, 2014; Štrausa et al., 2011). Šo mērījumu var noteikt laboratoriski vai aprēķināt pēc formulām. Latvijas būvnormatīvs LBN 002-19 (LR Ministru kabinets, 2020b) nosaka, ka maksimāli pieļaujamās vērtības ārsienām ir 0,23–0,30 atkarībā no ēkas veida.

$$U = \frac{1}{R} \tag{1.1}$$

kur R – termiskā pretestība, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

Termisko pretestību R aprēķina pēc formulām:

$$R = \frac{1}{U} \tag{1.2}$$

$$R = \frac{d}{\lambda} \tag{1.3}$$

kur d – iestrādātā materiāla biezums, m;
λ – materiāla siltumvadītspējas koeficients, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

Kopējo termisko pretestību dažādiem siltuma pārneses veidiem aprēķina tāpat kā paralēlā slēguma pretestību elektriskajās ķēdēs.

$$\frac{1}{R_{kopējais}} = \frac{1}{R_{vad}} + \frac{1}{R_{star}} + \frac{1}{R_{konv}} \tag{1.4}$$

- Siltuma inerce P raksturo, cik ātri vai lēni materiāls uzsilst paaugstinātas temperatūras ietekmē un cik ātri vai lēni atdod siltumu (Soret et al., 2021). Siltuma inerce ir tieši atkarīga no siltumvadītspējas, siltumietilpības un blīvuma (J. Wang et al., 2010). To aprēķina pēc formulas:

$$P = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot Cp} \tag{1.5}$$

kur P – siltuma inerce, $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1/2}$;
λ – siltumvadītspējas koeficients, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
ρ – blīvums, $kg \cdot m^{-3}$;
C_p – īpatnējā siltumvadītspēja pie nemainīga spiediena, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

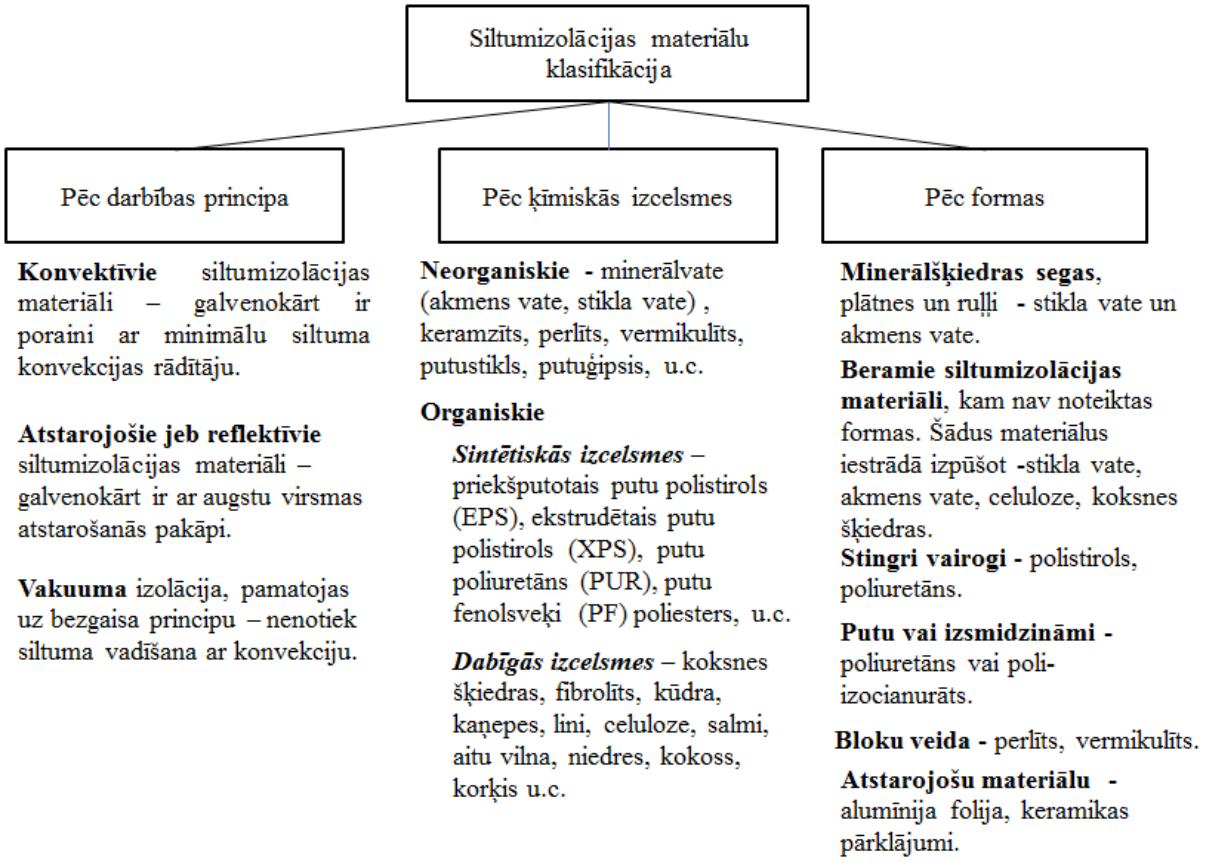
- Materiāla siltuma inerci ietekmējošais faktors lielā mērā ir arī materiāla uzbūve, kas korelē ar materiāla siltumietilpības rādītāju C_p. Īpatnējā siltumietilpība ir definēta kā siltuma daudzums, kas ir jāuzņem kilogramam konkrētas vielas, lai paaugstinātu tās temperatūru par vienu grādu ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$). Dotās vielas temperatūra var mainīties, vai nu pie nemainīga spiediena vai pie nemainīga tilpuma, tāpēc pētījumos lieto īpatnējo siltumietilpību pie nemainīga spiediena (C_p), jo tas lielākoties ir nemainīgs.
- μ (mi) – ūdens tvaika caurlaidības koeficients raksturo pretestību ūdens tvaikam. Tas parāda, cik reižu materiāla tvaika caurlaidības koeficients ir mazāks par nekustīga gaisa tvaika caurlaidības koeficientu. Izolācijas materiāliem šis koeficients svārstās no 1 līdz 100. Pareizi ierīkotā konstrukcijā materiālam ar lielāku μ koeficientam jābūt iestrādātam konstrukcijas siltajā pusē. Piemēram, neventilējamai fasādei nedrīkst veidot apdari no ūdens tvaika necaurlaidīga apdares slāņa. Ūdens saturs materiālā vada siltumu būtiski labāk nekā gaiss (Štrausa et al., 2011).

1.3.4 Siltumizolācijas materiāli

Materiāls tiek klasificēts kā siltumizolācijas materiāls, ja siltumvadītspējas koeficients λ nav lielāks par 0,065 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, bet izcili siltumizolācijas materiāli sasniedz $\lambda < 0{,}025$ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Zhou et al., 2010). Siltumizolācija ir materiāls vai to kopums ar vienu vai vairāku materiālu kombināciju, kas, pareizi pielietota un iestrādāta, samazina siltuma plūsmu. Siltumizolācija samazina siltuma plūsmu virzienā ārpuse - telpa un telpa - ārpuse, pateicoties augstai siltumvadītspējas pretestībai materiālā (Al-Homoud, 2005). Mūsdienās praktiski neviena dzīvojamā ēka netiek celta bez siltumizolācijas lietošanas būvkonstrukcijās.

Viens no galvenajiem dzīvojamo ēku izolācijas materiālu uzdevumiem ir nodrošināt ēkās optimālu mikroklimatu visā to ekspluatācijas laikā, tas ir, temperatūras un gaisa mitruma režīmu, vienlaikus patērējot minimālus līdzekļus. Jo labāka būs sienas siltumvadītspējas pretestība, jo mazāki būs patērētie līdzekļi optimāla mikroklimata režīma nodrošināšanai telpās. Ar šādiem pētījumiem nodarbojas būvfizika (Noviks, 2002) – zinātne par fizikālajiem procesiem, kas notiek ēku, būvju norobežotajās konstrukcijās un to materiālos. Būvfizika pēta siltuma un mitruma procesus, to siltumfizikālās īpašības. Siltumizolācijas materiālu pētniecībā lieto teorētiskās izpētes, aprēķinu un pārbaudes metodes laboratorijas un dabiskos apstākļos.

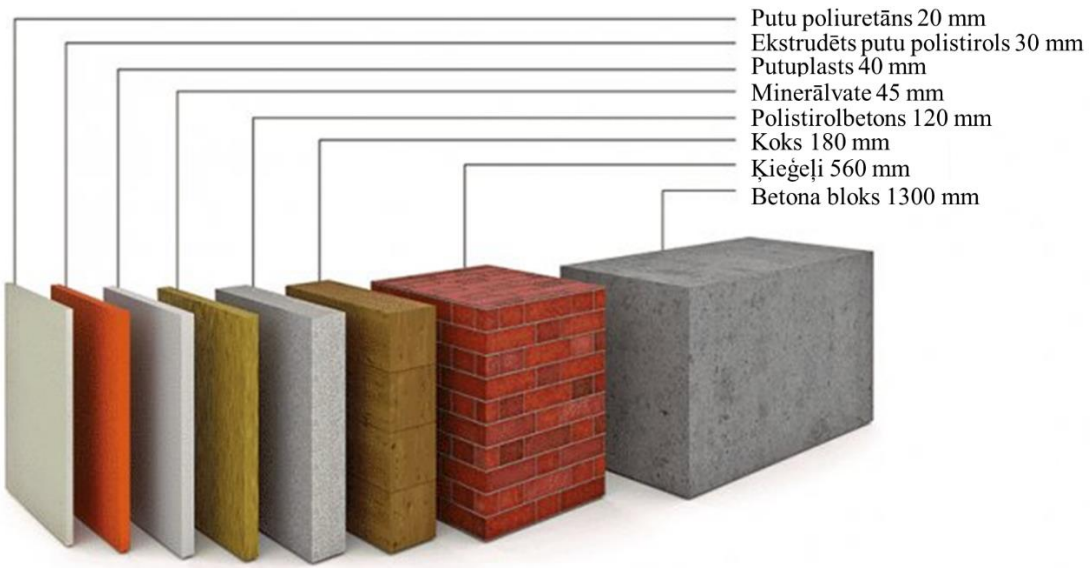
Siltumizolācijas materiālus klasificē pēc darbības principa, ķīmiskās izcelsmes un ražotās formas (1.10. attēls) (Vulāns, 2011).



1.10. att. **Siltumizolācijas materiālu klasifikācija** (Vulāns, 2011).

Atkarībā no materiāla struktūras un veida izbūvējamās ārsienas biezums var atšķirties, saglabājoties vienādai siltumvadītspējai (1.11. attēls). Tādēļ, lai ēkas konstrukcija sasniegtu katra materiāla labākās īpašības, tos nepieciešams kombinēt savā starpā, iegūstot optimālu telpas klimatu. Materiāla efektivitāti ietekmē arī materiāla siltuma pārnešanas veids, bet bieži vien vienā materiālā var darboties arī visi siltuma pārneses veidi (Noviks, 2002).

Meklējot materiālus, kas būtu vienlaikus efektīvi, plaši un viegli izmantojami un iespējami dabīgi, siltumizolācijas materiālu klāsts arvien paplašinās. Tostarp beramajiem siltumizolācijas materiāliem ir vairākas priekšrocības, piemēram: (i) piemērotība iestrādei īpaši sarežģītās ēkas konstrukcijas daļās, piemēram, šauras vietas, iedobumi, līkumi, kabatas un citas sarežģītas konfigurācijas telpas ar apgrūtinātu piekļuvi lokšņveida materiālu iestrādei, (ii) nav nepieciešamas saistvielas kā lielākajai daļai citu siltumizolācijas materiālu.



1.11. att. **Dažādu materiālu siltumizolācijas īpašību salīdzinājums. Vienāds siltumvadītspējas koeficients pie dažādiem biezumiem** (Iwarm-lv.techinfus.com, 2024)

Tā kā promocijas darba mērķis ir saistīts ar beramā materiāla izveidi, tiek uzskaitīti un raksturoti materiāli, kas var tikt pielietoti kā beramie izolācijas materiāli (1.1. tabula).

1.1. tabula

Neorganiskās un organiskās izcelsmes siltumizolācijas materiāli (Štrausa et al., 2011)

Nr.	Siltumizolācijas materiāls	Tehniskie dati				
		ρ, (kg·m^{-3})	**λ, (W·m^{-1}·K^{-1})**	**μ, (1-100)**	**Uguns aizsardzības klase**	**Materiāla attēls**
1.	Minerālvate Isover	10-200	0,030-0,045	1-2	A2	
2.	Akmens vate Paroc	28-200	0,033-0,041	1	A1	
3.	Keramzīts	300-400	0,1-0,16	2-8	A1	

1.1. tabulas turpinājums

Nr.	Siltumizolācijas materiāls	Tehniskie dati				
		ρ, ($kg \cdot m^{-3}$)	λ, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	μ, (1-100)	Uguns aizsardzības klase	Materiāla attēls
4.	Korķa lodītes	50-150	0,045-0,055	5-10	E	
5.	Kokosšķiedra	75-100	0,050-0,050	1	E	
6.	Kokvilna	20	0,040-0,041	1-2	E	
7.	Aitu vilna	16-18	0,040-0,045	1-2	E	
8.	Putu stikls	115-220	0,04-0,06	60	A1	
9.	Perlīts	90-490	0,045-0,070	-	A1,B2	

Nr.	Siltumizolācijas materiāls	Tehniskie dati				
		ρ, (kg·m^{-3})	λ, (W·m^{-1}·K^{-1})	μ, (1-100)	Uguns aizsardzības Klase	Materiāla attēls
10.	Linu šķiedras	20-80	0,040-0,045	-	E	
11.	Kaņepju spaļi (neapstrādāti)	90-115	0,05-0,075	-	E	
12.	Celulozes šķiedras	30-80	0,040-0,06	-	E	
13.	Kanaizols (kaņepju spaļi sajaukti ar celulozes šķiedrām)	50-95	0,061	-	E	
14.	Kokšķiedras	30-270	0,040-0,090	2	E	

Vēsture liecina, ka cilvēces attīstība un ekonomiskās aktivitātes vienmēr ir bijušas cieši saistītas ar konkrētu materiālu ieguvi un izmantošanu. Par to liecina vēsturisko periodu nosaukumi, piemēram, akmens laikmets, dzelzs laikmets un bronzas laikmets. Informācija par materiālu izmantošanu noteiktā periodā ir būtiska, jo iet ciešā kopsolī ar globālo situāciju un

diemžēl arī ar vides problēmām. Mūsdienas līdz nesenam laikam varēs saukt par fosilo laikmetu, savukārt šobrīd globālās tendences liecina par fokusu uz no biomasas jeb atjaunojamajiem (atjaunīgiem) resursiem iegūtiem materiāliem un enerģiju. Vienā vārdā tos var dēvēt par ilgtspējīgiem (*sustainable*) resursiem jeb izejmateriāliem, un to lietošana veicina klimata pārmaiņu palēnināšanu un vides problēmu samazināšanu.

1.3.5. Dabisko šķiedru siltumizolācija

Lignocelulozes bāzes siltumizolācijas materiāli galvenokārt sastāv no koksnes vai lauksaimniecības augu lūksnes šķiedrām, kuru galvenie un tradicionālie izmantošanas veidi ir būvniecībā kā konstrukcijas materiāls un tekstilrūpniecībā. Lai nozaru vajadzības nekonkurētu, alternatīvu siltumizolācijas materiālu izstrādē jāfokusē uzmanība uz tādiem izejmateriāliem vai izejmateriālu atliekām, kas citās nozarēs ir mazāk pieprasītas. Atjaunojami, videi draudzīgi, zemu izmaksu un augstas siltumnoturības izolācijas materiāli ir ļoti pieprasīti.

Beramie siltumizolācijas materiāli ar mehāniskas smalcināšanas un TS tehnoloģiju ir iegūti no Latvijā ievāktiem kviešu salmiem, niedrēm un kukurūzas kātiem (Tupciauskas et al., 2023a). Pētījumā iegūts materiāls ar zemu tilpumblīvumu, optimālās siltumvadītspējas vērtības 0,0409–0,0439 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$sasniegtas pie tilpumblīvuma no 45 $kg \cdot m^{-3}$ līdz 60 $kg \cdot m^{-3}$.

Siltumizolācijas funkcijas piemīt arī t.s. kaņepju spaļu betonam. To iegūst, sajaucot kaņepju spaļus ar hidratētiem jeb dzēstiem kaļķiem un ūdeni noteiktās proporcijās (Essaghouri et al., 2023). Kaņepju betona siltumvadītspēja parasti ir no 0,06 līdz 0,07 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. U-vērtības kaņepju betonam atkarīgas no biezuma, izmantotās saistvielas veida un blīvuma, tomēr tipiskā U vērtība (350 mm biezai kaņepju betona sienai) ir 0,17 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (Hempcrete, 2014). Latvijā izstrādāts un patentēts alternatīvs siltumizolācijas materiāls, kurā kaļķi aizstāti ar organogēniem ezera nogulumiem – sapropeli. Patentēto materiālu iesaka izmantot koka karkasa ēkās, kas nav augstākas par diviem stāviem ar iestrādes blīvumu 140–170 $kg \cdot m^{-3}$. Materiāla siltumvadītspēja ir vidēji 0,0552 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Pleikšnis & Teirumnieka, 2014).

Ir izpētīts, ka beramo siltumizolācijas materiālu ar TS tehnoloģiju var iegūt no baltalkšņa un bērza koksnes atlikumiem, un materiāla siltumvadītspēja ir 0,053–0,057 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Andzs et al., 2016).

Netradicionālo dabīgo izejmateriālu lietošana siltumizolācijas materiālu izstrādei ir daudz pētīta, tomēr to praktiskais pielietojums nav plaši izplatīts, jo bieži vien apstājas eksperimentālo pētījumu un laboratorijas līmenī (Asdrubali et al., 2015).

Niedres (*Phragmites australis*) saturoši siltumizolācijas materiāli sastopami tirgū, visbiežāk no sastiprinātām niedrēm gatavotu paneļu veidā, un tos lieto sienu un jumtu siltināšanai reģionos, kur ir to dabīgās izplatības reģions, piemēram, Austrumeiropā. Niedru paneļa siltumvadītspēja ir no 0,045 līdz 0,056 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, blīvums svārstās no 130 līdz 190 $kg \cdot m^{-3}$ un īpatnējais siltums sasniedz maksimālo vērtību 1200 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (Bodner, 2023; Hiss Reet, 2023).

No cukurniedru atlikumiem jeb bagases gatavotām plātnēm ar blīvumu 100 $kg \cdot m^{-3}$ siltumvadītspēja ir 0,046 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Manohar et al., 2006)(Manohar, 2012). Bagases plātņu siltumvadītspēja atkarīga no plātnes blīvuma un 250 $kg \cdot m^{-3}$ blīvai plātnei siltumvadītspēja ir 0,049 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, bet 350 $kg \cdot m^{-3}$ blīvai līdz 0,055 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Panyakaew & Fotios, 2011).

No vilkvālītes šķiedrām ar sintētisku saistvielu izveidotiem paneļiem ar blīvumu 200 līdz 400 $kg \cdot m^{-3}$ siltumvadītspēja bija starp 0,0438 un 0,0606 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Luamkanchanaphan et al., 2012). Savukārt Fraunhofer institūtā veiktā pētījumā iegūts vilkvālītes šķiedru materiāls ar siltumvadītspēju 0,052 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Frauenhofer-Gesellschaft, 2013).

No kukurūzas vālīšu atlieku un augsnes maisījuma izgatavots sienu pildmateriāls atrasts Portugālē 18. un 19. gadsimtā būvētās mājās (Pinto et al., 2011), tomēr mūsdienu pētījumos konstatēts, ka no smalcinātām kukurūzas vālītēm un koksnes līmes gatavoto paneļu

siltumvadītspēja ir ne zemāka par 0,101 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ un līdz ar to neatbilst rādītājiem, lai šo materiālu izmantotu siltumizolācijā (Pinto et al., 2012),(Paiva et al., 2012).

Kokvilnas ražošana, kuru galvenokārt izmanto tekstilrūpniecībā, rada atlikumu – stiebrus jeb kātus. Pētījums rāda, ka no kokvilnas kātiem iegūtu šķiedru plātnes siltumvadītspēja bija no 0,0585 līdz 0,0815 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$atkarībā no blīvuma (Zhou et al., 2010).

Dateļpalmas biomasa, kas paliek pāri pēc dateļu iegūšanas (lapas, kāti, ķekaru atliekas), bez papildu apstrādes testēta kā siltumizolācijas materiāls un iegūtie rezultāti uzrāda siltumvadītspēju 0,072 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Asdrubali et al., 2015).

Atšķirīgu izejmateriālu lietošanai dažādos pasaules reģionos ir kas kopīgs. Tā ir izvēle lietot lokāli augošu vai kultivētu augu, kas pieejams lielos apjomos. Piemēram, tropiskajos reģionos bieži sastopamais sansevjēras augs (*Sansevieria roxburghiana*) ir ticis izmantots šķiedru iegūšanai, kā arī testētas tā izolācijas spējas. Izpētīts, ka sasniegtā siltumvadītspēja 0,132 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ nav pietiekama, lai materiālu uzskatītu par siltumu izolējošu (Ramanaiah et al., 2011). Savukārt duriana auglis ir viens no izplatītākajiem augļiem Dienvidaustrumāzijā, īpaši Taizemē. Šo augļu atliekas var izmantot jaunu siltumizolācijas materiālu ieguvē. Piemēram, duriana mizas plātnēm ar blīvumu 428 $kg \cdot m^{-3}$ siltumvadītspēja ir 0,064 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Khedari et al., 2003), bet no duriana un kokosšķiedrām gatavotām plātnēm siltumvadīstpēja bija 0,0728 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Khedari et al., 2004). Pārstrādājot šķiedrās eļļas palmas atliekas, izgatavots materiāla paraugs, kura siltumvadītspēja ir 0,055 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pie blīvuma 100 $kg \cdot m^{-3}$ (Manohar, 2012). Ananasu auga lapas kā pārtikas industrijas atkritums visbiežāk tiek sadedzināts enerģijas ieguvei, tomēr no sasmalcinātu un izžāvētu lapu masas ar dabīgas gumijas piedevu izveidoti paneļi ar siltumvadītspēju 0,035 un 0,043 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pie blīvumiem 178 un 232 $kg \cdot m^{-3}$ (Tangjuank, 2011). Kokosrieksta šķiedras atzītas par piemērotām siltumizolējošo materiālu veidošanai, sasniedzot vērtību 0,05 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Dikmen & Elias Ozkan, 2016).

Saskaņā ar Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas (FAO, 2023) datiem rīsi ar audzēšanas apjomu vairāk nekā 740 milj. tonnu gadā ir trešā visvairāk saražotā pārtikas prece pēc cukurniedrēm un kukurūzas, līdz ar to radot arī ievērojamu atlikumu daudzumu. No rīsu sēnalām veidotu paneļu siltumvadītspēja sasniedz 0,0464–0,0566 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pie blīvuma 154 $kg \cdot m^{-3}$ (Yarbrough et al., 2005).

Piemērotība siltumizolācijas materiālu veidošanai izvērtēta arī mūsu platuma grādos kultivēto saulespuķu biomasai pēc eļļas atdalīšanas. Saulespuķu atlikumi smalcināti un veidots mazblīvs beramais materiāls ar tilpumblīvumu 18–25 $kg \cdot m^{-3}$, kura siltumvadītspēja variē robežās 0,037–0,039 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Šajā pašā pētījumā izvērtēts berammateriāls no kukurūzas atlikumiem (0,048–0,059 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), rīsu sēnalām (0,054 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), kviešu salmiem (0,044 – 0,047 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) un kaņepju sēklu čaulām (0,054 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) (Vandenbossche et al., 2012).

Salmi ir labības audzēšanas blakusprodukts, kas pieejams lielos daudzumos un par zemām izmaksām daudzās valstīs, arī Latvijā. Salmi ir bijuši viens no pirmajiem materiāliem, kas izmantots ēku siltināšanā. Nesmalcinātu salmu ķīpu materiālam ar blīvumu 60 $kg \cdot m^{-3}$ siltumvadītspēja ir 0,067 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Goodhew & Griffiths, 2005).

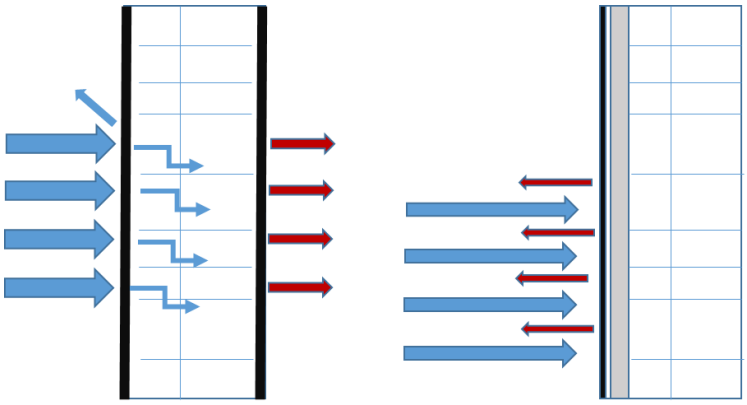
Vienlaikus ar siltumizolēšanas funkciju, dabīgiem šķiedru materiāliem bieži piemīt arī akustiskai izolācijai raksturīgās īpašības.

1.3.6. Dabisko šķiedru materiālu akustiskās īpašības

Troksnis ir viens no būtiskiem vides apdraudējumiem fiziskajai un garīgajai veselībai un labklājībai Eiropas reģionā. Konstatēts, ka satiksmes troksnis pilsētās būtiski pasliktina miega kvalitāti un veselību, ietekmē uzvedību, psiholoģiskos un fizioloģiskos procesus cilvēka organismā (Guo et al., 2023). Pasaules Veselības organizācijas (PVO) trokšņa vadlīnijas nosaka trokšņa līmeņa robežas, kuras pārsniedzot, tiek būtiski ietekmēta veselība, kā arī iesaka darbības, lai samazinātu trokšņa iedarbību. Par paaugstinātu trokšņu līmeni uzskata trokšņa līmeni virs 65 dB (World Health Organization, 2018).

Pieļaujamos trokšņa līmeņus telpās un akustisko komfortu ēkās regulē vairāki normatīvi. Ēku starpsienu konstrukciju akustiskās īpašības un skaņas izolācijas spēju nosaka: (i) gaisa skaņas izolācijas rādītājs; (ii) trieciena skaņas izolācijas rādītājs; (iii) reverberācijas laiks (ROCKWOOL, 2023). Latvijas būvnormatīvs LBN 016-15 "Būvakustika" (LR Ministru Kabinets, 2015) nosaka Latvijas nacionālo standartu sarakstu, kurus jāievēro attiecībā uz publisku un dzīvojamo būvju akustiskās izolācijas prasībām. Lai novērtētu ēkas un tās atsevišķo elementu izolācijas īpašības, izmanto faktisko normalizēto skaņas gaisā izolācijas indeksu R'w (dB) un faktisko normalizēto triecientrokšņa līmeņa indeksu L'n,w (dB). Būvakustiskie pasākumi ietver prettrokšņa pasākumus un akustiskās kvalitātes paaugstināšanas pasākumus. Prettrokšņa pasākumi ietver apbūves akustiku, tehnisko iekārtu (inženieriekārtu) radīto trokšņu samazināšanu un skaņas izolāciju. Ēku konstrukcijas projektē un izbūvē tā, lai ēku iekštelpās un tām blakus esošajās teritorijās nodrošinātu trokšņa līmeņus atbilstoši normatīvo aktu prasībām par trokšņa pieļaujamām robežvērtībām. Izmanto būvkonstrukcijas un izstrādājumus, kuru skaņas izolācijas īpašības nodrošina normatīvajos aktos noteikto prasību izpildi. LBN 016-15 nosaka skaņas izolācijas prasības ēku iekšējām norobežojošajām konstrukcijām, piemēram, daudzdzīvokļu dzīvojamās ēkās Starp dzīvokļu dzīvojamām telpām, starp dzīvojamām telpām un koplietošanas telpām R'w 55 dB un L'n,w 52 dB, Starp telpām viena dzīvokļa ietvaros R'w 46 dB (LR Ministru kabinets, 2015a).

Pētniecībā un praksē tiek lietotas divas skaņas izolācijas novērtēšanas metodes: (i) pilnās pretestības caurules 4 mikrofonu metode (lēta un precīza) un (ii) divu telpu metode (dārga, darbietilpīga un precīza).



1.12. att. **Skaņas izolācija un skaņas absorbcija**

Pēc frekvenču diapazona skaņu iedala zemās frekvencēs 100–500Hz, vidējās 500–2000Hz un augstās frekvencēs 2000–6300Hz (Seddeq & Aly, 2012). Cilvēka ausis var noteikt skaņu robežās no 20Hz līdz 20000Hz, (Noviks, 2002), infraskaņa (cilvēks nedzird) ir zem 20Hz, ultraskaņa (cilvēks nedzird) ir virs 20000Hz. Cilvēkiem ar dzirdes traucējumiem ir grūtības noteikt skaņu augstākajā frekvenču diapazonā. Cilvēka runa ir robežās no 100–1000Hz.

Izšķir trīs galvenos trokšņus veidus. Pirmais ir gaisa trokšņi, kas no skaņas avota izplatās pa gaisu, piemēram, cilvēku runāšana vai mūzikas skaņas viļņi. Otrais ir trieciena trokšņi, kas izplatās pa ēkas konstrukciju (piemēram, soļu troksnis augšējā stāvā, dzīvojamā mājā pa caurulēm tekoša ūdens troksnis). Trešais trokšņu veids ir struktūrtroksnis, mehāniskās svārstības, tās izplatās ēkas konstrukcijās un skaņa rodas gaisā. Visiem materiāliem piemīt gan skaņu izolējošas, gan apsorbējošas īpašības (1.12. attēls), bet materiāla struktūra un uzbūve nosaka, kāda īpašība ir noteicošā.

Akustisko īpašību novērtēšanai Amerikas Savienotās Valstīs (ASV) un citur pasaulē izmanto skaņas pārraides klašu STC (*sound transmission class,* latv. – Trokšņu caurlaidības klase)

klasifikāciju. STC ir vesels skaitlis, kas norāda, cik labi ēkas konstrukcijas elements vājina skaņu gaisā. STC aprēķina, izmantojot pārraides zudumu vērtības, kas pārbaudītas 16 frekvencēs diapazonā no 125 Hz līdz 4000 Hz, tomēr tas nesniedz pilnīgu informāciju, jo zem norādītās frekvences robežas ir citi būtiski trokšņu avoti, piemēram, mājas kinozāles skaņa, satiksmes troksnis no lidmašīnu, kravas automašīnu un smagās tehnikas darbības, ģitāra, bass, bungas, rūpnieciskās iekārtas, īpaši sūkņu sistēmas. Starptautiskais būvniecības kods IBC (*The International Building Code,* latv. – Starptautiskais būvniecības kods) pieprasa laboratorijā pārbaudītu STC 50 sienām, grīdām un griestiem jaunām konstrukcijām (Soundproofing Company INC, 2023).

Lignocelulozes bāzes siltumizolācijas materiāli izgatavoti no dabiskām šķiedrām, kas plātņveida materiālos savietotas (savērptas, savītas, sapresētas vai kā citādi sasaistītas) noteikta biezuma slānī, bet var tikt izmantotas arī kā beramais izolācijas materiāls. Dabiskās šķiedras, izmantotas kā pasīvais skaņas absorbētājs, ir efektīvas vidējas un augstas frekvences skaņas viļņu absorbēšanā, bet vāji absorbē zemas frekvences skaņas viļņus (Lekshmi et al., 2023). Šķiedru akustiskās īpašības būtiski ietekmē daļiņu vai šķiedru izmēri, porainība, neregulārā forma un struktūra. Šis īpašību kopums padara šķiedru materiālu akustiskās īpašības grūti modelējamas (Berardi & Iannace, 2015).

Skaņas viļņu frekvenču diapazons, ko šķiedru izolācijas materiāli var absorbēt, parasti ir no 500 Hz līdz 4000 Hz, kas ietver lielāko daļu cilvēka balss diapazona. Šķiedru materiālu akustiskās izolācijas īpašības nosaka materiāla blīvums un struktūra. Tā kā dabiskie šķiedru materiāli ir poraini, tas ļauj skaņas viļņiem iekļūt materiālā. Šķiedras absorbē daļu skaņas enerģijas ar berzes pretestības palīdzību, jo skaņas viļņi izraisa šķiedru vibrāciju. Lai izvērtētu materiāla akustikās īpašības, pētījumos mēra skaņas enerģijas samazināšanos pēc izolācijas slāņa. Aprēķina skaņas absorbcijas koeficientu, kura nulles vērtība nozīmē, ka materiāls neabsorbē skaņu, bet vērtība "viens" nozīmē, ka visa skaņas enerģija ir absorbēta.

Kokosšķiedras un rīsu sēnalu paneļi ar blīvumu 200 $kg \cdot m^{-3}$ efektīvi absorbē gan zemas, gan augstas frekvences skaņas viļņus akustisko frekvenču diapazonā 100–5000 Hz ar trokšņa samazināšanas koeficientu virs 0,4 (Lekshmi et al., 2023). No dateļpalmu augļu šķiedrām veidots materiāls ar blīvumu 100 $kg \cdot m^{-3}$ sasniedza absorbcijas koeficientu 0,6–0,8 pie 20– 30 mm biezuma un absorbcijas koeficientu 0,9 pie 40 mm biezuma (Taban et al., 2019). Kaņepju šķiedru materiāls ar blīvumu 88 $kg \cdot m^{-3}$ un biezumu 40 mm sasniedza skaņas absorbcijas koeficientu 0,9 (Santoni et al., 2019), bet citā pētījumā 30 mm biezs materiāls sasniedza koeficientu 0,8 (Berardi & Iannace, 2015). Neapstrādātu kaņepju spaļu beramā izolācija ar blīvumu 100–150 $kg \cdot m^{-3}$ sasniedza skaņas absorbcijas koeficientu 0,5–1 skaņas frekvences diapazonā 200–2000 Hz (Glé et al., 2012).

Izprotot šķiedru izolācijas materiālu akustiskās īpašības, palielinās iespēja izvēlēties atbilstošāko materiālu un uzstādīšanas metodi, lai sasniegtu optimālu akustisko veiktspēju. Blīvums, biezums, materiāla izvēle un uzstādīšana ir faktori, kas var ietekmēt šķiedru izolācijas materiālu akustiskās īpašības.

1.3.7. Dabisko škiedru materiālu ugunsreakcijas īpašības

Uguns ir ķīmiska reakcija, kam nepieciešams skābeklis, degviela, un siltums; bez vienas no šīm sastāvdaļām uguns nevar pastāvēt. Šo kopumu sauc par uguns trijstūra teoriju, kas ir vienkāršs veids, kā izprast, kas ir uguns veidošanās sastāvdaļas (Walls & Zweig, 2017).

Mūsdienās ir būtiski domāt par cilvēku un sabiedrības drošību ēku būvēšanas un ekspluatācijas procesā, tāpēc par vienu no būvniecības pamatprasībām tiek izvirzīta būvniecības materiālu reakcija uz uguni, kas noteikta Latvijas Valsts Būvniecības likuma 9. pantā (LR Saeima, 2017). Būvei, atbilstīgi tās lietošanas veidam, izvirzītas šādas projektēšanas, būvniecības un ekpluatācijas prasības:

1. mehāniskā stiprība un stabilitāte;
2. **ugunsdrošība;**
3. vides aizsardzība un higiēna, tai skaitā nekaitīgums;
4. lietošanas drošība un vides pieejamība;
5. **akustika (aizsardzība pret trokšņiem);**
6. **energoefektivitāte;**
7. ilgtspējīga dabas resursu izmantošana.

Balstoties uz Latvijas būvnormatīvu LBN 201-15 Būvju ugunsdrošība, katru būvizstrādājumu novērtē atbilstoši ugunsreakcijas klasēm, kas ir saskaņā ar ES EUROCLASS sistēmu. Sākotnēji EUROCLASS standartu izveides pamats bija 1988. gada Būvizstrādājumu direktīva, kas visā Eiropā stājās spēkā 1993. gada sākumā. Šī direktīva noteica, ka vienā dalībvalstī pārdotos un testētos produktus var laist tirgū jebkurā citā dalībvalstī, kas padarītu harmonizētu pieeju visiem materiāliem (Law et al., 2023) un atvieglotu dzīvi visiem lietotājiem. EUROCLASS ugunsreakcijas klases (LR Ministru kabinets, 2015b):

- A1 – būvizstrādājums nereaģē uz uguns iedarbību, šīs klases būvizstrādājumi neveicina ugunsgrēka attīstību vispārējas uzliesmošanas gadījumā;
- A2 – būvizstrādājums, kas pakļauts uguns iedarbībai, nelielā daudzumā izdala dūmus, vispārējas uzliesmošanas gadījumā nerada uguns slodzi un neveicina ugunsgrēka attīstību;
- B – būvizstrādājums nerada vispārējas uzliesmošanas situācijas, bet tas var uzturēt degšanu attīstīta ugunsgrēka gadījumā;
- C – būvizstrādājums var radīt vispārējas uzliesmošanas situāciju, bet ne ugunsgrēka attīstības sākumā;
- D – būvizstrādājums uguns iedarbības dēļ var radīt vispārējas uzliesmošanas situāciju un aktīvi iesaistās degšanas procesā, kad tiek pakļauts uguns iedarbībai;
- E – būvizstrādājums degšanas laikā jau pirmajās divās minūtēs var radīt vispārējas uzliesmošanas situāciju;
- F – būvizstrādājuma ugunsizturības robeža un ugunsreakcijas klase nav noteikta, un tas var strauji degt un ātri radīt vispārēju uzliesmošanu.

Lai noteiktu ugunsreakcijas klasi pēc EUROCLASS sistēmas, testēšanu veic saskaņā ar Latvijas Valsts standartu LVS (Latvijas Valsts standarts) EN 13501-1:2022 (Eiropas standartizācijas komiteja, 2022), nosakot būvelementu konstrukciju ugunsizturības klasifikāciju.

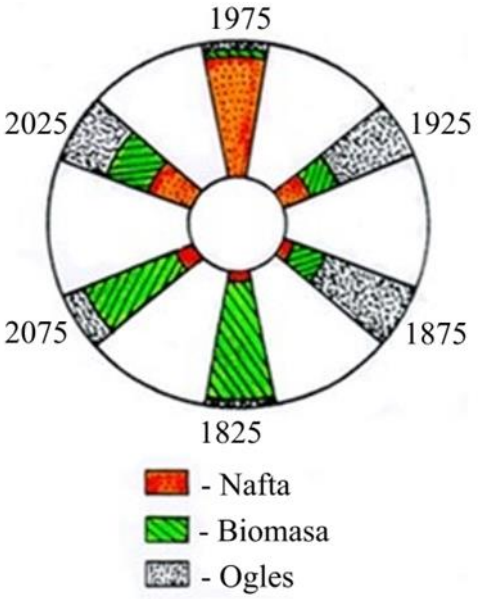
Dabiskie šķiedru materiāli bez papildu apstrādes ar antipirēniem tiek bez testēšanas klasificēti kā viegli uzliesmojoši materiāli ar degtspējas klasi E ugunsreakcijas klasifikācijā.

1.4. Biorafinēšana

Eiropas un Latvijas klimatneitralitātes sasniegšanas stratēģijas dokumenti satur norādes uz siltumizolācijas materiālu vēlamo veidu, nosakot, ka ēku atjaunošana un pārbūve jāveic, izmantojot ilgtspējīgus materiālus un efektīvas tehnoloģijas un metodes. Tas nepārprotami norāda uz dabīgu, no biomasas iegūtu materiālu prioritizēšanu. Savukārt Latvijas stratēģija klimatneitralitātes sasniegšanai līdz 2050. gadam (LR Ministru kabinets, 2020a) paredz jau konkrētu bioekonomikas mērķu izpildi, kas iekļauj vietējo lauksaimniecības augu atlikumu izmantošanas veicināšanu, efektīvi izmantojot vietējos resursus un fokusējoties uz jaunradītiem produktiem ar augstu pievienoto vērtību. Šāda pieeja samazina atkritumu daudzumu un rada ilgtspējīgākus produktus, kas ir aprites ekonomikas (LR Ministru kabinets, 2020) stratēģijas

galvenais uzdevums. Augu biomasas kaskādes veida izmantošanas principu, kas paredz viena procesa atlikumu izmantot kā tam sekojošu procesu izejvielas, sauc par biorafinēšanu.

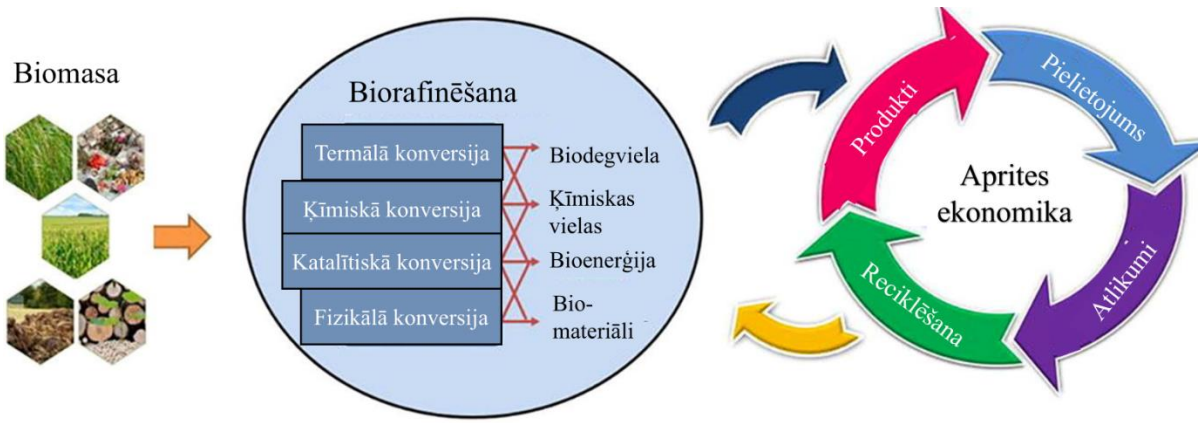
Biorafinēšana pēc būtības ir process, kurā tiek veikts viens otram sekojošs pēc iespējas dabai un cilvēkam nekaitīgāku tehnoloģiju un procesu kopums, lai maksimāli palielinātu biomasas kā izejvielas pievienoto vērtību, no tās saražoto produktu apjomu un samazinātu vai pat izslēgtu atkritumu veidošanos. Saskaņā ar Apvienoto Nāciju Vides programmas (UNEP, 2023) definīciju tīrās tehnoloģijas ir „nepārtraukta, integrētas, preventīvas vides stratēģijas īstenošana, attiecināta uz procesiem, produktiem un pakalpojumiem, ar mērķi paaugstināt eko-efektivitāti un samazināt piesārņojuma risku, kuram varētu tikt pakļauti kā cilvēki un vide". Biorafinēšana iekļauj visus šos nosacījumus un samazina vides piesārņošanu (Maleviti, 2011). Biomasa ir organiskas izcelsmes resurss, savukārt tās pamatkomponenti ir lielmolekulāri polimēri – celuloze, lignīns, hemicelulozes. Lielākā daļa biorafinēšanas tehnoloģiju līdz šim balstījās uz cukuru izmantošanu no pārtikā lietojamām lauksaimniecības kultūrām, bet šī pieeja zaudē savu aktualitāti, jo pārtikas resurss ir nozīmīgs un nevar būt izmantojams citu produktu iegūšanai humānu apsvērumu dēļ. Šī iemesla dēļ biorafinēšanā kā izejvielu pārsvarā izmanto koksni un lauksaimniecības augu pārpalikumus. Kopš 1970. gada Eiropā biomasas izmantošanas apjoms rūpniecībā ir pastāvīgi audzis, un prognozes liecina arī par turpmāku tā pieaugumu (1.13. attēls).



1.13. att. **Globālās tendences izejvielu izmantošana rūpniecībā** (Vedernikovs et al., 2010)

Tiek lēsts, ka no biomasas iegūtais enerģijas apjoms 2050. gadā būs 100–300·10^{18} J gadā, kas veidos 25–30% no visas saražotās enerģijas (Sertolli et al., 2022). Biomasas izmantošanu sekmē arī ES un nacionālie rīcības plāni, piemēram, atbilstoši Eiropas zaļā kursa ceļvedim izstrādātais Eiropas aprites ekonomikas rīcības plāns (Komisija, 2020) un Ministru kabineta rīkojums Nr. 489 Par Latvijas Rīcības plānu pārejai uz aprites ekonomiku 2020.–2027. gadam (LR Ministru kabinets, 2020). Šie plāni nosaka, ka Eiropa un tostarp Latvija veic darbības, kas veicina pāreju uz aprites ekonomiku, sniedz pienesumu Eiropas zaļā kursa īstenošanā un globālo ilgtspējīgas attīstības mērķu sasniegšanā. Regulējumi nosaka vairāku būtisku sfēru virzību uz: (i) resursu produktivitātes uzlabošanu, veicinot pētniecības un inovācijas attīstību; (ii) samazinātu atkritumu daudzumu; (iii) nepiesārņojošās rūpniecības attīstīšanu. Aprites ekonomikas stratēģija paredz arī labāko pieejamo tehnoloģiju izmantošanu, inovatīvu un ilgtspējīgu materiālu radīšanu, gudrāku izejmateriālu izmantošanu, kā arī lokālo izejmateriālu izmantošanu. Biorafinēšana var ietvert dažādu nozaru tehnoloģiskos posmus, visbiežāk – ķīmijas, biotehnoloģijas vai inženierzinātnes. Biorafinēšanas pieeju var skatīt kā integrētu aprites ekonomikas sastāvdaļu (1.14. attēls). Bioekonomika pēc būtības ir saimniecisko darbību

kopums, kurā dažādas tehnoloģijas pārvērš biomasu materiālos, degvielā un ķīmiskās vielās. Tās mērķis ir zema oglekļa satura tehnoloģijas, resursu ziņā efektīvi un sociāli iekļaujoši procesi (Velvizhi et al., 2022).



1.14. att. **Biorafinēšanas loma aprites ekonomikā un savstarpējās saistības shēma** (Velvizhi et al., 2022)

Bioekonomikai ir nozīmīga loma ilgtspējīgā attīstībā, savukārt biomasas resursu izmantošanai ir būtiska nozīme bioekonomikas vērtību ķēdē, jo tā ir ilgtspējīgāka un potenciāli videi draudzīgāka nekā fosilās izejvielas. Bioekonomika koncentrējas uz jaunām izaugsmes iespējām biomasas izmantošanā, un pieprasījums pēc tām pieaug visā pasaulē, it sevišķi ņemot vērā daudzskaitlīgās globālās un nacionālās stratēģijas par pāreju uz zemu emisiju ekonomiku, jo, piemēram, bioenerģijas ražošana no biomasas samazina siltumnīcefekta gāzu emisiju apjomu (Velvizhi et al., 2022).

Būtiska nozīme bioekonomikā un biorafinēšanā ir oglekļa aprites ciklam. Pēc būtības tas ir noslēgts cikls, jo ražošanas vai citu procesu emitētā CO_2 tiek piesaistīta biomasā. Biomasas tehnoloģiskā izmantošana jeb pārstrāde arī ģenerē CO_2, bet tā nepalielina kopējo siltumnīcas gāzu izmešu daudzumu, jo atgriežas jaunsintezētajā biomasā fotosintēzes procesā. Biomasas un arī jebkuras citas izejvielas izmantošanas tehnoloģiskās attīstības mērķis ir Nulles emisijas (*Zero emission*) tehnoloģija. Biorafinēšanas principa tehnoloģijas ir piemērots rīks šī mērķa sasniegšanai, jo tiecas uz biomasas izejvielas bezatlikuma izmantošanu.

No biomasas var ražot gan nišas produktus nelielā apjomā un ar maksimāli augstu pievienoto vērtību, piemēram, farmācijai un medicīnai, gan lielā apjomā, bet ar ne pārāk augstu pievienoto vērtību, piemēram, degvielu. Augstas pievienotās vērtības produkti rada lielākus ienākumus, bet liela apjoma izstrādājumi samazina nacionālās enerģētikas atkarību, kas ir būtiski ES, it īpaši Latvijai.

Biorafinēšanas procesus mēdz klasificēt atbilstīgi izmantoto tehnoloģiju veidam, apstrādāto izejvielu skaitam un saražoto produktu skaitam (1.2. tabula).

1.2. tabula

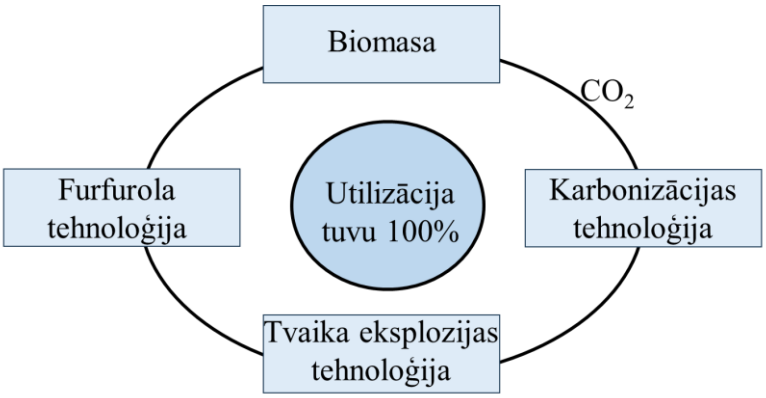
Biorafinēšanas procesu klasificēšana (Calvo-Flores & Martin-Martinez, 2022)

Pēc izmantoto procesu/tehnoloģiju veida	
Veids	**Apraksts**
Mehānisks	Piem., presēšana, frakcionēšana, izmēru samazināšana
Ķīmisks	Piem., hidrolīze ar skābi, oksidēšana, esterificēšana
Termoķīmisks	Piem., hidrotermiskā apstrāde, pirolīze, gazifikācija
Bioķīmisks	Piem., fermentācija

Pēc fāžu tipa/skaita			
Biorafinēšanas veids	**Izejviela**	**Process**	**Produkts**
I fāzes	Viena	Viena veida	viens
II fāzes	Viena	Vairāku veidu	vairāki
III fāzes	Vairākas	Vairāku veidu	vairāki

III fāzes biorafinēšanas procesu iedalījums	
1	Vienas graudaugu kultūras pilnīga pārstrāde (piemēram, kvieši vai kukurūza)
2	Zaļās biorafinēšanas process (dabiski mitra biomasa, piemēram, zāle vai labība)
3	Lignocelulozes biomasas biorafinēšanas process
4	Divu platformu biorafinēšanas process (iekļauj gan termo-ķīmiskas, gan bioķīmiskas konversijas)

Kā praktisks biorafinēšanas procesa piemērs 1.15. attēlā redzama shēma, kas ataino LVKĶI izstrādātu tehnoloģiju kopumu un paredz pilnībā integrējamu biomasas pārstrādes modeli (Brazdausks et al., 2015).



1.15. att. **Biomasas pārstrādes biorafinēšanas procesa piemērs ar TS hidrolīzi LVKĶI** (Brazdausks et al., 2015)

No biomasas tiek iegūts furfurols, atlikumam tiek veikta TS hidrolīzes apstrāde un pēc tam gala atlikumiem pielietota karbonizācijas tehnoloģija. Šāds modelis iekļauj vairākus apstrādes veidus, ir efektīvs praktiski pilnīgai biomasas pārstrādei produktos un draudzīgs videi.

Lai gan biorafinēšanai ir būtiski plusi un teorētiska iespēja panākt gandrīz 100% efektivitāti kompleksai biomasas pārstrādei, joprojām nav iespējams pārstrādāt visu atkritumu vērtīgos produktos bez atlikumiem. Tomēr šādi atkritumi ir būtisks enerģijas avots termoķīmiskajai konversijai (Ragauskas et al., 2006) (Ragauskas et al., 2014) vai enerģijas ieguvei.

Viena no tehnoloģijām, kas realizē biorafinēšanas koncepciju un minēta praktiskajā piemērā, ir TS autohidrolīze – tā iekļauj termisku un spiediena apstrādi, kas izraisa gan

biomasas mehānisku struktūras izmaiņu, gan sastāvā esošu vielu atbrīvošanos un konversiju mazmolekulāros savienojumos, kas savukārt papildina procesu ar termoķīmisku iedarbību uz izejmateriālu.

1.5. TS hidrolīze

TS, ko sauc arī par tvaika krekingu, ātro (flash) hidrolīzi un TS autohidrolīzi, ir izejmateriāla fizikāli ķīmiska apstrāde ar piesātinātu augsttemperatūras tvaiku (T = 180–240 °C, P = 1–4 MPa), no dažām sekundēm līdz dažiem desmitiem minūšu ilga.

1.5.1. Vēsture

Metode izgudrota ASV, un tās autors ir Meisons (William H. Mason), kurš zināms arī kā elektriskās spuldzītes izgudrotāja Tomasa Edisona protežē (*Masonite Company History Timeline*, 2023). Metodes patents pieteikts 1924. gadā Laureā, Misisipi, ASV (Mason, 1926; Mason & Laurel, 1926). TS metodes autors sākotnēji centās atrast koksnes atlieku pielietojumu, kas būtu lietderīgāks par vienkāršu sadedzināšanu. Meisons skaidas apstrādāja augstā TS, pēc tam sapresēja un rezultātā ieguva augsta blīvuma plātnes ar labiem stiprības rādītājiem. Metodi nosauca par "Masonite" un 1929. gadā atvērta rūpnīca un patentētas tehnoloģiskas nianses. Plātnes, kas veidotas no TS apstrādātiem izejmateriāliem, varēja lietot kā izolācijas plātnes, akustiskās plātnes vai plātnes būvniecībai ar komercnosaukumi Quartrboard, Isorel, Hernit, Karlit, Torex , Treetex (Angļu. Val.) (Masonite Corporation, 1931, 1935). Līdz 1930.–1940. gadam šīs plātnes bija ļoti populāras. Savukārt 1932. gadā pētnieks Babkoks atrada risinājumu, kā ar TS metodi iespējams veikt pirmapstrādi un iegūt fermentējamus cukurus no priedes koksnes šķeldām, lai tālākā pārstādes procesā iegūtu etanolu (Babcock, 1932).

Mūsdienās novērojams būtisks intereses pieaugums par atjaunojamiem dabas produktiem – fotosintēzes produktiem. Lignocelulozes biomasas pārstrāde cukuros paredz tās sadalīšanu sastāvdaļās, tostarp – delignifikāciju, kas var būt sarežģīta, jo lignīns ir trīsdimensionāls polimērs. TS metode ir viens no daudzsološākajiem paņēmieniem atvieglotai delignifikācijas nodrošināšanai. Pēc Meisona atklājuma 20. gs. 30. gados no jauna šī metode piesaistīja zinātnieku interesi 70. gados. Tas saistīts ar ASV biotehnoloģiskajām pētniecības programmām, kurā kā galvenā apstrādes izejviela izmantota augu biomasa. Šī programma radīja vairāk nekā 20 pētnieciskās grupas, un visas izstrādātās tehnoloģiskās shēmas iekļāva TS metodi (Gravitis, 1987). TS apstrāde lietota, galvenokārt, lai pilnībā un bez atlikumiem izmantotu biomasu, piemēram, bioetanola ražošanā no koksnes šķiedrām kā priekšapstrādes blakusprodukti iegūta dzīvnieku barība un dažādas ķīmiskās vielas. TS metodes priekšrocības ir ātrums, zema ietekme uz vidi, zemi kapitālieguldījumi, procesā netiek izmantotas kaitīgas ķīmiskas vielas un tā ir īstenojama rūpnieciskā mērogā (Silveira et al., 2015; Yu et al., 2022).

20. gadsimta 90. gados TS metode papildināta, iekļaujot piesātināta tvaika izmantošanu. Kanādas kompānija "Stake Technology Company" to sāka pielietot nepārtrauktas darbības režīmā ar pastāvīgu tvaika padevi, ražoja papīrmasas šķiedras, un patentēja metodi, kurā kā izejmateriālu izmantoja ķīmiski apstrādātas šķiedras. Patentētās metodes autori ražošanas pilotiekārtas uzbūvēja Sherbrook universitātē Itālijā (Lam, 2011).

1.5.2. Process

Lai veiktu TS apstrādi, biomasu (koksni, lauksaimniecības atlikumus vai citu lignocelulozi saturošu biomasu) ievieto reaktorā un pakļauj tvaika un temperatūras ietekmei.

TS prādziena procesā tvaika iedarbības rezultātā biomasā notiek vieglāk šķīstošo biomasas komponentu hemiceluložu un pektīnu daļēja vai pilnīga destrukcija un/vai deacetilēšanās. No hemiceluložu destrukcijas produktiem un atšķeltajām funkcionālajām grupām veidojas etiķskābe un uronskābes, bet monosaharīdu sadalīšanas rezultātā rodas skudrskābe un levulīnskābes, kas *in situ* katalizē hemiceluložu hidrolīzi (Jönsson & Martín, 2016; Silveira et al., 2015). Skābes darbojas arī kā autokatalizators celulozes hidrolīzē, kā arī lignīna, galvenokārt ß – O – 4, saišu, destrukcijā (Auxenfans et al., 2017; Liitiä et al., 2014). Kombinētās spiediena, temperatūras un autohidrolīzes ietekmē notiek šūnu sieniņu daļēja destrukcija, tiek izjauktas ķīmiskās saites. Visvairāk tiek ietekmēts termiski nestabilākais komponents – hemicelulozes, savukārt lignīns tiek mīkstināts, bet celuloze kļūst elastīga (Cantarella et al., 2004). TS apstrādes ietekmē biomasā var veidoties arī hidrolīzes un/vai fermentācijas inhibitori, piemēram, aromātiski savienojumi fenola atvasinājumi un hemiceluložu cukuru dehidratācijas blakusprodukti. Fenolskābes veidojas, šķeļoties aril-ēteru un esteru saitēm polisaharīdos un lignīnā (Silveira et al., 2015).

Ja TS priekšapstrādes mērķis ir tieši polisaharīdu hidrolīze, tad kā katalizatorus mēdz izmantot atšķaidītas skābes, visbiežāk sērskābi vai fosforskābi. Tas uzlabo procesa selektivitāti un var samazināt TS procesam nepieciešamo laiku un temperatūru (Silveira et al., 2015).

Pēc paredzētā apstrādes laika reaktors tiek atvērts, notiek adiabātisks process – spiediens samazinās līdz atmosfēras spiedienam, un reaktora masa tiek ”izšauta” uztvērējā. Notiek dekompresija jeb ekstrēma spiediena samazināšanās īsā laika posmā, izraisot mehānisku biomasas sašķiedrošanos un sašķelšanos. Vienlaikus līdz ar temperatūras strauju samazināšanos, tiek pārtrauktas reaktorā notiekošās reakcijas. No TS apstrādes laika ir atkarīgs, vai apstrādājamais materiāls apstrādes rezultātā iegūs tikai plaisas vai pilnībā sašķiedrosies, sablīvināsies vai uzirdināsies (Stelte, 2013; Van De Riet, 2019).

TS ir termoķīmisks process, kuru ietekmē vairāki mainīgi faktori, tomēr vislielākā ietekme ir apstrādes laikam un temperatūrai, kuri darbojas pēc superpozīcijas principa. Kombinējot dažādus apstrādes laikus un temperatūras, var iegūt vienu un to pašu TS apstrādes dziļumu, ko var raksturot ar tā dēvēto barguma faktoru (*severity factor*) R_o (Chen, 2015; Overend et al., 1987; Silveira et al., 2015). Atkarībā no izvēlētā barguma faktora, TS laikā mainās apstrādājamā materiāla fizikālās īpašības – krāsa, ūdens absorbcijas spēja, virsmas raupjums, blīvums, kā arī bioķīmiskās īpašības un bioloģiskā noturība. Laika ietekme ir lineāra, bet temperatūras ietekme ir eksponencionāla (1.6. formula). Formula satur materiāla apstrādes laika un apstrādes temperatūras parametrus, šī logoritmiskā izteiksme tiek uzskatīta par TS hidrolīzes procesa funkcijas vērtību. Skaitliskā vērtība 14,75 empīrisks ir parametrs, kas saistīts ar temperatūru un aktivācijas enerģiju (Silveira et al., 2015).

$$R_0 = t \cdot exp\left[\frac{T - 100}{14{,}75}\right] \tag{1.6}$$

Kur R_0 – barguma faktors;
t – apstrādes laiks, min;
T – apstrādes temperatūra, °C.

Modelējot difūzijas procesus materiāla iekšienē, formula papildināta ar materiāla daļiņu izmēru un procesa laika koeficientu, jo daļiņu izmērs nosaka tvaika difūzijas ātrumu jeb iespiešanos apstrādājamā materiāla daļā (Hosseini & Shah, 2009). Šobrīd TS procesa kontroli un analīzi raksturojošās formulas neiekļauj sevī vēl tādus būtiskus faktorus kā materiāla mitrums, reaktora aizpildījums, reaktora proporcijas, garums, platums. Šie visi parametri ne tikai palīdz plānot TS procesu un iedarbību uz materiālu sašķiedrošanas pakāpi un apstrādes dziļumu, bet tie tiek ņemti arī vērā, modelējot un ražojot iekārtas. TS procesu īsteno pārtrauktas un nepārtrauktas darbības reaktoros, pēdējie ir efektīvāki, tomēr pētījumi rāda, ka nepieciešama to turpmāka attīstīšana un procesu norises uzlabošana (Van De Riet, 2019).

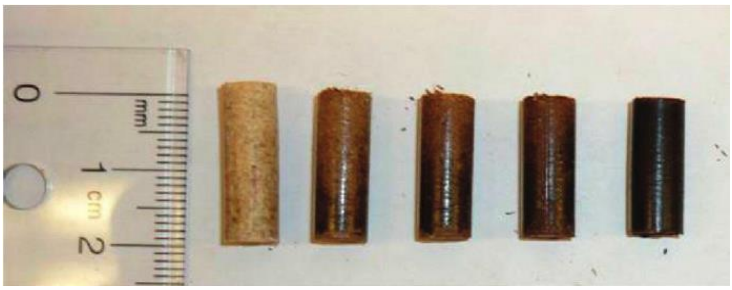
1.5.3. Pielietojums

Salīdzinājumā ar citām biomasas apstrādes vai priekšapstrādes metodēm TS ir vairākas priekšrocības, tostarp:

a) netiek izmantotas ķimikālijas procesa norisei, tikai ūdens;
b) apstrādātā masa nesatur sēru;
c) salīdzinot ar skābes hidrolīzes procesiem, iekārtu kalpošanas laiks ir ilgāks, jo korozijas iespējas mazas (Stelte, 2013).

TS apstrādi izmanto kā efektīvu biomasas priekšapstrādes metodi, jo pēc apstrādes var viegli atdalīt to komponentes tālākai apstrādei, iegūstot gan ķīmiskās vielas (Gravitis et al. 2004;), gan lopbarību (Niemi et al., 2017), gan būvniecības materiālus (Andzs, Skrupskis, 2011; Grāvītis et al. 2013; Tupciauskas et al. 2009). TS apstrāde bieži tiek izmantota kā priekšapstrādes posms biomasas enzimātiskai hidrolīzei – tiek būtiski paaugstināts iegūto cukuru iznākums (Silveira et al., 2015; Steinbach et al., 2020).

TS metode ir arī pielietota blīvinātu granulu ražošanai (1.16. attēls). Šo produktu dēvē arī par melnajām vai torificētajām granulām, 2003. gadā kontruēta pilotiekārta šo granulu ražošanai ar komercnosaukumu Arbaflame, Grasmo pilsētā Norvēģijā (Thek & Obernberger, 2010).



1.16. att. **Dažādos TS režīmos apstrādātas biomasas granulas** (Stelte, 2013)

Vairāku gadu desmitu pieredze TS tehnoloģiju attīstīšanā ir LVKĶI. Ir izstrādātas tehnoloģijas šķiedru iegūšana no baltalkšņa (Tupciauskas et al., 2010), plātņu līmēšanā, neizmantojot saistvielas vai kā saistvielu izmantojot TS lignīnu (Grāvītis et al., 2013), biomasas TS priekšapstrādē furfurola ražošanai (Brazdausks et al., 2015), blīvinātās ogles ražošanai, biomasas priekšapstrāde un mikro un nanošķiedru izdalīšanai iestrādei elektrovērptos materiālos (Putniņa et al., 2013), izolācijas materiālu ražošanai (Tupciauskas et al., 2023a) un citur.

TS apstrāde ir piemērots veids, kā no biomasas iegūt beramo siltumizolācijas materiālu. TS apstrāde sekmēja beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanu no kukurūzas un miskantiem, konstatēta TS parametru ietekme uz beramblīvumu un siltumvadītspēju. Iegūtie materiāli bija ar beramblīvumu no 79 līdz 150 $kg \cdot m^{-3}$ un siltumvadītspēju no 0,042 līdz 0,052 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Schnabel et al., 2019). Citā pētījumā secināts, ka, izmantojot TS, var kontrolēti regulēt kviešu salmu procesā iegūstamo šķiedru un daļiņu izmērus – augstāka apstrādes temperatūra un ilgāks laiks radīja viendabīgāku šķiedrveida materiālu (Han et al., 2010). LVKĶI veiktā pētījumā šāds materiāls iegūts no kviešu salmiem, niedrēm un kukurūzas kātiem (Tupciauskas et al., 2023a). Apstrādes laikā tiek ietekmēta izejmateriāla struktūra, notiek materiāla "uzpūkošana" jeb beramblīvuma/tilpumblīvuma palielināšana, kas ir viens no beramā siltumizolācijas materiāla raksturojošiem rādītājiem.

Literatūrā netika atrasta informācija par pētījumiem, kad TS tehnoloģija būtu lietota, lai no industriālās kaņepes spaļiem iegūtu beramo siltumizolācijas materiālu. Kaņepju spaļi ir neliela izmēra un tie satur īsas celulozes šķiedras, tāpēc nav sašķiedrojami vai "uzpūkojami" ar klasiskām mehāniskās apstrādes metodēm, kuru iedarbības rezultātā tie tiek saberzti, bet

neiegūst vajadzīgo tilpumblīvumu. Ir nepieciešams izpētīt TS tehnoloģijas pielietojuma iespējas kaņepju spaļu pārveidei beramā siltumizolācijas materiālā.

1.6. Industriālo kaņepju resursi

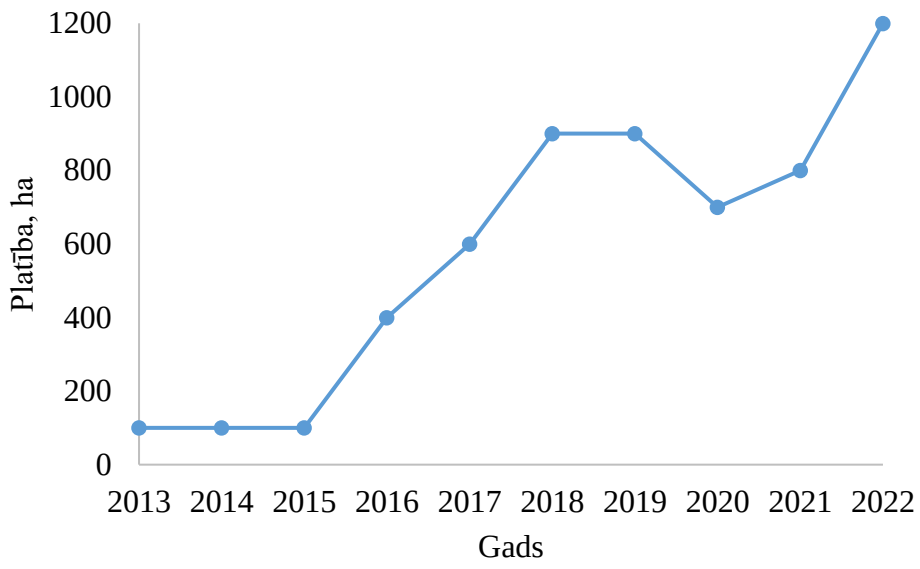
Industriālās jeb sējas kaņepes (*Cannabis sativa* L.) ir viena no vecākajām lauksaimniecības kultūrām, ko pazīst cilvēce, tās audzēšanas un kultivēšanas vēsture aizsākās vairāk nekā pirms 6000 gadiem (Yang, 1991). Jau no 15. gadsimta Eiropā kaņepes bija svarīgs šķiedru resurss tekstilizstrādājumu un virvju ražošanā, kas attīstījās līdz komerciāliem produktiem 18. un 19. gadsimtā (Amaducci et al., 2015). Saistībā ar lētāku sintētisko polimēru šķiedru plašo pieejamību un izplatību, kā arī ar kaņepēm saistīto sociālo stigmu potenciāli psihoaktīvo vielu klātbūtnes dēļ, sākot ar 20. gadsimtu kaņepju audzēšana pakāpeniski saruka (Pal & Lucia, 2019). Pēdējo desmitgažu laikā, pateicoties šķirņu izplatībai, kas satur nelielu daudzumu psihotropās vielas Δ-9 tetrahidrokanabinola (THC), mūsdienu cilvēks ir kaņepju renesanses liecinieki. Sējas kaņepju šķirņu biomasā THC līmenis ir zems, parasti mazāk nekā 1% (Johnson, 2014). Pašreizējais tiesiskais regulējums ES nosaka maksimālo pieļaujamo THC līmeni 3,0 $mg \cdot kg^{-1}$ kaņepju sēklās un 7,5 $mg \cdot kg^{-1}$ kaņepju sēklu eļļā (Eiropas Komisija, 2023c). Savukārt Latvijā 2019. gada 3. jūlijā stājās spēkā grozījumi likumā "Par narkotisko un psihotropo vielu un zāļu likumīgās aprites kārtību" (LR Saeima, 1996), kas rūpniecības un dārzkopības mērķiem atļauj audzēt sējas kaņepes (Cannabis sativa subsp. sativa), kas atbilstīgi sertificētas un iekļautas ES lauksaimniecības kultūraugu šķirņu kopējā katalogā.

1.6.1. Kaņepes pasaulē

Saskaņā ar EK tīmekļa vietnē publicēto informāciju kaņepju audzēšanas apjomi no 2015. gada līdz 2019. gadam pieauguši par 62,4% (Hemp Benchmarks, 2023). Augšupejošā trajektorija apstājās 2020. gadā, jo Covid-19 pandēmija negatīvi ietekmēja globālo ekonomiku un piegādes ķēdes. 2022. gada Krievijas iebrukums Ukrainā nozarei sagādāja būtisku triecienu, jo strauji pieauga graudaugu cenas, tomēr šis faktors ir sekmējis lauksaimnieku lēmumus par labu kaņepju audzēšanai. Pozitīvu impulsu nozarei devusi kopīgā vienošanās par pieļaujamo THC līmeni un atbalsta maksājumiem kaņepju audzētājiem.

1.6.2. Kaņepes Latvijā

Kaņepju audzēšanas nozare Latvijā ir samērā jauna, tomēr pēdējos gados vērojama nozares attīstība. Zemkopības Ministrijas 2022. gadā publicētā informācija liecina par pirmapstrādes rūpnīcas trūkumu (LR Zemkopības Ministrija, 2023), tomēr konstatētas atsevišķu uzņēmēju aktivitātes pārstrādes jomas sakārtošanā. No 2016. gada vērojams pakāpenisks kaņepju sējas platību pieaugums, bet ar nelielu kritumu 2020. gadā (1.17. attēls). Platību palielinājumu skaidro ar arvien jaunu uzņēmēju un investoru iesaistīšanos kaņepju audzēšanā. Lielākoties tiek attīstīta kaņepju riekstiņu (sēklu) un kātu pārstrāde, un prognozē, ka audzēšanas apjomi arvien palielināsies. Sagaidāms, ka kaņepju audzēšanu sekmēs arī lauksaimnieku tiesības pretendēt uz vienoto platību maksājumu, mazo lauksaimnieku atbalsta shēmas maksājumu un brīvprātīgu saistīto atbalstu par proteīnaugiem, par sējas kaņepju platību, ja tā saskaņā ar regulas Nr. 809/2014 45. pantu ir iekļauta kaņepju tetrahidrokanabinola (turpmāk – THC) monitoringā un to THC saturs nepārsniedz 0,2% (LR Ministru kabinets, 2023).



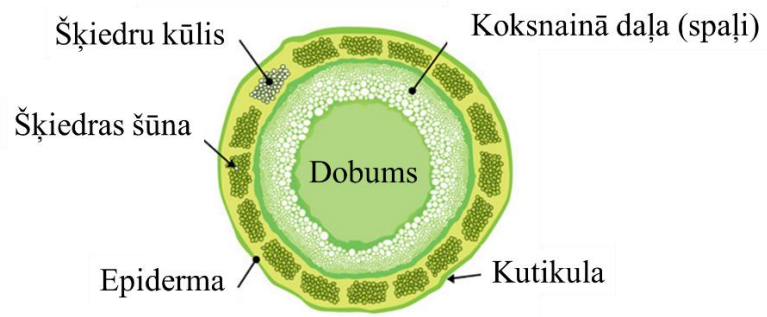
1.17. att. **Kaņepju sējumu platība Latvijā** (Oficiālās Statistikas Portāls, 2023)

2018. gadā dibināta biedrība (Latvian Hemp Union, 2023), kura apvieno sējas kaņepju audzētājus un produktu ražotājus. Biedrībai ir vairāki ar sējas jeb industriālo kaņepju kultivēšanu, audzēšanu un pārstrādi Latvijā saistīti mērķi, no kuriem viens vēsta par kaņepju industrijas atkritumu pārstrādi dabai draudzīgos materiālos. Uzsvērts, ka kaņepe ir "viena no Latvijas atslēgām uz pārtikušu, ilgtspējīgu un cirkulāru (aprites) bioekonomikas nozari". Saskaņā ar Latvijas Lauku konsultāciju centrs (LLKC) datiem, pieaug kaņepju audzētāju skaits un apsaimniekotās platības (Kļimovska, 2023). Latvijas uzņēmumā *SIA Industrial Hemp Latvia* radīta inovatīva iekārta kaņepju kātu pārstrādei šķiedrā un spaļos (HurdMAster, 2023), kas ļauj pārstrādāt izaudzētās kaņepes un ražot produktus tepat Latvijā.

Iepriekšminētās informācijas analīze ļauj ekspertiem saredzēt kaņepju audzēšanas nozarei labu potenciālu (Šķietniece, 2023), kā arī prognozēt sējas kaņepju platību palielināšanos un dažādu produktu ražošanas apjomu pieaugumu Latvijā.

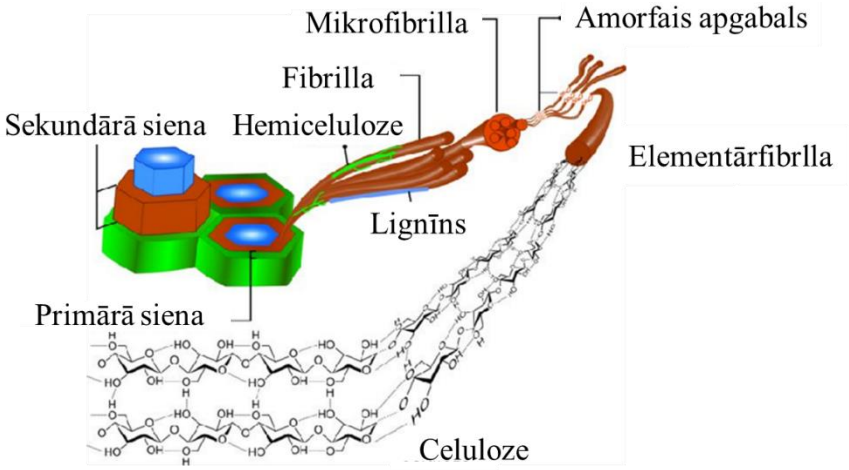
1.6.3. Kaņepju audzēšana un kaņepju stiebra uzbūve

Kaņepju augu priekšrocība ir noturība pret dabiskajiem kaitēkļiem (mikroorganismiem un insektiem) tajā esošo bioloģiski aktīvo vielu dēļ. Augsnes ziņā neizvēlīga, nav nepieciešams mēslojums un augu aizsardzības līdzekļi. Kaņepes ir ātraudzīgas un 100 dienās var sasniegt 2– 3 metru augstumu. Pie pietiekami blīva sējuma (~50 kg·ha^{-1}) nomāc nezāles, turklāt kaņepes var audzēt vienā vietā līdz 10 gadiem, saglabājot ražas apjomus un biomasas kvalitāti (Freivalde & Ulme, 2009). Kaņepju stiebru ražība sasniedz 7–12 tonnas ha^{-1} (Būmane, 2009).



1.18. att. **Kaņepju stiebra šķērsgriezuma vizualizācija** (LiveTextiles, 2019)

Kaņepju auga stiebra siena sastāv no vairākiem slāņiem, kuri savukārt sastāv no dažādām elementārām struktūrām (1.18. attēls). Kaņepju šķiedras veido šķiedru kūlīšus, kas stiebros sakārtoti vairākos slāņos. Šķiedras ilgu laiku uzskatītas par nozīmīgākajiem augiem kaņepju kultivēšanā, apstrādē un izmantošanā, īpaši attiecībā uz pielietojumu tekstilrūpniecībā (Zommere et al., 2013). Stiebra centrālo koksnaino daļu veido īsas šķiedras, ko kopā satur lignīns. Koksnainie audi pilda kaņepju auga atbalsta funkciju. Kaņepju stiebru mehāniskās apstrādes laikā koksnainā daļa tiek salauzta, veidojoties spaļiem. Kaņepju auga centru veido doba serde, kas izvietota visā stumbra garumā, izņemot tā savienojuma vietās.

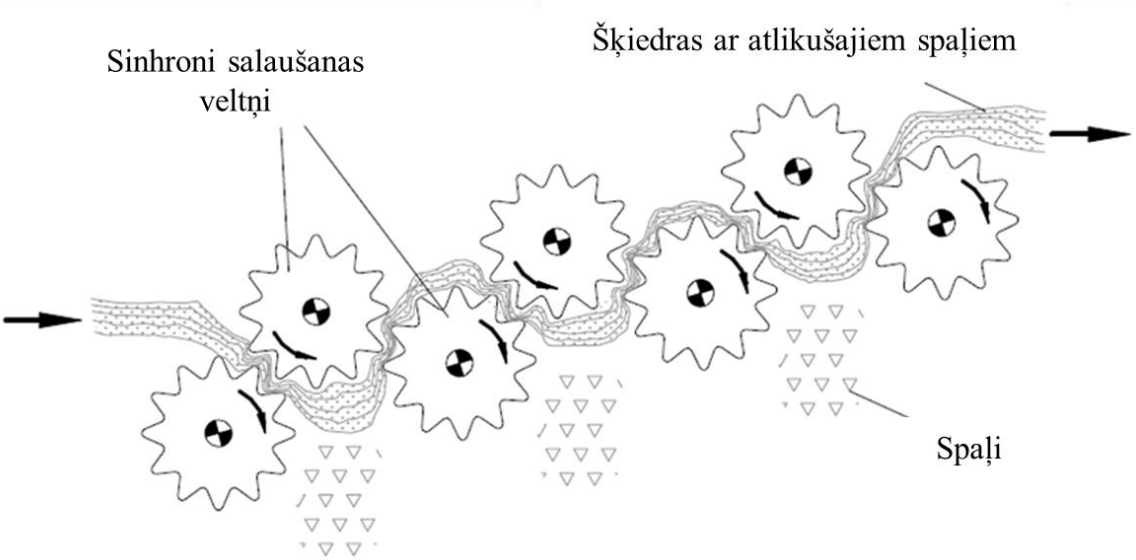


1.19. att. **Kaņepju auga šūnas sieniņas celulozes uzbūves struktūras shematisks attēlojums** (Cader Mhd Haniffa et al., 2016)

Lielākā daļa kaņepju auga audu struktūras sastāv no dabisko polimēru – celulozes, lignīna, hemiceluložu – kombinācijas. Strukturālais komponentu izkārtojums redzams 1.19. attēlā. Struktūru nodrošina celulozes molekulas, kuras elementārfibrillas apkopotas mikrofibrillās, kas tālāk veido fibrillas un nodrošina šūnas sieniņas mehānisko struktūru. Lignīns un hemicelulozes ar fizikāli ķīmisku saišu palīdzību iesaistās šūnas sieniņas struktūrā.

1.6.4. Kaņepju pārstrādes process

Lai atdalītu kaņepju kātu šķiedraino un spaļu daļu, jāveic daudzpakāpju apstrādes process. Pirmais no apstrādes posmiem paredz mērcēšanu, lai atvieglotu lūksnes šķiedru atdalīšanu, tomēr mērcēšanas posma nepieciešamība atkarīga no tālākās pārstrādes un iegūstamā produkta. Parasti mērcēšanas process norit ūdens tvertnēs noteiktā temperatūra vai dabiskos apstākļos turpat uz lauka, rasā (Zommere et al., 2013). Pēc izžāvēšanas tiek veikta mehāniskā apstrāde (dekortifikācija), kuras rezultātā stiebri tiek salauzti un spaļi atdalīti no šķiedru kūļiem (1.20. attēls). Spaļi veido ~ 60 – 75% apjoma no kopējās sausa stiebra masas, un tie tiek uzskatīti par lauksaimniecības auga mazvērtīgo atlikumu (Zommere et al., 2013).



1.20. att **Kaņepju stiebru mehāniskās pārstrādes process**

1.6.5. Kaņepju spaļu ķīmiskais sastāvs

Kaņepju spaļi tāpat kā kaņepju šķiedras sastāv no celulozes, lignīna, hemicelulozēm, proteīniem, šķīstošiem savienojumiem jeb ekstraktvielām un minerālvielām.

Kaņepju spaļu ķīmiskais sastāvs variē atkarībā no kaņepju šķirnes, augšanas vietas un apstākļiem, kā arī atkarībā no izmantotās sastāva noteikšanas analītiskās metodes. Pētījumi rāda, ka celulozes saturs var svārstīties intervālā 44%–52%, hemiceluložu 6%–27% intervālā, lignīna 8%–28% intervālā, šķīstošo sastāvdaļu 1%–29% intervālā, minerālvielas (noteiktas kā pelnu saturs) 0,6%–9% intervālā, proteīnu saturs svārstās ~3% (Diakité et al., 2021).

Tā kā Latvijā kaņepju biomasas izmantošanas izpēte ir aktuāla, ir pētīts valstī audzēto kaņepju sastāvs. Piemēram, "Bialobrzeskie" (Polija, kods 893) šķirnes kaņepju spaļu ķīmiskais sastāvs (1.3. tabula) (Brazdausks et al., 2015) liecina, ka tas var būt vērtīgs resurss celulozes, hemiceluložu vai lignīna produktu ieguvei. Brazdausks un kolēģi izmantojuši katalizatorus, lai TS no kaņepju spaļiem atdalītu furfurolu un etiķskābi, bet no atlikuma veidotu bezsaistvielu plātnes citā pētījumā (Brazdausks et al., 2017) kaņepju spaļi izvērtēti kā potenciāls monosaharīdu ieguves resurss, jo tajos noteikts vērā ņemams daudzums ksilozes, arabinozes, mannozes, glikozes, galaktozes un ramnozes.

1.3. tabula

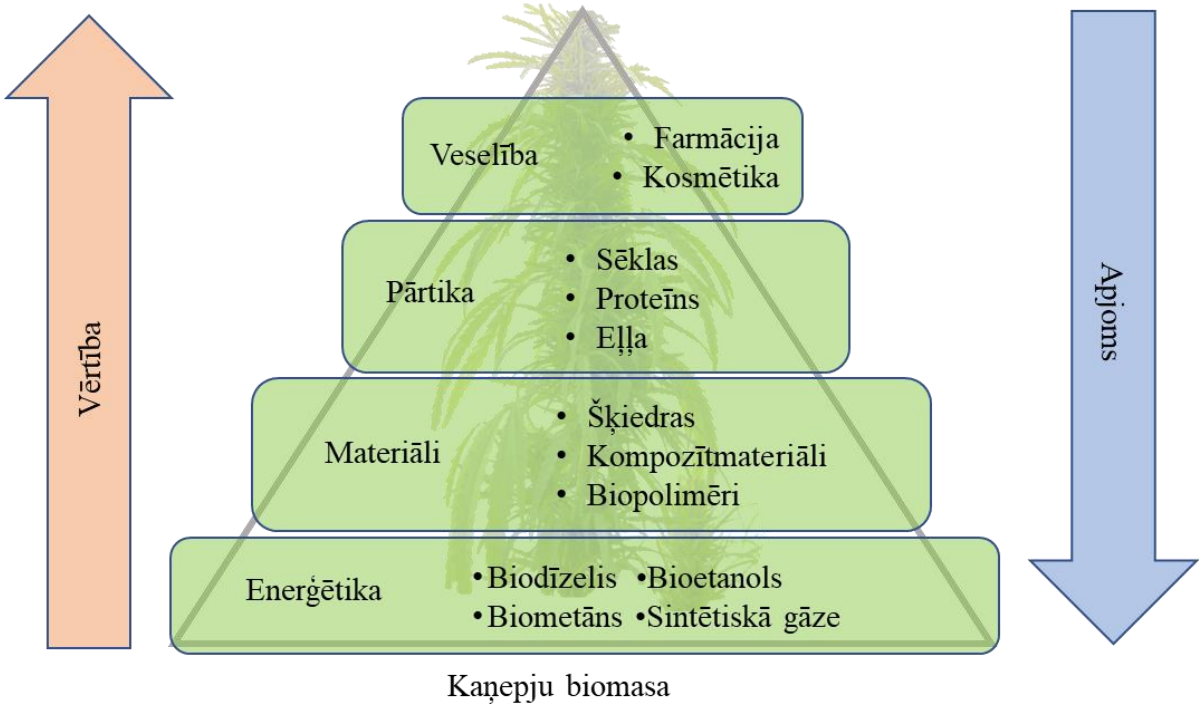
Latvijā audzētu kaņepju spaļu ķīmiskais sastāvs (Brazdausks et al., 2015)

Ķīmiskais komponents	**Daudzums, %**	**Elementu analīze**	**Daudzums, %**
Celuloze	43,7 ± 0,4		
Holoceluloze	75,5 ± 0,8	Slāpeklis	0,6 ± 0,03
Hemicelulozes	31,8 ± 0,7	Ogleklis	47,4 ± 0,08
Lignīns	22,0 ± 0,6	Ūdeņradis	5,3 ± 0,05
Minerālvielas (pelni)	1,6 ± 0,1	Sērs	0,2 ± 0,01
Pektīns	1,2 ± 0,1	Skābeklis	46,8 ± 0,15

1.6.6. Kaņepju pielietojums

Kaņepju kultivēšanas pieaugumu un ar kaņepēm saistītās pētniecības uzplaukumu stimulē vairāki faktori: (1) kaņepju agronomiskā noturība, kas ļauj tās kultivēt dažādos agroekoloģiskos apstākļos, kas bieži ir nelabvēlīgi citām tradicionālajām kultūrām; (2) resursefektīva dažādu atjaunojamu bioloģisko izejvielu ražošana, nekonkurējot ar barības un pārtikas piegādi; (3) piemērotība vairāku un dažādu produktu kaskādes tipa ražošanai pēc biorafinēšanas principiem – izmantojot biomasu kaskādes veidā (1.21. attēls), t.i., pakāpeniski sadalot biomasu dažādos komponentos (Struik et al., 2000).

Pētījumos secināts, ka kaņepes ir piemērotas lietošanai dažādās jomās – bioķīmijā, biokompozītos, būvniecībā, pārtikā, medicīnā, autorūpniecībā, papīrrūpniecībā, tekstilmateriālos, kosmetoloģijā, farmācijā, bioplastmasu rūpniecībā un citur, turklāt uzrāda augstu inovāciju potenciālu, piemēram, superkapacitatoru izstrādē, 3D-drukājamu materiālu izstrādē un daudzās citās nozarēs (Karche & Singh, 2019). Attiecībā uz kaņepēm mēdz lietot jēdzienu "cash crop" jeb naudu nesoša kultūra, norādot uz augstu izmantošanas un peļņas gūšanas potenciālu.



1.21. att. **Kaņepju biomasas izmantošanas iespējas dažādās nozarēs**
(Moscariello et al., 2021)

Vairāki pētījumi veikti, lai vērtētu kaņepju spaļu plātņu iegūšanas iespējas. Pētnieku grupa (Auriga et al., 2022) secinājusi, ka kaņepju spaļi var aizstāt koksnes daļiņas skaidu plātnēs. Iegūtas vieglākas, bet mazāk briestošas skaidu plātnes. Latvijā izpētīts (Brazdausks et al., 2015), ka kaņepju spaļi pēc TS piemēroti bezsaistvielu plātņu iegūšanai.

Latvijā veiktie pētījumi (Teirumnieka, 2023) apstiprinājuši, ka sējas kaņepju audzēšana gan sēklu, gan šķiedru un spaļu iegūšanai ir veiksmīgi īstenojama, dodot ieguldījumu biomasas resursa iegūšanā un vides slodzes mazināšanā. Kaņepju augu šķiedru un spaļu daļa ir mainīga, tāpēc ekonomiski izdevīgi izmantot visas tā daļas. LCA (Life cycle assesment, latv. – Dzīves cikla novērtējums) izvērtējums ir parādījis, ka kaņepju biomasas izmantošana enerģijas ieguvē, to sadedzinot, rada lielāku kaitējumu nekā citi enerģijas avoti, piemēram, koksne vai cita biomasa, tāpēc nav ieteicams šāds izmantošanas veids. Izmantojot specifisku daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodi, pierādīts, ka ekonomikas un enerģētikas krīžu laikā ideālais

risinājums ir kaņepju izmantošana siltumizolācijas materiālu veidošanā un energoefektivitātes palielināšanā. Līdz ar to pamatota ir arī sējas kaņepju audzēšanas intensificēšana Latvijā produktu ar augstu pievienoto vērtību iegūšanai, tādejādi līdz 2030. gadam ar kaņepju laukiem aizstājot rapšu laukus.

Pēdējos gados Latvijā un pasaulē popularitāti ieguvis kaņepju spaļu betons, kas ir hidratēta kaļķa un kaņepju spaļu maisījums ar ūdeni. Šo materiālu var izmantot ēkās gan kā pildvielu un siltumizolāciju, iestrādājot sienās un pārsegumos, gan izmantot grīdas izbūvē un termoizolēšanā (Hemp Eco Systems, 2023).

2014. gadā izstrādāts Latvijas patents par siltumizolācijas kompozītmateriāla iegūšanu no sapropeļa un sējas kaņepju spaļiem, kur sapropelis aizstāj kaļķus (Pleikšnis & Teirumnieka, 2014).

No resursu pieejamības viedokļa kaņepju audzēšanas apjoms ES ir ievērojami palielinājies (par 62,4% no 2015. līdz 2019. gadam) (Eiropas Komisija, 2023b). Salīdzinot ar koksni, viens hektārs kaņepju piesaista 9 līdz 15 tonnas CO_2, kas ir līdzīgi jaunam mežam, taču laika ziņā audzēšana aizņem tikai 5 mēnešus.

Lai gan kaņepes tiek plaši izmantotas, tomēr pēc sēklu novākšanas, kas tiek lietotas pārtikas rūpniecībā, kaņepju augu kāti veido atliekas, un tās joprojām netiek izmantotas apmierinošā apjomā, līdz ar to ir pieejamas lielā daudzumā jaunu, ilgtspējīgu materiālu izstrādei.

1.7. Nodaļas secinājumi

Apskatot un analizējot globālos un nacionālos klimata politikas stratēģijas dokumentus un regulējumus, secināts, ka Eiropas zaļā kursa un uz tā bāzes radītajos regulējumos un dokumentos, kuri attiecas uz enerģētikas jomu, galvenie mērķi izvirzīti attiecībā uz siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu un cilvēku dzīves kvalitātes uzlabošanu kopumā, bet viena no prioritātēm ir ēku energoefektivitāte un tās uzlabošana.

Vērojama un tuvākajā nākotnē plānota pieaugoša aktivitāte ēku energoefektivitāti uzlabojošajās aktvitātēs, respektīvi, ēku siltināšanā, jo vislielāko ieguldījumu ēkas energoefektivitātes uzlabošanā sniedz tieši ārējo konstrukciju siltumizolēšana. Sagaidāmās aktivitātes palielinās pieprasījumu pēc ilgtspējīgiem siltumizolācijas materiāliem, jo arī materiālu radīšanas joma pakļauta Zaļā kursa un Aprites ekonomikas regulējumiem, kas paredz inovatīvu un ilgtspējīgu materiālu radīšanu, izmantojot labākās pieejamās tehnoloģijas un lokālo biomasas izejmateriālu izmantošanu. Ņemot vērā borafinēšanas principus, atbalstāmākais izejvielu veids ir lokāli pieejamas biomasas izejmateriāli – atlikumi pēc izmantošanas citās nozarēs.

Secināts, ka notiek sējas jeb industriālo kaņepju kultūras lauksaimniecības nozares attīstība gan Latvijā, gan Eiropā. Eksperti Latvijā saredz kaņepju audzēšanas nozares potenciālu, prognozē sējas kaņepju platību palielināšanos un dažādu produktu ražošanas apjoma pieaugumu Latvijā, kas vienlaikus radīs arī lielāku mazvērtīgu spaļu apjoma pārpalikumu .

Zinātnisko publikāciju un citu avotu izpēte liecina, ka kaņepju spaļi pētīti un atzīti par pielietojamiem būvniecībā, piemēram, kaņepju spaļu betona sastāvā un plātņu izgatavošanā, tomēr netika atrasta informācija par pētījumiem, kad būtu lietota kāda priekšapstrādes tehnoloģija, lai no industriālo kaņepju spaļiem iegūtu beramo siltumizolācijas materiālu. Vienlaikus secināts, ka LVKĶI pieejama moderna tehnoloģija – TS hidrolīze. Ar TS hidrolīzes palīdzību no citu lauksaimniecības augu atlikumu biomasas ir izdevies iegūt šķiedrotus beramos siltumizolācijas materiālus.

Apvienojot klimata politikas mērķu radīto pieprasījumu pēc ilgstpējīgiem siltumizolācijas materiāliem un aprites ekonomikas nosacījumus izejmateriālam, kā arī zināšanu trūkumu par priekšapstrādātu kaņepju spaļu beramo siltumziolācijas materiālu, ir radīts politisks, zinātniski-

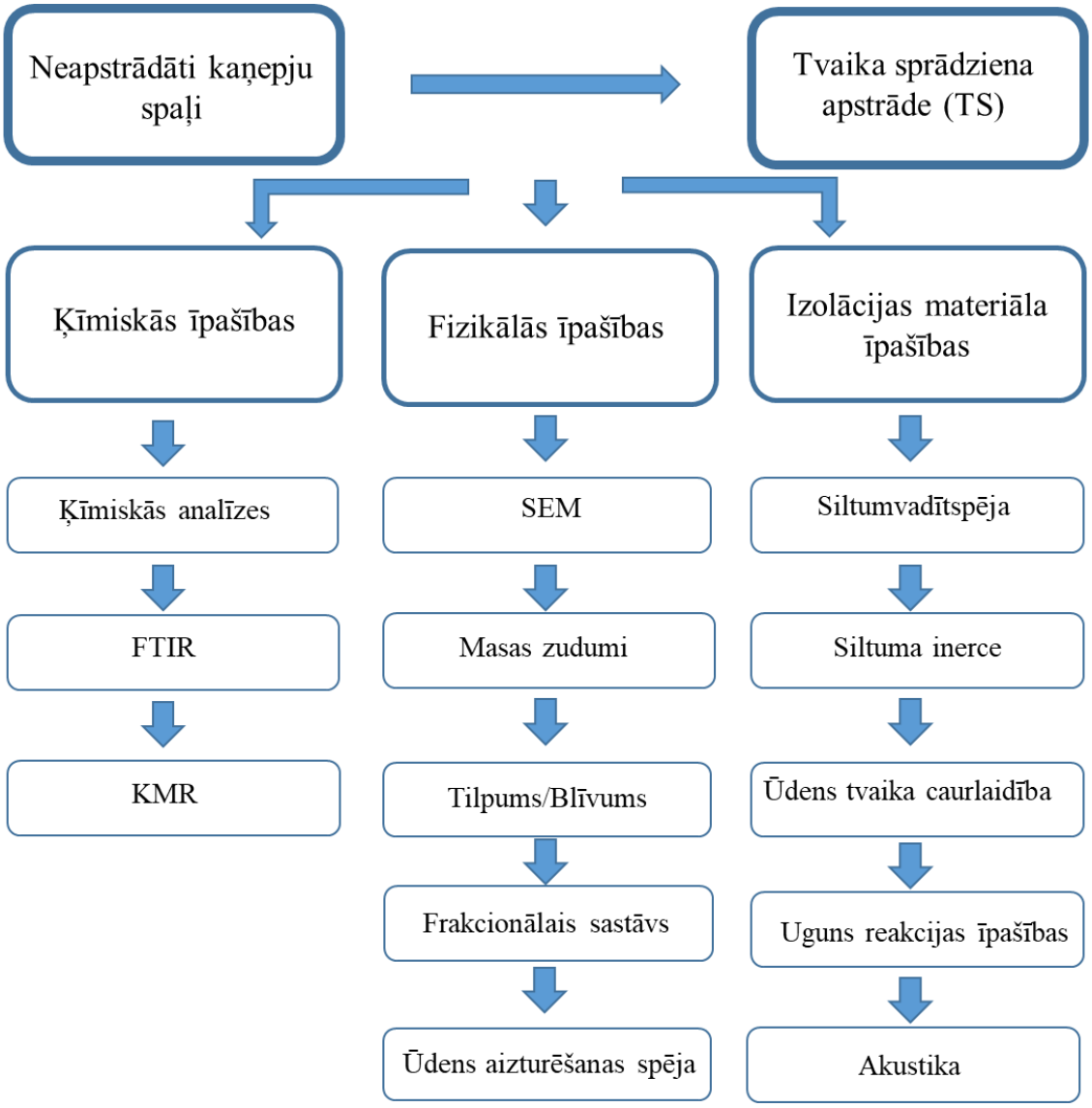
teorētisks un praktisks pamatojums promocijas darbā pieteiktajam tematam. Lai maksimāli lietderīgi izmantotu izejmateriālu un izveidotu materiālu, kas var konkurēt ar komerciāli pieejamajiem izolācijas materiālu produktiem, nepieciešams detalizēts un fundamentāls, bet vienlaikus augsti tehnoloģisks pētījums, kas iekļauj kaņepju spaļu TS priekšapstrādes metodikas izstrādi, iegūto šķiedrveida materiālu īpašību izpēti un beramā siltumizolācijas materiāla paraugu izvērtējumu.

2. MATERIĀLI UN METODES

Nodaļa satur informāciju par kaņepju spaļu iegūšanas vietu, augšanas apstākļiem, īpašībām, šķiedru iegūšanas metodi un to raksturojošām īpašībām. Aprakstītas metodikas struktūras un īpašību pētīšanai, šķiedru apstrādes rezultātā radušos izmaiņu novērtēšanas metodes, kā arī metodes materiālu pielietojuma izvērtēšanai.

2.1. Pētījuma metodoloģiskais pamats

Izvirzītais darba uzdevums atspoguļots shēmā (2.1. att.).



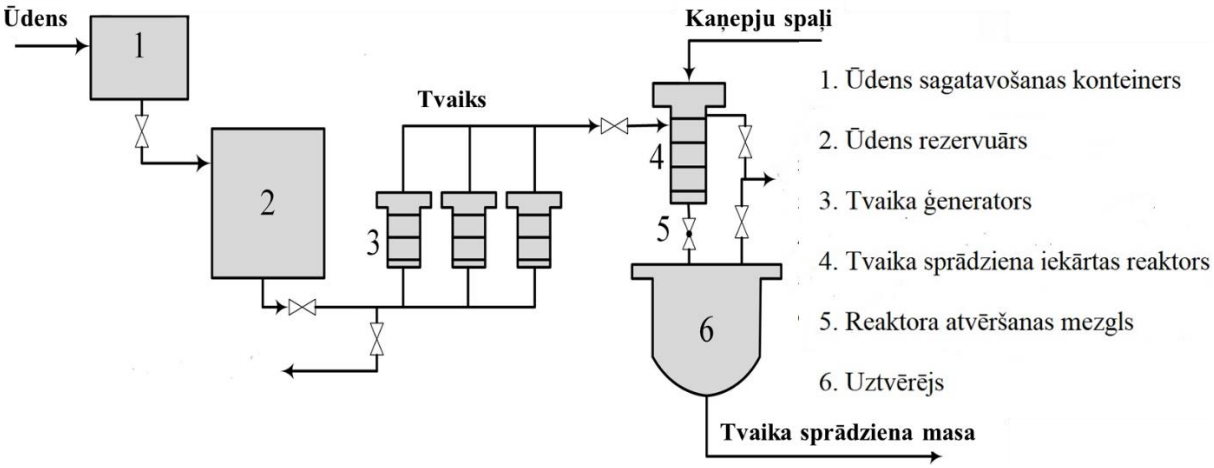
2.1. att. **Pētījuma darba uzdevumu shēma**

2.2 Materiāli un reaģenti

Darba izstrādāšanai izmantotais izejas materiāls ir kaņepju auga (*Cannabis sativa* L.) *Bialobrzeskie* (Polija, kods 893) šķirnes spaļi, kas rodas kā atlikums pēc kaņepju stublāju apstrādes un garo šķiedru ieguves. Šķirne ir pārbaudīta un labi aug Latvijā. Kaņepes ir viengadīgs augs, un no 1 ha apsētās platības iespējams iegūt 6–9 t stiebru. *Biolabrzeskie* šķirnes kaņepes ir šķiedru kaņepes, kuru garums var sasniegt 4,5 metrus. Pētījumā izmantotas "SIA ZALERS" Krāslavas novadā audzētas un 2012. un 2018. gadā ievāktas ražas kaņepes.

2.3. Izolācijas materiāla iegūšana ar TS metodi

Beramās šķiedru izolācijas materiāla iegūšanai no kaņepju spaļiem izmantota TS (tvaika krekings, ātrā (*flash*) hidrolīze) vai, pareizāk, TS autohidrolīze jeb apstrāde ar piesātinātu augsttemperatūras tvaiku. Metodes parametri ir T = 235 °C, P = 3,2 bar, laiks – 0–3 min., (0 – TS apstrāde veikta tūlīt pēc mērķa tvaika spiediena sasniegšanas; 0,5; 1; 2; 3 min – TS apstrāde veikta, attiecīgi, pēc 30, 60, 120, 180 sekunžu noturēšanas mērķa tvaika spiedienā) 2.2. att.



2.2. att. **TS iekārta**

TS iekārtā (2.2. attēls) izejas materiāls apstrādāts, ņemot vērā temperatūras un laika mijiedarbību: jo augstāka reakcijas temperatūra, jo īsāks apstrādes laiks. Dažādi kombinējot temperatūru un laiku koksnes apstrādes ar tvaiku procesā, var panākt vienu un to pašu apstrādes kvalitāti (Гравитис, 1987). Līdz ar to izvēlēts TS eksperimentus veikt pie konstantas temperatūras un spiediena, bet, mainot apstrādes laiku, izvēlēties optimālo apstrādes variantu. Temperatūras un laika atkarību interpretē (2.1) vienādojums (Overend et al., 1987), kura logaritmiskā izteiksme tiek uzskatīta par autohidrolīzes procesa ātruma nosacītās funkcijas vērtību (1.5 formula, 39. lpp.).

Gaisa sauso kaņepju spaļu mitrums (W%) noteikts, izmantojot ierīci Precisa XM120 (Dietikon, Šveice). Ierīce atbilst Eiropas standartu EN 60950, EN 50081-1 un EN 50082-1 prasībām, un tā ir piemērota dažādu materiālu mitruma noteikšanai ar vairākām metodēm. Iekārta aprīkota ar svariem un sildīšanas iespēju temperatūras robežās no 50 līdz 160 °C (temperatūras iestatīšanas iespējas – ik pēc 1 °C). Parauga svars var būt no 0,02 līdz 50 g. Mitruma noteikšanas dati tiek attēloti ciparu veidā vadības panelī.

TS iekārtā iepildīja 0,5 L kaņepju spaļu, iepriekš nosverot un nosakot parauga mitrumu un izsakot kā sausnes koeficientu:

$$K_{saus} = \frac{100 - W_{\%}}{100} \quad (2.1)$$

kur W% – parauga mitrums.

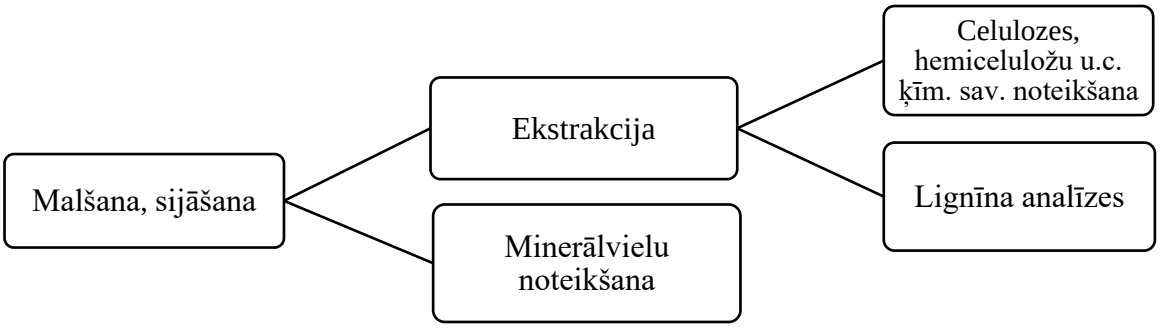
Paraugs apstrādāts ar TS metodi pie parametriem T = 235°; P = 32 bar., t = 0 līdz 180 s (0 līdz 3 min).

2.4. Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva noteikšana pirms un pēc TS

Kaņepju spaļos noteikts šādu ķīmisko komponenšu saturs:

- ekstraktvielas;
- celuloze;
- lignīns;
- minerālvielas (pelni).

Pirms ķīmisko īpašību noteikšanas kaņepju spaļus vispirms attīrīja no piemaisījumiem, sasmalcināja SM100 iekārtā (Retsch, Vācija) un sijāja ar Retsch ar 0,6 un 0,4 mm izmēra sietiem. 2.3. attēlā redzams kaņepju spaļu ķīmisko komponenšu noteikšanas shematisks attēlojums.



2.3. att. **Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva noteikšanas shematiskais attēlojums**

2.4.1. Minerālvielu satura noteikšana

Minerālvielu jeb pelnu saturu kaņepju spaļu paraugos noteica kā atlikumu pēc karsēšanas 575 ± 25°C augstā temperatūrā saskaņā ar TAPPI (*Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, latv. – Celulozes un papīra industrijas asociācija) 211om – 22 standarta prasībām (TAPPI, 2015).

Pelnu masas daļu procentos $w_{\%pelni}$ aprēķina pēc formulas 2.2.

$$w_{\%\text{pelni}} = \frac{m_2 - m_1}{m \cdot K_{saus}} x100\% \quad (2.2)$$

kur m_1 – izkarsēta tīģeļa masa, g;
m_2 – tīģeļa un pelnu masa, g;
m – gaisa sausu skaidu iesvara masa, g;
K_{saus} – koksnes sausnes koeficients.

2.4.2. Ekstraktvielu satura noteikšana

Ekstraktvielu saturs kaņepju spaļos pirms un pēc TS hidrolīzes noteikts pēc TAPPI T280 pm-99 standarta (TAPPI, 1991) , lietojot ekstrakciju ar acetonu (Sigma Aldrich, >99%). Ekstraktvielu masas daļu procentos $w_{\%ekstraktvielas}$ aprēķināja pēc vienādojuma 2.3.

$$w_{\%ekstraktvielas} = \frac{m_2 - m_1}{m \cdot K_{saus}} x100\% \quad (2.3)$$

kur m_1 – vārglāzes masa, g;
m_2 – vārglāzes un ekstraktvielu masa pēc žāvēšanas, g;
m – gaisa sausa parauga masa, g;
K_{saus} – kaņepju spaļu sausnes koeficients.

2.4.3. Lignīna satura noteikšana

Lignīna noteikšanai izmantoti ekstraģēti paraugi. Lignīna saturs noteikts pēc Klāsona (sērskābē nešķīstošā) lignīna noteikšanas metodes saskaņā ar TAPPI 222om-21 (TAPPI, 2006) standarta prasībām lignīna masas daļu procentos $w_{\%lignīns}$ aprēķina pēc formulas 2.4.

$$w_{\%lignins} = \frac{m_2 - m_1}{m \cdot K_{saus}} x100\% \quad (2.4)$$

kur m_1 – izžāvēta stikla filtra masa, g;
m_2 – filtra un lignīna masa pēc žāvēšanas, g;
m – gaisa sausu skaidu parauga masa, g;
K_{saus} – koksnes sausnes koeficients.

2.4.4. Celulozes un citu ķīmisko savienojumu satura noteikšana ar HPLC

Paraugu sagatavošana HPLC (*High performance liquid chromotography*, latv. - Augstas izšķirtspējas šķidruma hromatogrāfija) analīzei veikta saskaņā ar (A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz et al., 2008), izmantojot parauga hidrolīzi ar slāpekļskābi. Iegūto hidrolizātu HPLC analīze veikta, nosakot monosaharīdu, 2-furaldehīda, 5-hidroksimetilfurfurola (5-HMF) un organisko skābju saturu, izmantojot Shimadzu LC-20A HPLC (Shimadzu, Japāna) ar refrakcijas indeksa detektoru. Par atsauces standartiem izmantota glikoze, ksiloze, celobioze, arabinoze, galaktoze, mannoze, 2-furaldehīds, etiķskābe, 5-HMF, levulīnskābe un skudrskābe (Sigma Aldrich) ar tīrību ≥ 99,0%. Glikoze, celobioze, 2-furaldehīds, etiķskābe, 5-HMF, levulīnskābe un skudrskābe analizētas Shodex Sugar SH1821 kolonnā 60 °C temperatūrā ar eluentu 0,008 M sērskābi H_2SO_4 (Sigma Aldrich, Vācija) ar plūsmas ātrumu 0,6 $ml \cdot min^{-1}$. Ogļhidrāti noteikti Shodex Sugar SP0810 kolonnā 80 °C temperatūrā, izmantojot dejonizētu ūdeni kā kustīgo fāzi ar plūsmas ātrumu 0,6 ml min^{-1}. Nātrija hidrogenkarbonāts $NaHCO_3$ izmantots parauga neitralizēšanai līdz pH 5 līdz 7. Pirms injekcijas paraugi filtrēti caur 0,45 µm membrānfiltru.

2.4.5. Furjē transformācijas infrasarkanā spektrometrija FTIR

Paraugu FTIR spektri reģistrēti KBr (IR pakāpe, Sigma Aldrich) tabletēs ar Thermo Fisher Nicolet iS50 spektrometru (Waltham, ASV) diapazonā no 4000 līdz 450 cm^{-1} ar

spektrālo izšķirtspēju 4 cm^{-1} un skenēšanas reižu skaitu 32. Granula saturēja aptuveni 2 mg lodīšu dzirnavās (MM200, Retsch, Vācija) malta parauga un 198 mg KBr.

2.4.6. Kodolmagnētiskā rezonanse KMR

Pētījums veikts Spānijā, Seviļā, *Instituto de recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla*. Profesora un pētnieku vadībā *José C. del Río, Jorge Rencoret and Ana Gutiérrez* analizēti kaņepju spaļu paraugi. Šie paraugi sagatavoti, viegli saberžot 274,3 mg izoniazīda un 244,2 mg benzoskābes ahāta piestā. Mehanoķīmiskā aktivācija veikta, paraugu maļot M400 (Retsch, Vācija) lodīšu dzirnavās 5 min ar 20 Hz frekvenci. Paraugi uzreiz pēc pagatavošanas ievietoti cKMR parauga turētājā, lai izvairītos no mitruma un temperatūras izmaiņu ietekmes uz parauga sastāvu. 1H-13C šķērspolarizācijas (*cross polarisation*) cKMR spektri iegūti 25 °C temperatūrā, paraugu griežot ar 5 un 10 kHz ātrumu. Katram materiālam veikti 3 mērījumu cikli. Katrs uzņemtais cKMR spektrs raksturo parauga vidējo sastāvu tā mērīšanas laikā (6 stundas). cKMR mērījumi veikti ar AVANCE III 400 (Bruker, ASV) spektrometru, izmantojot 4 mm trīskāršās rezonanses zondi. Elektromagnētiskā lauka frekvence bija 400,23 MHz 1H mērījumos un ar 100,64 MHz 13C mērījumos. Šķērspolarizācijas 1H-13C cKMR spektri uzņemti, izmantojot RAMP šķērspolarizācijas pulsu secību. Parauga griešana "maģiskajā leņķī" (54,74°) veikta ar 5 vai 10 kHz 1H $\pi/2$; pulsa garums optimizēts uz 3,20 μs un 180,0 s. Kontaktlaiks šķērspolarizācijas laikā bija 2,0 ms. Uzņemšanas laikā izmantota SPINAL64249 pulsu shēma spinu atsaistei. 13C ķīmiskās nobīdes ierakstītas attiecībā pret tetrametilsilānu. Signālu intensitātes vērtības cKMR spektros noteiktas, izmantojot dekonvolūcijas metodi. Spektru dekonvolūcijā lietotas Gausa funkcijas, katru signālu cKMR spektrā aprakstot ar atsevišķu funkciju.

2.5. Kaņepju spaļu struktūras pētījumi

Lai pamatotu TS ietekmi uz siltumizolācijas materiāla īpašību izmaiņām, veikti kaņepju spaļu struktūras pētījumi.

2.5.1. Masas zudumi

Paraugu masas zudumi analizēti, nosakot parauga masu pirms un pēc TS apstrādes. Katra parauga sākotnējā masa 5L (~ 50g). Masas zudumi aprēķināti no 10 paralēliem mērījumiem, 10 reizes apstrādājot paraugu konkrētā TS režīmā.

Masas zudumi pēc TS noteikti pēc vienādojuma 2.5.

$$w_{\%zudumi} = \frac{m_{a.sass.1} - m_{a.sass2}}{m_{a.sass1}} x100\% \qquad (2.5)$$

kur $w_{\%zudumi}$ – masas zudumi;
$m_{a.sauss1}$ – kaņepju spaļu absolūti sausa masa pirms TS, kg;
$m_{a.sauss2}$ – kaņepju spaļu absolūti sausa masa pēc TS, kg;

Absolūti sausu parauga masu nosaka pēc vienādojuma 2.6.

$$m_{a.sauss} = m \cdot K_{sauss} \qquad (2.6)$$

m_{asauss} – absolūti sausa parauga masa, kg;

m – gaisa sausa parauga masa, kg;
K_{sauss} – sausnes koeficients.

2.5.2. Beramtilpums un beramblīvums

Kaņepju spaļu materiālam noteikts tilpuma blīvums saskaņā ar standartizētu metodi LVS EN 15103 (Eiropas standartizācijas komiteja, 2010b). Beramblīvuma noteikšanai izmantoja kalibrētu 5 L tilpuma cilindriskas formas metāla trauku. Metāla trauks maksimāli piepildīts ar kaņepju spaļiem un tad sablīvēts, brīvi metot trauku trīs reizes no 1,50 m augstuma uz koksnes plātnes. Tad atkal brīvi piepildīja trauku ar mērāmo materiālu, lai būtu pāri malām, un lieko daļu nolīdzināja ar koka stienīti. Trauks ar saturu nosvērts. Uzreiz noteikts mērāmā parauga mitrums pēc iepriekš aprakstītās metodikas. Beramblīvumu D, kilogramos kubikmetrā, nosaka pēc 2.2 formulas LVS EN 15103 (Eiropas standartizācijas komiteja, 2010b):

$$D = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \frac{(100 - M_{ar})}{100} \tag{2.7}$$

kur m_1 – tukšā trauka svars, kg;
m_2 – trauka, ar piepildīto materiālu, svars, kg;
V – trauka tilpums, m^3.
M_{ar} – noteiktais mitrums, rel. %.

Beramtilpums ir apgriezti proporcionāls lielums beramblīvumam, izteikts kā $m^3 \cdot kg^{-1}$.

2.5.3. Frakcionālais sastāvs

Beramā siltumizolācijas materiāla frakcionālo sastāvu pirms un pēc TS noteica, izmantojot dažādu izmēru (0,2; 0,4; 0,63; 0,8, 1 un 2 mm) sietu komplektu un AS 200 sijātāju (Retsch, Vācija). Mērījumi veikti, nosverot uz sieta palikušās frakcijas daļu un izsakot kā masas daļu %.

2.5.4. Skenējošā elektronu mikroskopija SEM

Kaņepju spaļu izejas paraugus un paraugus pēc pārstrādes ar TS lēni žāvēja līdz mitrumam 6%–8% normālos apstākļos gaisā un izsijāja caur sietu ar izmēru 0,8 cm. SEM mērījumiem izmantoti šķiedru paraugi, kas mazāki par 0,8 cm. Paraugu vizuālai novērošanai un interesējošo struktūras elementu izpētei izmantots SEM VEGA 5136M (Tascan, Čehija – Lielbritānija) iekārta. Pirms SEM attēlu uzņemšanas paraugus pārklāja ar plānu zelta kārtiņu, izmantojot Sputter coater Emitech K550X (Quorum Technologies, Lielbritānija).

2.5.5. Ūdens aizturēšanas spēja WRV

Spaļu materiāla ūdens noturība ir empīrisks mērījums, kas raksturo parauga spēju noturēt/aizturēt ūdeni. WRV noteica saskaņā ar (Skandināvijas standarts) SCAN-C62:00 standartu. 4 stundas ūdenī izmērcētu kaņepju spaļu paraugu ievietoja absolūti sausā stikla stobriņā ar stikla lodīti un stobriņu ievietoja centrifūgā. Centrifugēja 25 min pie 4500 apgr.$\cdot min^{-1}$ liela ātruma. Pēc centrifugēšanas stobriņus izņēma un nosvēra. Stobriņus ar tajā esošo paraugu

ievietoja žāvskapī pie 105 °C, līdz izžāvēja absolūti sausus. Pēc žāvēšanas stobriņus nosvēra un aprēķināja kaņepju spaļu ūdens noturība pēc 2.8. formulas.

$$WRV = \frac{m_1}{m_2} - 1 \tag{2.8}$$

kur, m_1 – centrifugēts paraugs, g;
m_2 – izžāvēts paraugs;
WRV – parauga ūdens noturība, $g \cdot g^{-1}$.

2.6. Kaņepju spaļu siltumizolācijas materiāla īpašību izpēte

Darbā analizētas būtiskākās iegūtā beramā siltumizolācijas materiāla īpašības un salīdzinātas ar tirgū lietotajiem materiāliem.

2.6.1. Siltumvadītspējas koeficienta noteikšana ar karstās plāksnes metodi

Siltumvadītspēja λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) un siltumietilpība C_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) noteikta iekārtā HFM 436 Lambda (NETZSCH, Vācija) saskaņā ar LVS ISO 8302:2001 (*International Organisation of Standardization,* latv. – Starptautiskā standartizācijas organizācija) (2001) standartu. Šāda iekārta un atbilstošā metodika teorētiski nodrošina mērījumu precizitāti līdz 2%. Tā kā siltumizolācijas materiālu siltumvadītspēja ir lielā mērā atkarīga no daudziem ārējiem faktoriem, t.sk. temperatūras, tad tās minimālās, maksimālās un vidējās vērtības, pie kurām ir jāveic materiālu siltuma vadīšanas koeficienta mērījumi šāda tipa iekārtās, ir noteiktas standartā ASTM (*American Society for Testing and Materials,* latv. – Amerikas Testēšanas un materiālu apvienība) C 1058 (2008).

Eksperimenta laikā ir svarīgi, lai siltumizolācijas materiāls saglabā savu formu, tāpēc, beramās izolācijas siltumvadītspējas noteikšanai izgatavotas formas ar izmēriem 200×200×50 mm. Formas sānu malas izgatavotas no 6 mm biezas šķiedru plātnes, kurai ir zināms blīvums un siltumvadītspējas koeficients, bet pamatam izmantota plāna papīra sieta plāksne, kas neietekmē mērījumu. Izgatavotās formas ir redzamas 2.4. attēlā.

2.4. att. **Izgatavotā beramā siltumizolācijas materiāla forma, siltumvadītspējas un siltuminerces noteikšanai**
A – formas skats no augšās; B – formas skats no apakšas

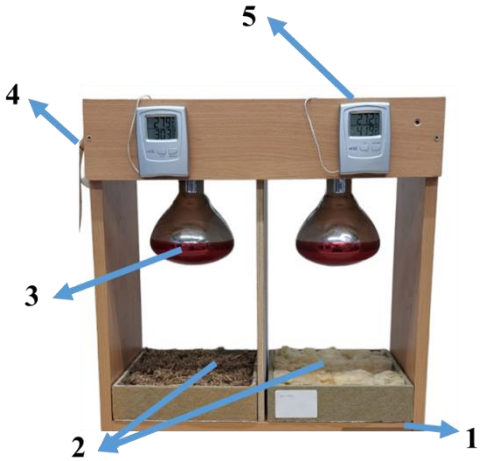
Nepieciešamo siltumizolācijas materiālu vienmērīgi iepildīja formā atbilstīgi noteiktajam blīvumam. Kondicionēja vairākas diennaktis 23°C temperatūrā pie 50% gaisa mitruma, līdz paraugs ieguva līdzsvara mitrumu. Kaņepju spaļu šķiedru izstrādātais izolācijas materiāls redzams 2.5. attēlā.

2.5. att. **Izstrādātais kaņepju spaļu izolācijas materiāls**

Sagatavotos paraugus pēc izturēšanas kondicionēšanas telpā ievietoja iekārtā HFM 436 Lambda un noteica siltumvadītspējas koeficientu. Siltumvadītspējas koeficientu kaņepju spaļu beramajai siltumizolācijai noteica pie dažādiem blīvumiem.

2.6.2. Siltuma inerce

Siltuminerces noteikšanai darba autors izgatavoja speciālu ierīci, kas imitē saules starojumu uz virsmas laukuma vienību, imitējot saules starojumu uz ēkas jumta konstrukciju. Izgatavotās iekārtas modelis redzams 2.6. attēlā. Siltuma inerci var raksturot kā pretestību kustībai, šajā gadījumā pretestību siltuma kustībai caur materiālu no siltuma starojošās puses uz otru pusi. 76°C temperatūra ir lielākā, kas ir konstatēta jumta konstrukcijās no saules starojuma (E.Windandy, Jerrold, 1991).



2.6. att. **Izgatavotā simulācijas siltuminerces noteikšanas iekārta**
1 – iekārtas korpuss; 2 – izolācijas materiālu maināmās formas; 3 – infrasarkano staru lampa; 4 – iesl/izsl slēdzis; 5 – temperatūras mērītājs ar sensoru.

Iekārtas korpusu izgatavoja no 18 mm biezas laminētas plāksnes. Iekārtai izveidoja divus nodalījumus, kuros katrā pie korpusa piestiprināja infrasarkano staru lampas (3) ar jaudu 250

W (0,25 kW). Lai veiktu siltuminerces mērījumus, iekārtas apakšā ir maināmas formas ar ārējiem izmēriem 200×200×50 mm, kurās iepilda siltumizolācijas materiālu. Formas centrā izveidots caurums, kur ievieto temperatūras mērītāju, kas fiksē temperatūras paaugstināšanos zem izolācijas materiāla. Attālums no infrasarkano staru lampas līdz siltumizolācijas materiālam ir 150 mm. Siltuminerci analizēja dažāda blīvuma kaņepju spaļu, izstrādāto kaņepju spaļu materiālam, kokšķiedrai, celulozes beramajai siltumizolācijai un neorganiskajām plākšņu vatēm. Mērījumu veikšanai divas formas piepildītas ar materiālu nepieciešamajā blīvumā un ievietotas katra savā korpusa nodalījumā. Formas apakšā, laukuma centrā, ir izveidots caurums, kurā ir iestrādāts termopārs. Pēc formas ievietošanas iekārtā sagaida, līdz temperatūra abos temperatūras nolasītājos stabilizējas un kļūst nemainīga. Sākuma temperatūra tiek nofiksēta un tad ar slēdzi manuāli ieslēgtas infrasarkanās gaismas lampas. Izolācijas materiāli pakļauti intensīvam izstarojošam siltumam 30 min vai arī līdz brīdim, kad zem siltumizolācijas esošais temperatūras mērītājs sasniedza savu maksimāli pieļaujamo 70°C temperatūras robežu. Mērījumus veica ik pēc 30 sekundēm. Pēc tam izslēdza infrasarkano staru lampu un turpināja veikt mērījumus, tos fiksējot ik pēc 30 sekundēm tikpat ilgu laiku, cik ilgi siltumizolācijas materiāls iepriekš atradās siltuma ietekmē. Lai iegūtie rezultāti būtu salīdzināmi, visiem paraugiem jābūt vienādā biezumā un blīvumā. Iegūtos mērījumus attēlo grafikā temperatūra pret laiku.

Termisko difūziju aprēķināja pēc formulas (Steven M. Shepard, 2018):

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot Cp} \ (m^2/s) \tag{2.9}$$

kur λ – siltumvadītspēja, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
ρ – blīvums, $kg \cdot m^{-3}$;
C_p – siltumietilpība, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

2.6.3. Ūdens tvaika pārvades raksturošana

Mērījumi veikti beramas formas siltumizolācijas materiāla, pielāgojot LVS EN 12086:2014 (Eiropas standartizācijas komiteja, 2014) standarta metodiku, kas paredzēta homogēniem maeriāliem. Katram paraugam noteica masas izmaiņas laikā (mg stundā) $G_{1,2}$ pēc 2.10. vienādojuma

$$G_{1,2} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}; \ [mg \cdot h^{-1}] \tag{2.10}$$

kur m_1 – izgatavotā parauga masa laikā t_1; mg;
m_2 – izgatavotā parauga masa t_2; mg;
t_1 un t_2 – secīgi svēršanas laiki, h.

Aprēķināja ūdens tvaika caurlaidības ātrumu g pēc 2.11. vienādojuma.

$$g = \frac{G}{A}; \ [mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}] \tag{2.11}$$

kur A – testēšanas parauga laukums, m^2.

Aprēķināta ūdens tvaika vadītspēja W, lietojot 2.12. sakarību:

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p}; \ [mg \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1} \cdot h^{-1}] \tag{2.12}$$

kur Δp – ūdens tvaika spiediena starpība, kurai vērtība ir atkarīga no testēšanas apstākļiem, $\Delta p = 1400$ Pa.

Aprēķināja ūdens tvaika pretestību Z pēc 2.13. izteiksmes.

$$Z = \frac{1}{W};\ \mathrm{m^2 \cdot Pa \cdot h \cdot mg^{-1}} \tag{2.13}$$

Noteica ūdens tvaika caurlaidību δ pēc 2.14. formulas.

$$\delta = W \cdot d;\ \mathrm{mg \cdot h \cdot m^{-1} \cdot Pa^{-1}} \tag{2.14}$$

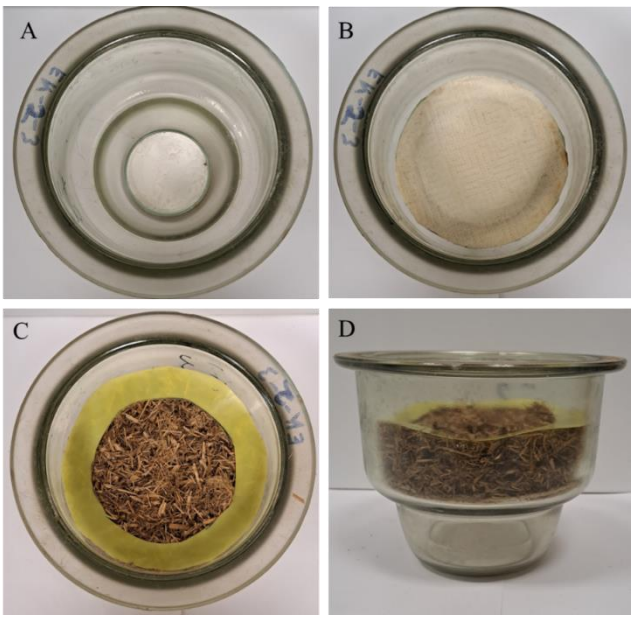
kur d – testēšanas parauga biezums metros.

Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu μ aprēķināja pēc 2.15. izteiksmes.

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta} \tag{2.15}$$

kur, δ_{air} – ir gaisa ūdens caurlaidība eksperimenta laikā, kas atkarīga no vidējā atmosfēras spiediena.

Paraugu sagatavošana. Stikla eksikatora apakšā ievietots trauks ar fosfora pentoksīdu (P_2O_5, Sigma Aldrich, >99%) (attēls 2.7. A) un 25 mm attālumā no pentoksīda ieklāts ūdens tvaika difūzijai pilnībā atvērts papīra sieta materiāls, kas nodrošina, lai beramais šķiedru siltumizolācijas materiāls nesaskartos ar pentoksīdu (attēls 2.7. B). Virs sieta ieklāts pētāmais beramais siltumizolācijas materiāls 50 mm biezumā (attēls 2.7. D). Paraugu pārklāj ar gumijas blīvi, lai neļautu ūdens tvaikam iekļūt gar trauka sienām (attēls 2.7. C). Blīves iekšējais laukums ar diametru – 12,5 cm ir atbilstošs parauga testēšanas laukumam.



2.7. att. **Paraugu sagatvošana tvaika difūzijas mērījumu veikšanai**
A – pentoksīda ievietošana, B – sieta ieklāšana, C – parauga un gumijas blīves ievietošana, D – paraugs sagatavots testēšanai

Paraugi pirms mērīšanas kondicionēti 23°C temperatūrā pie 50% gaisa mitruma līdz nemainīgai masai. Paraugiem noteica sākuma masu un ievietoja klimata skapī ar gaisa mitrumu

50% un temperatūru 23°C. Ik pēc 24 stundām paraugu izņēma no klimata skapja un nosvēra, procesu atkārtoja, līdz paraugs nemainīja masu. Aprēķinus veica pēc pēdējā mērījuma, kurā masas izmaiņas bija notikušas. Tvaika caurlaidību kaņepju spaļiem noteica pie dažādiem blīvumiem.

Rezultātu izvērtēšanai izmantots aprēķinātais ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ.

2.6.4. Ugunsreakcijas pārbaude ar Koniskā kalorimetra metodi

Ugunsreakcijas pārbaudes veiktas ar koniskā kalorimetra metodi pēc LVS ISO 5660-1:2015 (International Organisation of Standardization, 2015) standarta, 35 vai 50 $k \cdot W \cdot m^{-2}$ atbilst siltuma plūsmām, kas sastopamas ugunsgrēku attīstībā, imitējot ugunsgrēka scenāriju (Schartel & Hull, 2007). Ugunsreakcijas pārbaudes veiktas 50 $k \cdot W \cdot m^{-2}$ siltuma starojumā ar konisko kalorimetru Dual Cone Calorimeter (FTT, Lielbritānija).

Ja nepieciešama īpaši rūpīga analīze materiāla degamības īpašību analizēšanai, jāizmanto dažādi siltuma starojumi, piemēram, 25, 35, 50 un/vai 70 $k \cdot W \cdot m^{-2}$. Izvēloties augstāku apstarošanas siltumu, tas nodrošina lielāku uguns izplatīšanos, skaidrāk definētu aizdegšanos un īsāku mērījuma laiku, kas atbilst pilnīgāk attīstītam ugunsgrēkam. Metodes princips balstīts uz parauga virsmas pastāvīgu pakļaušanu vienmērīgam siltuma starojumam. Parauga aizdegšanos momentu (parādās liesma) un nodzišanu (liesmu vairs neredz) fiksē iekārtas operators, manuāli nospiežot taustiņu. Paraugs degšanas laikā atrodas uz iekārtas svariem, kas mēra masas zudumu ugunsgrēka laikā, veidojot masas zudumu līkni. Šī metode tiek izmantota viena veida produktu īpašību izpētei un uzlabošanai, jo iegūstami kvantitatīvi dati, kurus iespējams savā starpā salīdzināt. Iegūto datu analīzē var secināt, cik materiāls ir homogēns, izvērtēt virsmas īpašības ietekmi uz aizdegšanos, blīvuma ietekmi un novērtēt esošās ugunsreakcijas īpašības viena parauga vai sērijas ietvaros. Lai iegūtu salīdzināmus datus un prognozētu ugunsreakcijas uzvedību, mērītas un savstarpēji salīdzinātas tirgū esošo un izstrādāto materiālu ugunsrekacijas īpašības.

Būtisks faktors koksnes aizdegšanās un degšanas procesa raksturošanai ir koksnes mitrums un blīvums (Bartlett et al., 2019). Visi paraugi pirms mērījumu veikšanas kondicionēti 23°C temperatūrā un 50% gaisa mitrumā pēc LVS EN 13238:2010 (Eiropas standartizācijas komiteja, 2010a) standarta prasībām. Ugunsreakcija kaņepju spaļiem noteikta pie dažādiem blīvumiem. Pētijumā testēti neapstrādāti kaņepju spaļi un TS apstrādāti kaņepju spaļi (siltumizolācijas materiāls) ar blīvumu robežās no 60–100 $kg \cdot m^{-3}$, bez piedevām un ar antipirēna Boraka (Nātrija tetraborāts – $Na_2B_2O_7 \cdot 10H_2O$) piedevām 10% un 15% apjomā no lignocelulozes masas . Lai salīdzinātu siltumizolācijas materiāla ugunsreakcijas efektivitātes rādītājus, veica salīdzināšana ar divu veidu rūpnieciski ražotu reciklēta avīžu papīra beramiem siltumizolācijas materiāliem (Climatizer Plus un Termex) un beramo kokšķiedru izolācijas materiālu (Jeld-Wen), kuriem ir pievienoti antipirēni.

2.6.5. Skaņas izolācijas mērīšana

Skaņas izolācijas pretestība noteikta, izmantojot 4 kanālu akustisko analizatoru Soundbook (Sinus, Vācija) ar akustisko mērījumu cauruli „AFD 1200 – Acousti Tube" (2.8. att.). Iekārta nosaka skaņas izolācijas indeksu gaisā R.

Iekārta sastāv no skandas, pilnās pretestības caurules 100 mm diametrā un 4 mikrofoniem.

Skaņas izolācijas mērījumi veikti pēc 4 mikrofonu metodes (Brüel&Kjær, 2006). Mērīšanas procesā pirmajā kamerā esošais pirmais un otrais mikrofons analizē skandas radīto skaņas jaudu, bet otrajā kamerā esošais trešais un ceturtais mikrofons mēra pārnestās skaņas

jaudu. Mērījumus analizēja un aprēķināja ar skaņas izolācijas mērījumu analīzes programmatūru AFD 1201.

2.8. att**. Pilnās pretestības skaņas izolācijas mērīšanas iekārta AcoustiTube**
AED (Aucoustic Engeneering Dresden) attēls

Skaņas izolācijas vidējās vērtības visu frekvenču diapazonā noteiktas atbilstīgi Eiropas standartam LVS EN ISO 10140-1:2021 (Skujans et al., International Organisation of Standardization, 2021). Iekārtas vidū akustiskajā caurulē starp 2 ģipša plātnēm ievietoja paraugu (vienas plātnes biezums 12,5 mm) ar diametru 99,5 mm un biezumu 50 mm. Kopējais parauga biezums 75 mm. Caurules galā ir sūklis, kas absorbē skaņu, lai neveidotos atbalss. Konstrukcijas kopējo skaņas izolācijas Rw indeksu 100 – 3150 Hz diapazonā noteica pēc ISO 717-1:2013 (International Organisation of Standardization, 2013) standarta metodikas.

2.7. Datu statistiskā apstrāde

Datu statistiska analīze veikta, izmantojot MICROSOFT EXCEL programmatūras funkcijas. Lai noteiktu rezultātu vidējo vērtību, izmantota funkcija AVERAGE. Standartkļūda aprēķināta pēc formulas =STDEV/SQRT(x), kur izmantota funkcija STDEV, kas aprēķina standartnovirzi rezultātu kopai, un standartnovirze dalīta ar funkciju SQRT no paralēlo rezultātu skaita. Parametra ietekmes būtiskumu uz rezultāta rādītāja izmaiņām aprēķina ar EXCEL ANOVA Data Analysis Regression ar 5% varbūtību (0,05), iegūstot regresijas analīzes rezultātus. Ķīmiskā satura noteikšanai veikti 2 paralēlie mērījumi un KMR analīzēm veikti 3 paralēlie mērījumi, katram mērījumam sagatavojot paraugu atsevišķi. Analizējot siltumizolācijas materiāla īpašības, rezultāti iegūti no 3 paralēliem mērījumiem, katru iegūstot no paralēlajiem paraugiem.

3. REZULTĀTI

Nodaļā ir apkopoti un analizēti iegūtie rezultāti par kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla īpašībām un salīdzināti ar tirgū pieejamiem populārākajiem beramajiem šķiedru siltumizolācijas materiāliem.

Rezultātu aprakstīšanai izmantoti 3.1. tabulā redzamie apzīmējumi un krāsas.

3.1. tabula

Izstrādāto un pētīto siltumizolācijas materiālu apzīmējumi

Apzīmējums 1		T, Co	p, atm	t, s	ρ, kg·m^{-3}	Apzīmējums 2
KS-k		-	-	-	100	KS-k/100
KS-0		235	32	0	40	KS-0/40
					60	KS-0/60
					80	KS-0/80
					100	KS-0/100
KS-0,5				30	60	KS-0,5/60
					80	KS-0,5/80
					100	KS-0,5/100
KS-1				60	100	KS-1/100
KS-3				180	-	KS-3
KŠķ		-			60	KŠķ/60
					80	KŠķ/80
EVC					40	EVC/40
					60	EVC/60
EVT					40	EVT/40
					60	EVT/60

KS – kaņepju spaļi
-k – neapstrādāts paraugs
-0; -0,5; -1; -3 – attiecīgi, tūlīt pēc mērķa spiediena sasniegšanas, pēc 30 sek, 60 sek, 180 sek TS apstrādāti paraugi.
/40; /60; /80; /100 – parauga atbilstošais blīvums kg m^{-3}
KŠķ – kokšķiedras (industriāls siltumizolācijas materiāls)
EVC – ekovate Climax (industriāls siltumizolācijas materiāls)
EVT – ekovate TERMEX (industriāls siltumizolācijas materiāls)
-10 – pievienots 10% tetraborāta
-15 – pievienots 15% tetraborāta

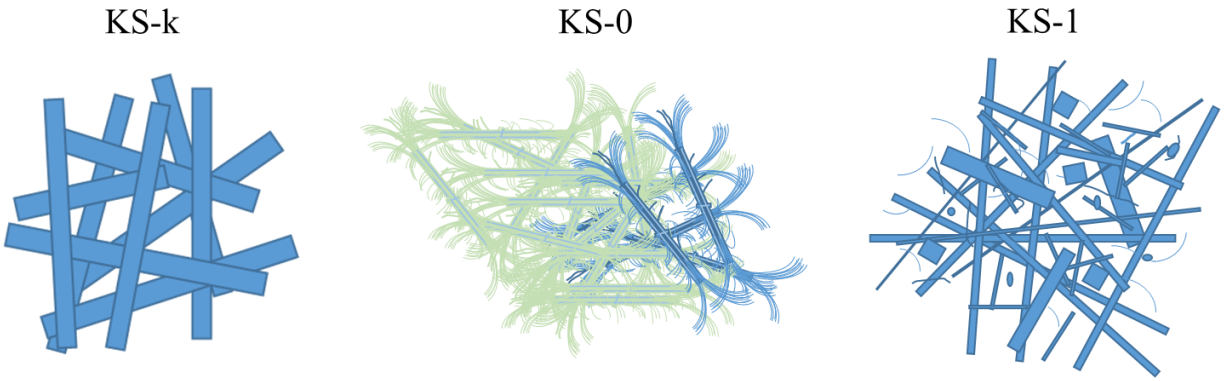
3.1. Materiālu iegūšana ar TS metodi

Tvaika sprādziens izmantots kā kaņepju spaļu apstrādes metode, lai iegūtu sašķiedrotāku materiālu ar lielāku beramtilpumu. TS procesu var iedalīt divās fāzēs. **TS pirmā fāze** ir biomasas apstrāde ar augstas temperatūras tvaiku paaugstinātā spiedienā. Pirmā fāze būtībā darbojas kā termoķīmiska reakcija (Van De Riet, 2019). Termoķīmiskajā reakcijā no biomasas hemicelulozēm tiek atdalītas acetilgrupas, un veidojas etiķskābe (Jönsson & Martín, 2016; Steinbach et al., 2020). No hemicelulozēm nelielā daudzumā veidojas arī uronskābe. Polisaharīdu noārdīšanās procesā veidojas skudrskābe un levulīnskābe (Steinbach et al., 2020).

Tālāk, izveidojušos skābju iedarbībā, notiek hemiceluložu hidrolīze (Steinbach et al., 2020; Van De Riet, 2019). Pie lielāka barguma faktora (augstākas temperatūras un laika) notiek celulozes amorfās daļas hidrolīze (Auxenfans et al., 2020), kā arī lignīna saišu, galvenokārt ß – O – 4, destrukcija (Bonini et al., 2007). **TS otrā fāze** ir adiabātisks process, kura laikā siltumenerģija pārvēršas mehāniskajā enerģijā, kā rezultātā rodas sprādzienveida spiediena tvaika izlāde. Pirmās fāzes laikā tiek mīkstināts materiāls, bet otrajā fāzē pie izlādes notiek mehāniska sašķiedrošana. TS mainās ne tikai šķiedras ķīmiskais sastāvs, bet arī virsmolekulārā un ultrastruktūra līdz pat šūnu līmenim. Kaņepju spaļu paraugu vizuālais izskats pirms un pēc TS parādīts 3.1. attēlā.

3.1. att. **Kaņepju spaļu paraugs pirms un pēc TS**

Pēc 3.1. attēla redzams, ka TS apstrādes ietekmē mazāka barguma faktora apstākļos (īsāks apstrādes laiks) kaņepju spaļi sašķiedroti jeb fibrillēti. Veidojas šķiedru kūļi, kas daļēji atrauti no kaņepju spaļiem. Šis process, visticamāk, notiek, jo TS pirmajā fāzē ūdens, temperatūras un spiediena ietekmē paraugs tiek mīkstināts, notiek starpšķiedru ūdeņraža saišu saraušana. Šīs saites tiek sarautas pirmās, un pēc tam seko ķīmiskās reakcijas. KS-0 parauga gadījumā TS apstrādes otrais posms – mehāniska sašķiedrošana – seko tūlīt pēc pirmā posma (tūlīt pēc T un spiediena pievadīšanas reaktors sekundes desmitdaļās tiek atvērts, un reaktora masa tiek ”izšauta” uztvērējā). Pie īsa TS apstrādes laika ķīmiskās reakcijas notiek minimāli, taču ūdens, temperatūras un spiediena ietekmē mīkstinātais materiāls ar pārrautām starpšķiedru ūdeņražu saitēm viegli sašķiedrojas. Iegūtais paraugs ir „uzpūkojies”, pateicoties šķiedru mikrofibrillām, kas daļēji palikušas piestiprinātas kaņepju spaļiem. Kā redzams 3.1. attēlā, palielinoties barguma faktoram (TS apstrādes laikam), sākas kaņepju spaļu destrukcija ķīmisko reakciju ietekmē. Kaņepju spaļi mehāniski sarauti smalkākos fragmentos, un šķiedru mikrofibrillas atrautas no kaņepju spaļu fragmentiem. Kaņepju spaļu paraugi sablīvinās. Kaņepju spaļu paraugu shematisks attēlojums pirms un pēc TS apstrādes attēlots 3.2. attēlā.



3.2. att. **Kaņepju spaļu paraugu shematisks modelis pirms un pēc TS**

Klasiski TS metode tiek izmantota kā priekšapstrāde, un galvenais uzsvars ir uz termoķīmisko fāzi. Promocijas darbā ir atklāts jauns TS metodes pielietošanas veids kaņepju spaļu pamatapstrādē.

Lai analizētu TS laikā notiekošos procesus atkarībā no barguma faktora (apstrādes laika), ir veiktas ķīmiskās, FTIR un KMR analīzes, kas apskatītas nākamajās nodaļās.

3.1. apakšnodaļas kopsavilkums: TS apstrāde notiek 2 fāzēs. Pirmā – termoķīmiska parauga mīkstināšana, otrā – adiabātisks process, kurā notiek mehāniska sašķiedrošana. Pie īsāka TS apstrādes laika ķīmiskie procesi notiek mazāk intensīvi. Tvaika un temperatūras ietekmē tiek mīkstināts materiāls un sašķeltas ūdeņraža saites. Sašķiedrošana notiek galvenokārt uz tvaika izlādes rēķina, spaļus sašķiedrojot mehāniski. Palielinot TS apstrādes laiku, pagarinās termoķīmiskās fāzes ilgums – straujāk notiek autohidrolīze, un parauga sadalīšanos būtiskāk sāk ietekmēt ķīmiskās reakcijas. Promocijas darbā ir atklāts jauns TS pielietošanas veids kaņepju spaļu pamatapstrād.

3.2. Kaņepju spaļu ķīmiskās īpašības

Lai analizētu TS ietekmi uz ķīmiskā sastāva izmaiņām un atbilstošu ķīmiskā sastāva izmaiņu ietekmi uz siltumizolācijas materiāla īpašībām, noteica kaņepju spaļu ķīmiskās īpašības pirms un pēc TS.

3.2.1. Ķīmiskā sastāva analīzes pirms un pēc TS

Kaņepju spaļu ķīmiskā analīze pirms un pēc TS veikta ar šķidruma hromatogrāfiju.

3.2. tabula

Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva izmaiņas atkarībā no TS apstrādes

Komponents, %	**KS-k**	**KS-0**	**KS-0,5**	**KS-1**	**KS-3**
Celuloze	37,7±0,3	37,3±0,5	38,3±0,2	39,3±0,4	41,1±0,2
Hemicelulozes	24,6±0,2	17,9±0,4	15,9±0,3	10,0±0,3	3,02±0,03
Skābē nešķīstošais lignīns	22,9±0,2	28,9±0,2	30,3±0,5	31,8±0,2	33,8±0,5
Acetilgrupas	4,02±0,12	3,92±0,06	3,38±0,02	1,89±0,06	0,68±0,04
Pelni	4,43±0,14	0,69±0,03	1,05±0,08	0,82±0,02	0,32±0,01
Cits (t, s, ekstraktvielas, pektīni, vaski, skābē šķīstošais lignīns, sadalīšanās produkti)	6,42±0,08	11,3±0,2	11,0±0,3	13,2±0,1	10,4±0,2
Celuloze/lignīns attiecība	*1,65*	*1,29*	*1,26*	*1,24*	*1,22*

Kā redzams 3.2. tabulā, palielinoties TS barguma faktoram, strauji samazinās hemiceluložu saturs kaņepju spaļu materiālā. Tas liecina, ka noticis autohidrolīzes process. Kā redzams no 3.2. tabulas piektās rindas, no kaņepju spaļu komponentiem atšķeļas skābās grupas (acetilgrupas), kas spēj veidot un veido etiķskābi. Turpinot TS apstrādi, no hemicelulozēm un to hidrolīzes produktiem, kā arī citiem lignocelulozes biomasā esošajiem cukuriem nelielā daudzumā veidojas arī uronskābe, skudrskābe un levulīnskābe (Steinbach et al., 2020). Skābju hidrolīzes procesā no hemicelulozēm veidojas cukuri un to dehidratācijas un oksidēšanas produkti. Samazinoties hemiceluložu saturam kaņepju spaļu paraugā, attiecīgi pieaug citu komponenšu relatīvais procentuālais saturs. Salīdzinot celulozes un lignīna procentuālā satura pieaugumu paraugos (3.2. un 3.3. tabulas pēdējā rinda), redzams, ka celulozes saturs

proporcionāli palielinās mazāk nekā lignīna saturs. Tas nozīmē, ka notiek hemiceluložu hidrolīze, bet, iespējams, arī celulozes nesakārtotās (amorfās) daļas hidrolīze. Šis aspekts plašāk apskatīts 3.2.3. nodaļā.

Lai absolūtos lielumos novērtētu kaņepju spaļu ķīmisko savienojumu izmaiņas, iegūtie dati pārrēķināti, ņemot vērā masas zudumus. Kā redzams 3.3. tabulā, palielinās pēc Klasona metodes noteiktā skābē nešķīstošā lignīna satura absolūtās vērtības, kas ir novērots arī citu autoru pētījumos (Negro et al., 2003; Steinbach et al., 2020). Tas ir skaidrojams ar tā saucamā pseido lignīna veidošanos. Notiek kondensācijas reakcija starp hemiceluložu hidrolīzes sadalīšanās produktiem un lignīnu, veidojoties cietai inertai vielai (Steinbach et al., 2020). Šī cietā viela nešķīst 72% sērskābē, tāpēc Klasona gravimetriskajā metodē to vairs nevar selektīvi atšķirt no lignīna. Iespējama arī ūdenī šķīstošo hemiceluložu sadalīšanās produktu repolimerizācija, kas arī varētu veidot pseidolignīnu. Hemiceluložu sadalīšanās produktu repolimerizācijas procesā iespējama sfērisku struktūru veidošanās uz kaņepju spaļu materiāla virsmas. Šāds process ir novērots hidrotermālajā karbonizācijā, kur, polimerizējoties cukuru sadalīšanās produktiem, veidojas mikrosfēras (Titirici et al., 2008). Mikrosfēras novērotas uz kaņepju spaļu paraugu virsmas pēc TS ar SEM. Tas apskatīts 3.3.4. nodaļā.

3.3. tabula

Kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva izmaiņast, pārrēķinot pret masas zudumiem

Komponents, %	**KS-k**	**KS-0**	**KS-0,5**	**KS-1**	**KS-3**
Celuloze	37,7	36,4	35,9	34,2	32,9
Hemicelulozes	24,6	17,5	14,9	8,7	2,4
Skābē nešķīstošais lignīns	22,9	28,2	28,4	27,7	27,0
Acetilgrupas	4,0	3,8	3,2	1,7	0,6
Pelni	4,4	0,7	1,0	0,7	0,2
Cits (t, s, ekstraktvielas, pektīni, vaski, skābē šķīstošais lignīns, sadalīšanās produkti)	6,4	11,0	10,3	11,5	8,3
Celuloze/lignīns attiecība	*1,65*	*1,29*	*1,26*	*1,24*	*1,22*

TS ietekmē jau pie maza barguma faktora vērojama pelnu satura samazināšanās (3.2. un 3.3. tabulas, 6.rinda). Pelnu sastāvs biomasā pārsvarā ir neorganisko vielu sāļi, kas šķīst skābē (Kalembkiewicz et al., 2018; Zhang et al., 2019). TS ietekmē notiek gan biomasas šķiedru mīkstināšana un mehāniska saraušana, kas atvieglo TS procesa šķīduma piekļūšanu minerālvielām, gan arī minerālvielu šķīšana TS radušos skābju iedarbībā. Tādējādi minerālvielas, kas atrodas biomasā, tiek izdalītas procesa škīdumā. Līdz ar to pelnu satura samazināšanos var uzskatīt gan par šūnu struktūras izjaukšanas, gan ūdens un skābju šķīdināšanas kopējo efektu (Biswas et al., 2011). Pelnu satura samazināšanās biomasā TS ietekmē novērojuši arī citi autori (Biswas et al., 2011; Stelte, 2013). Tabulu 3.2. un 3.3. pirmspēdējā rindā minēto citu ķīmisko savienojumu pieaugums TS ietekmē skaidrojams ar dažādu hemiceluložu, kā arī lignīna un celulozes sadalīšanās un repolimerizācijas produktu pieaugumu (Auxenfans et al., 2020).

3.2.2. FTIR

Furje transformācijas infrasarkanās gaismas spektrometrija (FTIR) vidējā diapazonā (no 2,5 līdz 25 μm, jeb 4000 līdz 450 cm^{-1}) ir viena no metodēm, ko iespējams izmantot pētāmo paraugu ķīmiskā sastāva raksturošanai. FTIR spektri parāda atsevišķu funkcionālo grupu raksturīgo saišu svārstības, kā arī dod iespēju novērtēt funkcionālo grupu izmaiņas, kas radušās TS apstrādes laikā, salīdzinot spektrus pirms un pēc apstrādes kaņepju spaļu biomasā un atsevišķi izdalītajā lignīnā (skat. 3.3. un 3.4. att.). 3.4. tabulā ir apkopoti biomasas pamatkomponentu raksturīgie FTIR absorbcijas maksimumi (Zhuang et al., 2020).

3.4. tabula

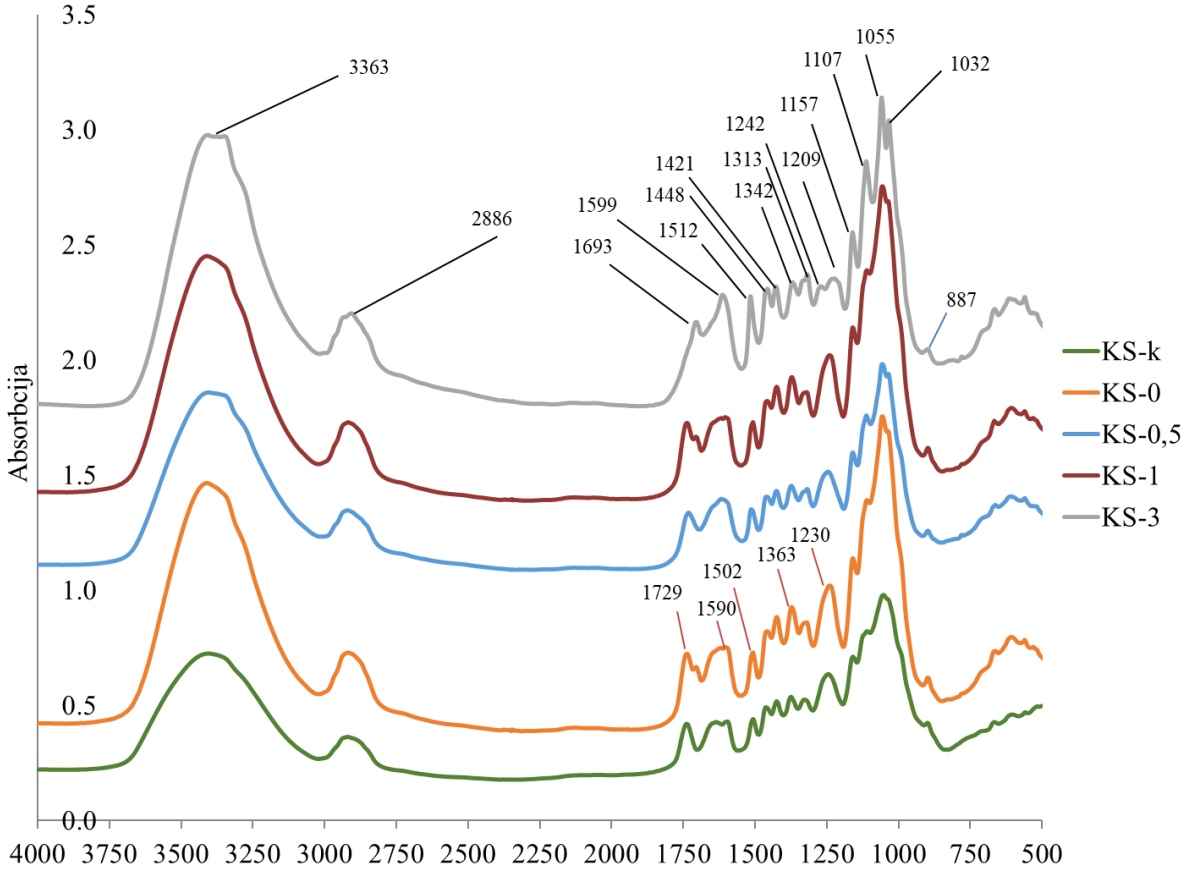
Biomasas komponentiem raksturīgo saišu un funkcionālo grupu raksturīgās FTIR absorbcijas

Viļņa numurs (cm^{-1})	**Raksturīgās saites un funkcionālās grupas**	**Biomasas komponente**
884–896	C-O-C svārstības	Celuloze, hemicelulozes
1028–1034	Aromātisko savienojumu C-H plaknes defomācija, C-O svārstības	Celuloze, lignīns
1047–1057	C-OH vibrācijas, C-O deformācja	Celulozes, hemicelulozes, lignīns
1091–1108	Aromātisko savienojumu C-H plaknes defomācija	Lignīns
1130–1160	C-O-C svārstības	Celuloze, hemicelulozes
1225–1250	C-O svārstības	Lignīns, hemicelulozes
1300–1320	CH_2 vibrācijas, C5 aizvietotu aromātisko vienību C-O svārstības	Celulozes, hemicelulozes, lignīns
1340–1370	C-H saites, C-H svārstības CH_3 grupā	Celulozes, hemicelulozes, lignīns
1411–1419	Simetriskas CH_2 saišu vibrācijas, karboksilgrupu simetriskās svārstības, C-H grupas deformācijas, aromātiskā gredzena vibrācijas	Celulozes, hemicelulozes, lignīns
1430–1460	C-H grupas deformācijas (*metil* un *metilēn* grupās)	Lignīns
1500–1515	C=C-C aromātiskā gredzena svārstības	Lignīns
1590–1605	Aromātiskā gredzena vibrācijas	Lignīns
1650–1670	C=O svārstības, absorbētais O-H	Hemicelulozes, lignīns
1698–1710	Brīvās karboksilskābes, konjogētie aldehīdi	Hemicelulozes
1725–1745	C=O svārstības	Hemicelulozes, lignīns
2885–2925	C-H svārstības	Celulozes, hemicelulozes, lignīns
3365–3395	O-H svārstības	Celulozes, hemicelulozes, lignīns

Salīdzinot 3.3. attēla FTIR absorbcijas spektra absorbcijas maksimumus ar 3.4. tabulā apkopotajiem datiem, redzams, ka visu paraugu spektri atbilst lignocelulozes biomasai raksturīgiem spektriem. Paraugiem pēc TS apstrādes 0, 0,5 un 1 min nav manāmas būtiskas atšķirības, salīdzinot ar paraugu pirms apstrādes, taču pēc 3 min TS apstrādes FTIR spektros ir

novērojamas absorbcijas maksimumu izmaiņas. Tas ir skaidrojams ar to, ka pie mazāka barguma faktora TS apstrādē nenotiek FTIR spektros redzamas strukturālas izmaiņas.

Visi kaņepju spaļu biomasas paraugi gan pirms, gan pēc TS apstrādes FTIR spektros uzrādīja spēcīgu OH saišu svārstības, kas saistītas ar ūdeņraža saitēm un CH saites svārstības absorbciju attiecīgi pie 3363 un 2887 cm^{-1} (3.3. attēls). Šīs divas spēcīgās absorbcijas ir tāpēc, ka visu trīs galveno biomasas komponentu (celulozes, hemiceluložu un lignīna) struktūrās ir hidroksilgrupas (-OH) un C-H saites. Absorbcija pie 1618 cm^{-1} diviem ar TS apstrādātajiem paraugiem (KS-0 un KS-1) ir saistīti ar -OH grupu absorbciju un norāda uz lielāku mitruma saturu kā citiem paraugiem. Tāpat šiem paraugiem ir lielāka absorbcija pie 3363 cm^{-1}, kas arī var liecināt par lielāku mitruma saturu.

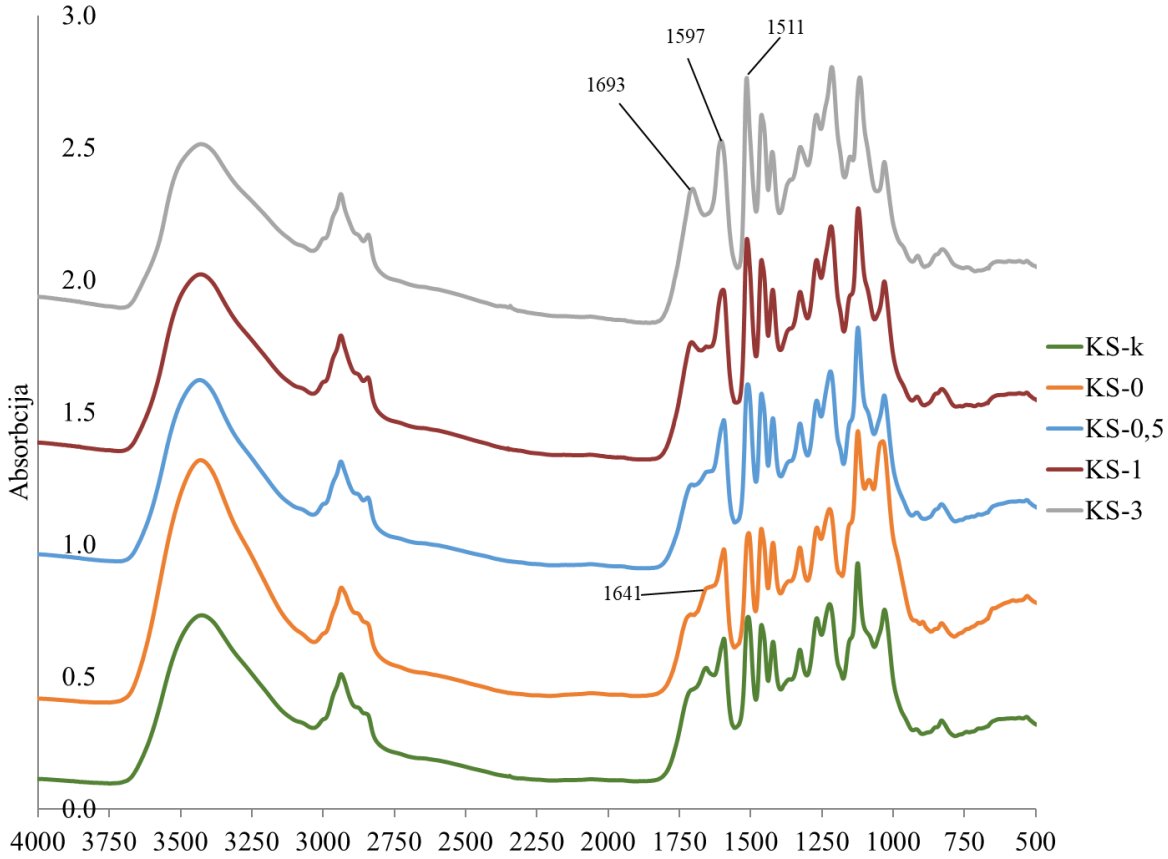


3.3. att. **Kaņepju spaļu FTIR absorbcijas spektri pirms un pēc TS**

Absorbcija pie 1729 cm^{-1} ir saistīta ar C=O svārstībām hemicelulozēs un lignīnā. Absorbcijas maksimums pie 1590, 1500, 1450 un 1420 cm^{-1} raksturīgs lignīnam un attiecīgi ir saistīts ar aromātiskā gredzena svārstībām un C-H grupu deformācijām. Absorbcijas maksimumu pie 1420 cm^{-1} veido arī simetriskas CH_2 lieces vibrācijas celulozē un karboksilgrupu vibrācijas glikuronskābē ar ksilānu. Pie viļņu garuma 1370 cm^{-1} novērota C-H liece hemicelulozēs un lignīnā (alifātiskā CH svārstības metilspirtā un fenola spirtā). FTIR spektra absorbcija 1317 cm^{-1} viļņu garumā ir raksturīga CH_2 grupai celulozē un hemicelulozēs un C5 aizvietoto aromātisko vienību C-O svārstības lignīnā. Līdzīgi C-O svārstības lignīnā un hemicelulozēs ir novērojama pie 1230 cm^{-1}. Joslas pie 1160 un 890 cm^{-1} rodas no C-O-C svārstības celulozes un hemicelulozes β-(1 → 4)-glikozīdu saitēs. Absorbcija pie 1100 cm^{-1} ir saistīta ar aromātisko CH plaknes deformāciju lignīnā. Josla pie 1050 cm^{-1} raksturo celulozes un hemiceluložu C-OH svārstības vibrācijas. Turklāt šis signāls raksturo arī C-O deformāciju sekundārajos spirtos un alifātiskos ēteros. Celulozes un primāro spirtu C-O svārstības un CH plaknes deformāciju lignīnā var novērot pie 1030 cm^{-1}. Lielākās FTIR absorbcijas maksimumu izmaiņas ir novērojamas viļņu garuma intervālā no 1750 līdz 1200 cm^{-1}. Kaņepju spaļu FTIR

spektros karbonilgrupu svārstību diapazonā var novērot izmaiņas pirms un pēc TS apstrādes. Izejas kaņepju spaļu FTIR spektrā ir izteikts signāls pie 1730 cm^{-1}, kas saistīts ar esteru karbonilgrupas svārstībām, un signāls pie 1230 cm^{-1}, kas raksturīgs acetātgrupu C-O saites svārstībām. Šo signālu intensitāte samazinās, pieaugot TS barguma faktoram. Paraugam KS-3 ar vislielāko TS barguma faktoru absorbcijas maksimumi pie 1730 un 1230 cm^{-1} ir pazuduši, vienlaicīgi parādoties signālam pie 1700 cm^{-1} un signāliem pie 1242 un 1209 cm^{-1}. Tas parāda, ka kaņepju hemicelulozes satur ar estera saiti saistītas acetātgrupas, kas TS rezultātā tiek atšķeltas un notiek hemiceluložu hidrolīze. Tas apstiprina 3.2. nodaļā izvērtēto ķīmisko analīžu rezultātus. Palielinoties TS barguma faktoram, lignīnam raksturīgo signālu intensitāte pie 1600 cm^{-1}, 1500 cm^{-1}, 1450 cm^{-1} palielinājās, kas izskaidrojams ar pseido lignīna veidošanos lignīna un hemiceluložu degradācijas produktu repolimerizācijas/kondensēšanās rezultātā. Absorbcijas maksimumi apgabalā no 890 cm^{-1} līdz 1200 cm^{-1}, kas raksturīgi ogļhidrātiem, pieaugot TS barguma faktoram, kļuva izteiktāki (3.3. att.) (Auxenfans et al., 2020; Sasaki & Nakamura, 2017; Zhuang et al., 2020).

Kaņepju spaļu izolēto lignīnu FTIR spektri apstiprināja iepriekš novēroto lignīna aromātiskā gredzena absorbcijas maksimuma nobīdi un intensitātes pieaugumu no 1507 uz 1515 cm^{-1} (3.4. attēls). Iespējams notiek lignīna aromātiskā gredzena kondensācijas reakcijas. Vienlaikus varēja novērot absorbcijas palielināšanos viļņu garuma diapazonā no 1700-600 cm^{-1}, kas raksturīgas nekonjugētām karbonilgrupām. Tas norāda uz lignīna oksidēšanas reakcijām (H. Wang et al., 2020). Šis rezultāts var būt saistīts ar β-O-4′ saišu pārrāvumu, veidojot nekonjugētu β-ketonu.



3.4. att. **Kaņepju spaļu Klasona lignīna FTIR absorbcijas spektri pirms un pēc TS**

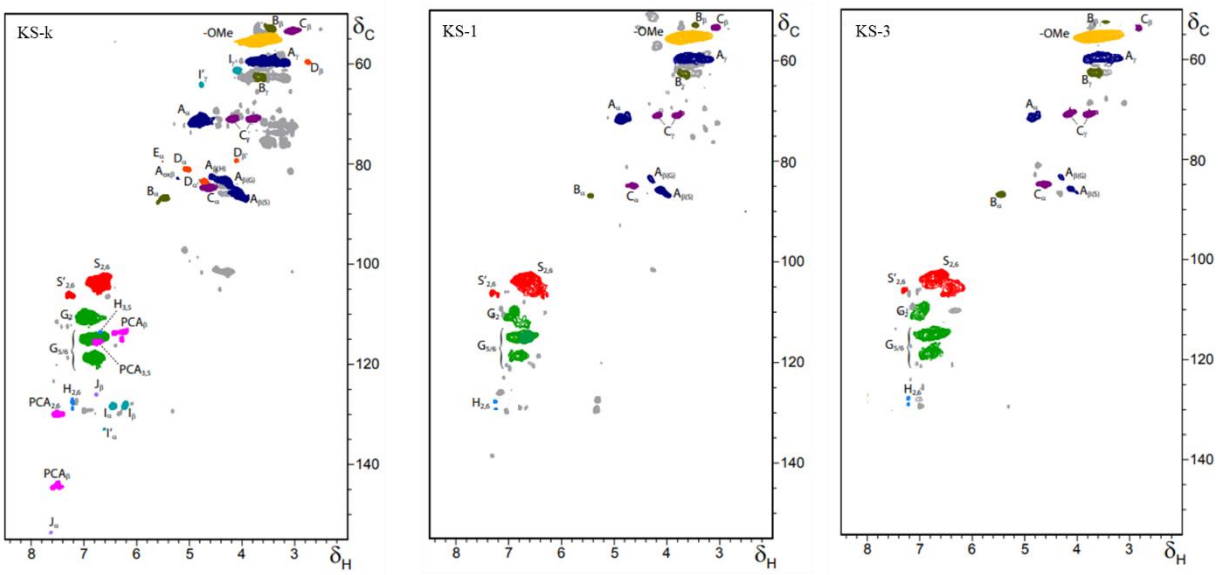
TS procesā veidojās organiskās skābes, kas radīja vāji skābus apstākļus. Skābos apstākļos notiek divas reakcijas: β-O-4′ saišu pārrāvums un kondensācijas reakcija. β-O-4′ destrukcija pierādīta ar KMR analīzēm, kas sīkāk apskatītas 3.4. nodaļā. Visredzamākā atšķirība lignīna paraugu FTIR spektros ir absorbcijas maksimuma samazināšanās un izzušana

pie 1652 cm^{-1} (konjugētās karbonilgrupas un karboksilgrupas), pieaugot TS barguma faktoram. Šie rezultāti liecina, ka notikusi lignīna frakciju degradācija.

3.2.3. Kodolmagnētiskā rezonanse

Lai iegūtu papildu informāciju par TS apstrādes barguma faktora ietekmi uz lignīna strukturālajām iezīmēm, neapstrādātie un TS apstrādātie kaņepju spaļi pētīti ar 2D KMR palīdzību 2D ^{1}H-^{13}C HSQC (*hetero nuclear single quantum coherence*), kas ļauj raksturot visu lignīnu atšķirībā no klasiskajām ķīmiskajām analīzēm vai FTIR.

Galvenās izmaiņas kaņepju spaļu lignīna saišu daudzumā redzamas 3.5. attēlā un atspoguļota 3.5. tabulā. 3.5. attēlā uzrādītas lignīna monomēru, funkcionālo grupu un saišu struktūras, kas analizētas 3.3. attēlā un 3.4. tabulā. KMR spektru maksimumi (3.5. attēls) izvērtēti saskaņā ar literatūras datiem.



3.5. att. **Kaņepju spaļu KMR spektri pirms un pēc TS apstrādes**

β-O-4′ arilētera (A) saites identificētas pēc krusteniskām virsotnēm pie δC/δH 71,8/4,8 ppm. (Aα) un 83,/4,4 ppm (Aβ). Fenilkumarāns (B) ir otrā visizplatītākā starpvienība (β-5′), kas veidojas, savienojot monolignola β- pozīciju ar pieejamo lignīna vienību 5. pozīciju. Pie signāliem δC/δH 86,8/5,4 ppm (Bα) un 53,1/3,4 ppm (Bβ) identificētas fenilkumarāna α- un β-pozīcijas. Signāli pie δC/δH 85,7/4,73 ppm (Cα) un 54,2/3,05 ppm (Cβ) raksturīgi resinoliem (C) ar β-β saišu struktūru.

Neapstrādātā kaņepju spaļu materiāla KMR spektros identificētas lignīna gala grupas (*end-groups*) pie signāliem 61,3/4,1 (Iγ); 128,4/6,4(Iα) un 128,4/6,2 (Iβ), kas raksturīgi kanemilnspirtam (I). γ-acilēta kanemilspirta gala grupa (I’) identificēta pie 64,1/4,8 (I’γ) un 132,9/6,6 (I’α). Kanemilaldehīda (J) gala grupas uzrādītas pie signāliem 126,3/6,8 (Jβ) un 153,4/7,6 (Jα). Šīs gala grupas nav redzamas apstrādātu kaņepju spaļu paraugos (3.5. attēls un 3.5. tabula), kas liecina, ka TS apstrādes laikā tiek nošķeltas lignīna gala grupas. Lignīnu sānu ķēdes acilēšanas pakāpei ir būtiska nozīmē TS autohidrolīzes procesā. Papildu β-O-4 arilētera saišu degradācijai un lignīna gala grupu nošķelšanai, siringil/gvajacila (S/G) attiecības maiņa bija vēl viena svarīga strukturāla izmaiņa, kas novērota pēc TS pirmapstrādes (3.5. tabula). Dati liecina, ka TS ietekmē gvajacil jeb G-tipa lignīns noārdījās vieglāk, par ko liecina S/G attiecības palielināšanās. Attiecīgi TS laikā siringil vienības kondensējās mazāk nekā gvajacilvienības, jo siringilvienībai C5 pozīcijā ir stēriski šķēršļi metoksilgrupu klātbūtnes dēļ.

Kā redzams no 3.5. attēla un 3.5. tabulas kvantitatīvajiem rādītājiem, neapstrādātam kaņepju spaļu paraugam acilēšanās pakāpe pret lignīna aromātiskajām vienībām ir 21%, bet pēc TS apstrādes acilēšanās pakāpe ir 0%. Tas liecina, ka TS procesa laikā no lignīna sānu grupām tiek atšķelta acetilgrupa un veidojas etiķskābe, kas tālāk piedalās autohidrolīzes procesā.

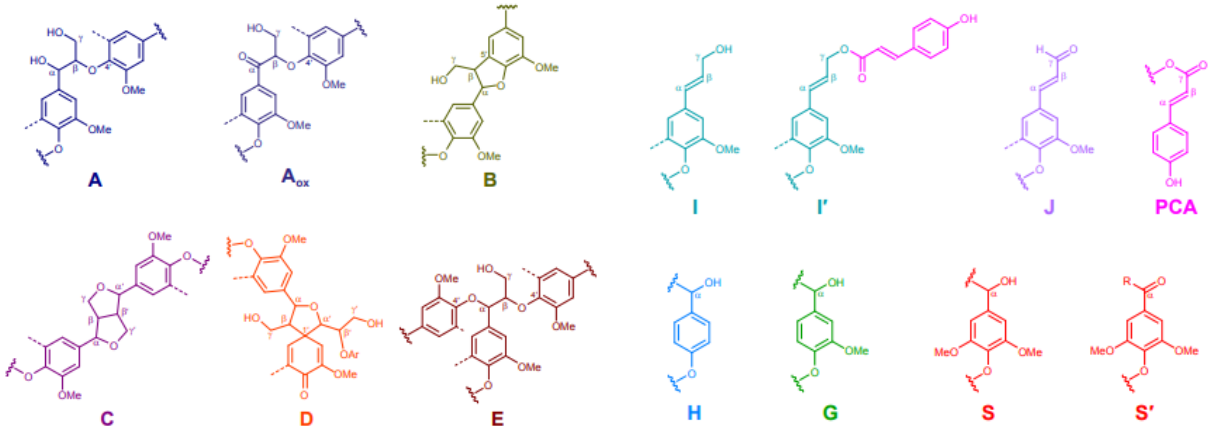
3.5. tabula

TS apstrādāto kaņepju lignīna starpmonomēro saišu izmaiņas uz 100 fenilpropāna vienībām

Lignīna raksturīgās grupas	**KS-k**	**KS-1**	**KS-3**
Lignīna iekšējo fragmentu saites (uz 100 aromātiskām vienībām)			
β-O-4 arilēteris (A)	51	25	10
α-oksidēt β-O-4arilēteris (A_{ox})	1	0	0
β-5 fenilkumarāns (B)	6	6	6
β-β retinols (C)	13	12	11
β-1 spirodienons (D)	2	0	0
α,β-diarilēteris (E)	1	0	0
Lignīna gala grupas (uz 100 aromātiskajām vienībām)			
kanemilspirta gala grupa (I)	4	0	0
γ -acilēta kanemilspirta gala grupa (I')	1	0	0
kanemilaldehīda gala grupa (J)	1	0	0
Lignīna sānu ķēdes γ-acilēšana (uz 100 aromātiskajām vienībām)	21	0	0
Lignīna aromātiskās vienības (H+G+S=100)			
H (%)	2	3	3
G (%)	49	48	45
S (%)	49	49	52
S/G attiecība	1,0	1,0	1,2
p-kumarāti (% no H+G+S)	6	0	0

Autohidrolīzes procesā notiek gan iepriekš apskatīto hemiceluložu hidrolīze un šķīšana, ūdeņraža saišu pārraušana starp celulozes mikrofibrillām (uzpūkošanās jeb fibrillēšanās), kā arī lignīna tālāka destrukcija. Pamatojoties uz kvantitatīviem rezultātiem (3.5. tabula), neapstrādātu kaņepju spaļu lignīnā ir 52% β-O-4′ saites. 1 un 3 min TS apstrādes laikā samazinās β-O-4 saišu procentuālais saturs attiecīgi līdz 25% un 10%. Šie dati liecina, ka lignīna depolimerizācija ir dominējošā reakcija. Pārējo beta saišu izmaiņas ir nelielas. Izejas kaņepju spaļos β-β ir 13% un β-5 ir 6%. Attiecīgi pēc 1 un 3 min TS apstrādes β-β saišu skaits samazinājies līdz 12% un 11%, bet β-5 saglabājās 6% apjomā. Visos TS lignīnos dominē β-0-4 saites, jo vienkārši kondensēto struktūru saišu skaits ir relatīvi zems. Lignīna fragmentos esošās β saites un funkcionālās grupas attēlotas 3.6. attēlā.

Iegūtie rezultāti sakrīt ar jaunākajiem pētījumiem par lignocelulozes biomasas lignīna strukturālo raksturojumu pēc TS (Auxenfans et al., 2020; H. Wang et al., 2020). Iepriekš apspriestie FTIR dati (3.3. att., 3.4. att.) parādīja, ka TS laikā notiek lignīna repolimerizācijas un rekondensācijas reakcijas, kas reizē ar KMR rezultātos apskatīto β-0-4 saišu destrukciju, iespējams, ir divas konkurējošas reakcijas TS apstrādes laikā. Tomēr jautājums par to, vai pirmapstrāde noved pie lignīna aromātisko vienību kondensācijas, joprojām ir daļēji neizskaidrots.



3.6. att. **Galvenās lignīna monomēru struktūras kaņepju spaļu paraugos**
β-O-4 alkil-arilēteris (A), α-oksidēts β-O-4 alkil-ariēteris (A_{ox}), β-5 fenilkumarāns (B), β-β resinols (C), β-1 spirodienons (D), α,β-diariēteris (E), kanemilspirta gala grupa (I), γ-acilēta kanemilspirta beigu grupa (I'), kanemilspirta aldehīda gala grupa (J), p-kumerāti (PCA), H-hidroksilfenil vienība (H), gvajacilvienība (G), siringilvienība (S), α-oksidēta siringilvienība

3.2. apakšnodaļas kopsavilkums: Pēc ķīmisko analīžu datiem var secināt, ka kaņepju spaļu biomasa sastāv no ogļhidrātiem – celulozes, hemicelulozēm, ieskaitot acetilētās hemicelulozes, un lignīna, kā arī neliela procenta pelnu un citu savienojumu. TS apstrādes laikā notiek deacitilēšanās reakcijas, biomasas hidrolīze, samazinās hemiceluložu saturs un palielinās relatīvais lignīna saturs. Veidojas tā saucamais pseido lignīns. Notiek oksidēšanas un kondensēšanas reakcijas, biomasas sastāvdaļu destrukcija un repolimerizācija. Pie īsāka TS apstrādes laika notiek hemiceluložu un nelielā daudzumā celulozes amorfās daļas hidrolīze, pelnu izskīšana. Palielinot asptrādes laiku līdz 1–3 min, sākas lignīna destrukcija, galvenokārt depolimerizācija β-O-4 saitēs.

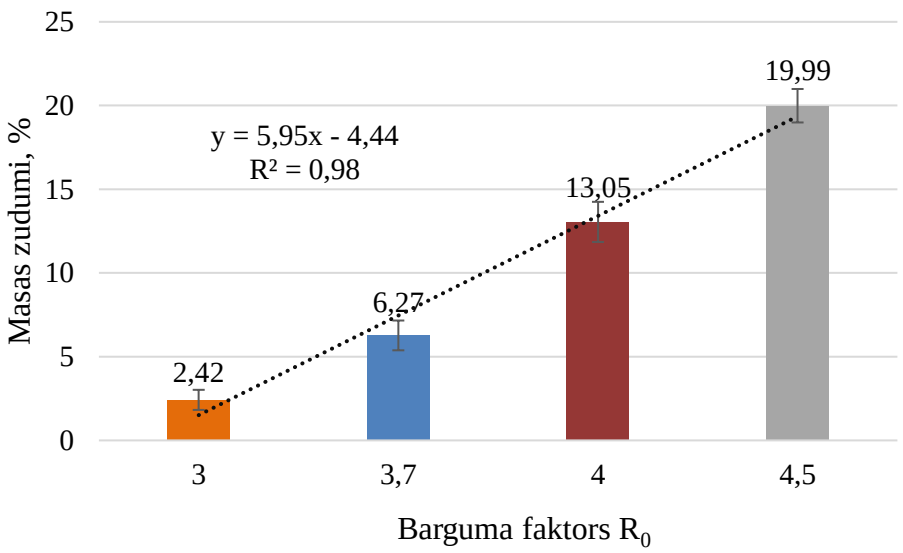
3.3. Kaņepju spaļu kā siltumizolācijas materiāla fizikālo izmaiņu pētījumi pirms un pēc TS

Kaņepju spaļu kā siltumizolācijas materiāla izmaiņas pirms un pēc TS raksturoja, nosakot masas zudumus, frakcionālo sastāvu, beramblīvumu un beramtilpumu, kas būtiski ietekmē siltumizolācijas materiāla īpašības.

3.3.1. Masas zudumi

Pēc TS apstrādes novēroti masas zudumi. Tas jāņem vērā, izvēloties piemērotākos apstrādes apstākļus izolācijas materiāla izstrādei, lai tas būtu ekonomiski pamatoti.

Kā redzams 3.7. attēlā, masas zudumi kļūdu robežās pieaug lineāri proporcionāli pret barguma faktoru. Masas zudumi skaidrojami ar: (i) gaistošo vielu iztvaikošanu un (ii) ūdenī šķīstošo ekstraktvielu pāreju šķīdumā pie zemāka barguma faktora, (iii) daļēju cukuru pāreju gaistošajos produktos un (iv) hemiceluložu hidrolīzi, pieaugot barguma faktoram un (v) celulozes nesakārtotās (amorfās) daļas hidrolīzi pie augstāka barguma faktora. Šie procesi apskatīti 3.2. sadaļā par kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva izmaiņām. Masas zudumi pieaug robežās no 2,5% līdz 20%. Mazākais masas zudums novērojams KS-0 paraugam, jo apstrādes procesā tam ir visīsākā termoķīmiskā fāze un maksimāli maz notikusi parauga ķīmiskā destrukcija. Masas zudumi notikuši uz neorganisko vielu sāļu izšķīšanas un daļējas hemiceluložu hidrolīzes rēķina.



3.7. att. **Masas zudumi ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem**

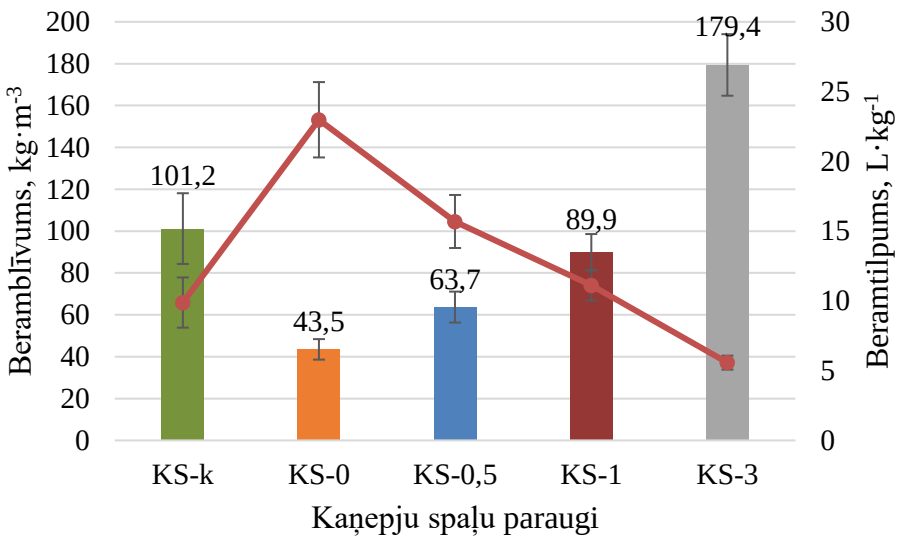
3.3.2. Beramtilpums un beramblīvums

Beramblīvums un tam apgrieztais rādītājs beramtilpums ir būtiski parametri izolācijas materiāliem. Tas norāda, cik daudz beramās izolācijas materiāla būs nepieciešams iestrādāt pie vienāda siltumizolācijas slāņa biezuma. Beramblīvums ir fizikāls lielums, kas nosaka, cik sver 1 m^3 parauga. Beramblīvumam apgrieztais lielums beramtilpums raksturo, cik lielu tilpumu aizņem 1 kg parauga.

Beramblīvuma un beramtilpuma izmaiņas kaņepju spaļu izolācijas materiāliem pirms un pēc TS apstrādes redzamas 3.8. attēlā. Paraugam KS-0 beramblīvuma vērtība samazinājās vairāk kā 2 reizes, salīdzinot ar sākotnējo kaņepju spaļu paraugu KS-k. Beramblīvuma samazināšanos nodrošina šķiedru uzirdināšanās.

Ķīmiskais process, kas notiek TS apstrādē, ir sarežģīts (skatīt 3.2. apakšnodaļu), bet ir zināmi vairāki iespējamie procesi, kas nodrošina šķiedru uzirdināšanos vai sablīvēšanos. Primāri šķiedru uzirdināšanās notiek pateicoties tam, ka šķiedras iekšienē tiek pārrautas ūdeņraža saites, daļēji atbrīvojot celulozes fibrillas. Tiek atvērti šķiedru kūļi un daļēji šķeltas saites starp celulozi, lignīnu un hemicelulozēm. Process shematiski redzams 3.2. attēlā. Šādā veidā šķiedras sastāvdaļas kļūst vieglāk pieejamas ķīmisko vielu iedarbībai. Kā redzams 3.8. attēlā, palielinot apstrādes laiku līdz 30 un 60 sekundēm (paraugi KS-0,5 un KS-1; attiecīgie barguma faktori 3,7 un 4), beramblīvums samazinās mazāk (pret kontroles paraugu), respektīvi, palielinot apstrādes laiku, kaņepju spaļi sāk sablīvēties, salīdzinot ar paraugu KS-0.

Tas skaidrojams ar to, ka, palielinoties TS apstrādes laikam, no kaņepju spaļos esošajām acetilgrupām veidojas skābes (galvenokārt etiķskābe). Tā rezultātā notiek hemiceluložu hidrolīze (hemiceluložu hidrolīzes produkti pāriet šķīdumā) un notiek arī celulozes amorfās daļas hidrolīze, kā arī notiek celulozes kristālisko fragmentu atdalīšanās no celulozes amorfās daļas. Paralēli notiek lignīna, galvenokārt ß – O – 4 saišu destrukcija. To pierāda arī 3.2.1. sadaļā apskatītās kaņepju spaļu ķīmiskā sastāva izmaiņas TS laikā, 3.2.2. sadaļā izvērtētās FTIR analīzes un 3.2.3. sadaļā aplūkotās KMR analīzes.



3.8. att. **Beramtilpums (līnija) un beramblīvums (stabiņi) neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem**

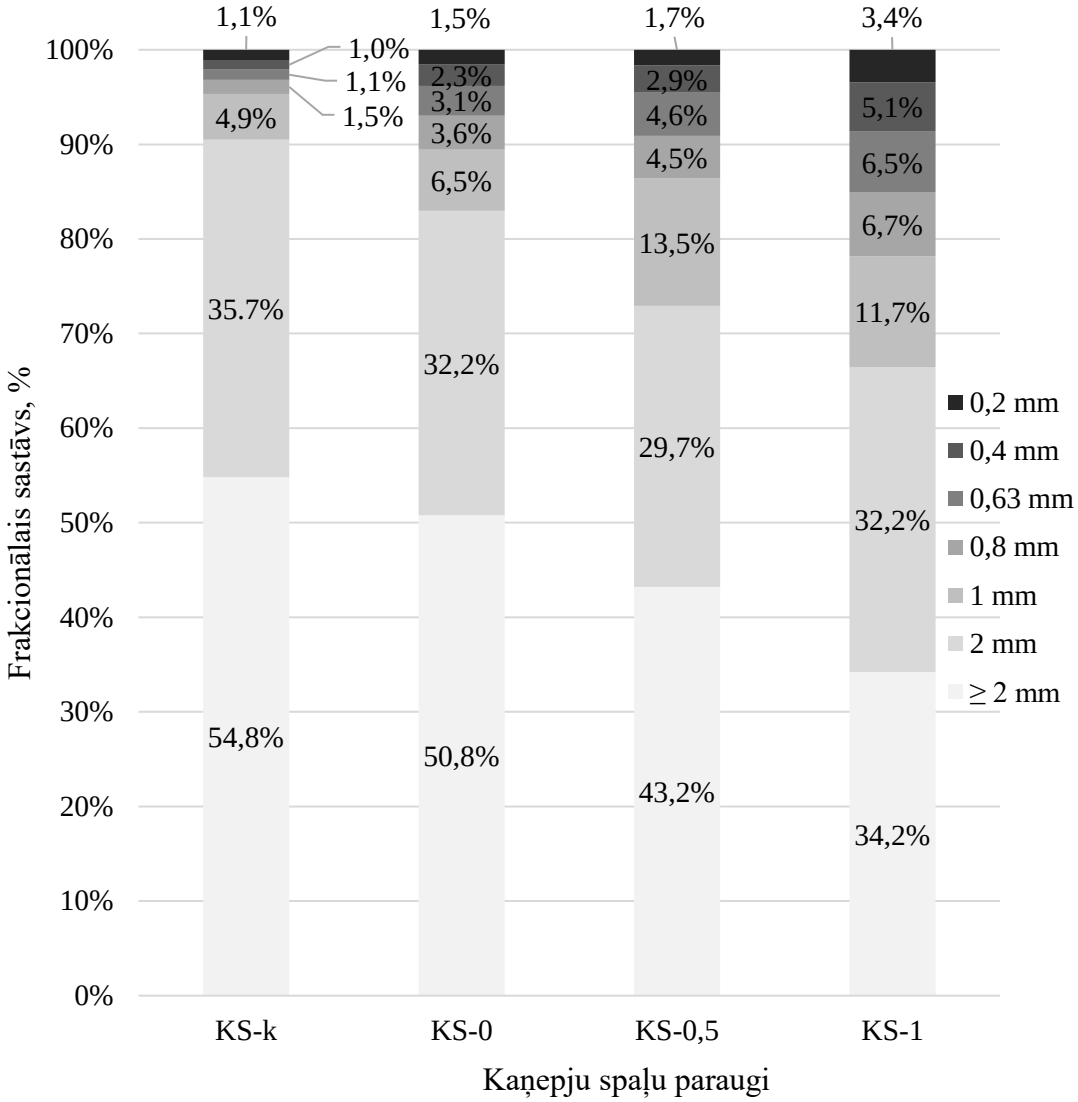
Palielinot apstrādes laiku līdz 3 min (paraugs KS-3; atbilstošais barguma faktors 4,5), sākas parauga destrukcija. Gandrīz pilnībā notikusi hemiceluložu hidrolīze (3.2. tabulas rezultāti), turpinās lignīna ß – O – 4 saišu destrukcija un notiek celulozes mikrofibrillu amorfo apgabalu hidrolīze. Veidojas celulozes kristālisko apgabalu fragmenti jeb mikrokristāliskā un nanokristāliskā celuloze. Veidojas ļoti īsi šķiedru fragmenti, paraugs sablīvējas un beramblīvums palielinās gandrīs 2 reizes, salīdzinot ar kontroles paraugu. Tā kā paraugs KS-3 ir ar lielāku beramblīvumu nekā izejas kaņepju spaļiem un nav piemērots siltumizolācijas materiāliem, tālākos pētījumos tas netiek apskatīts.

3.3.3. Frakcionālais sastāvs

Izejas kaņepju spaļu materiāla KS-k šķiedru sastāvu gandrīz 55% veido šķiedras ar izmēriem virs 2 mm, nedaudz vairāk kā 40% ar šķiedru izmēriem 1–2 mm. Tikai 5% veido smalkā frakcija ar izmēriem mazākiem kā 1 mm.

Kā novērojams 3.9. attēlā, pēc TS apstrādes samazinās lielāko izmēru frakcijas daudzums un pieaug smalkās frakcijas daudzums. Pēc 0 min. apstrādes smalkās frakcijas daudzums pieauga līdz 10%, pēc 0,5 min. apstrādes – līdz 14%, bet pēc 1 min. apstrādes smalkās frakcijas daudzums pieauga līdz pat 33%. Palielinoties smalkās frakcijas procentuālajam daudzumam un strauji samazinoties lielāko izmēru frakcijas procentuālajam daudzumam, sākas parauga sablīvēšanās (paraugi KS-0,5 un KS-1) un pieaug beramblīvums, kas apskatīts 3.6.2. nodaļā. Pēc 0 min. apstrādes notiek galvenokārt šķiedru kūļu atvēršanās un parauga uzirdināšanās, nedaudz izmainās frakcionālais sastāvs un nelielā daudzumā notikusi šķiedru destrukcija. Pēc 0,5 un 1 min. apstrādes palielinās smalkās frakcijas daudzums, kas nozīmē, ka no šķiedru kūļiem ir atrautas šķiedru daļiņas un notikusi ķīmiska destrukcija.

Jo vairāk sīkās frakcijas – īpaši smalkās daļiņas, kas mazākas par 0,5 mm – ir šķiedru siltumizolācijas materiāla paraugā, jo vairāk paaugstinās beramblīvums, pieaug materiāla sēšanās iespējamība vertikālajās sienās, kā arī pieaug siltumvadītspējas koeficients. Šķiedru beramās izolācijas materiāliem vēlams izvēlēties paraugu ar mazāku sīko frakciju saturu vai arī smalko frakciju nodalīt (nosijāt). Jāņem vērā, ka smalkās frakcijas atdalīšana rada papildu tehnoloģisko procesu un paaugstina izmaksas.

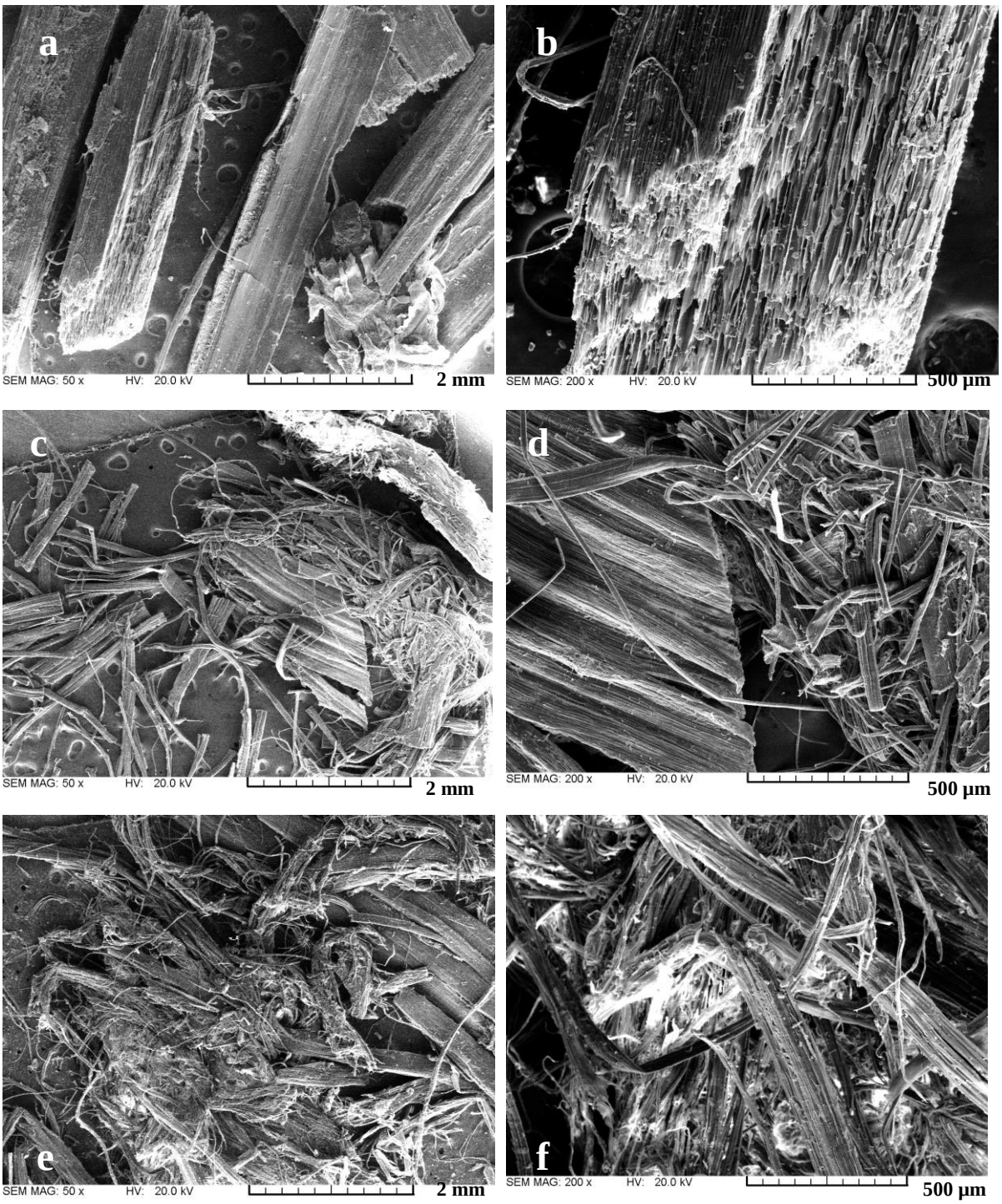


3.9. att. **Frakcionālais sastāvs neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem**

3.3.4. SEM

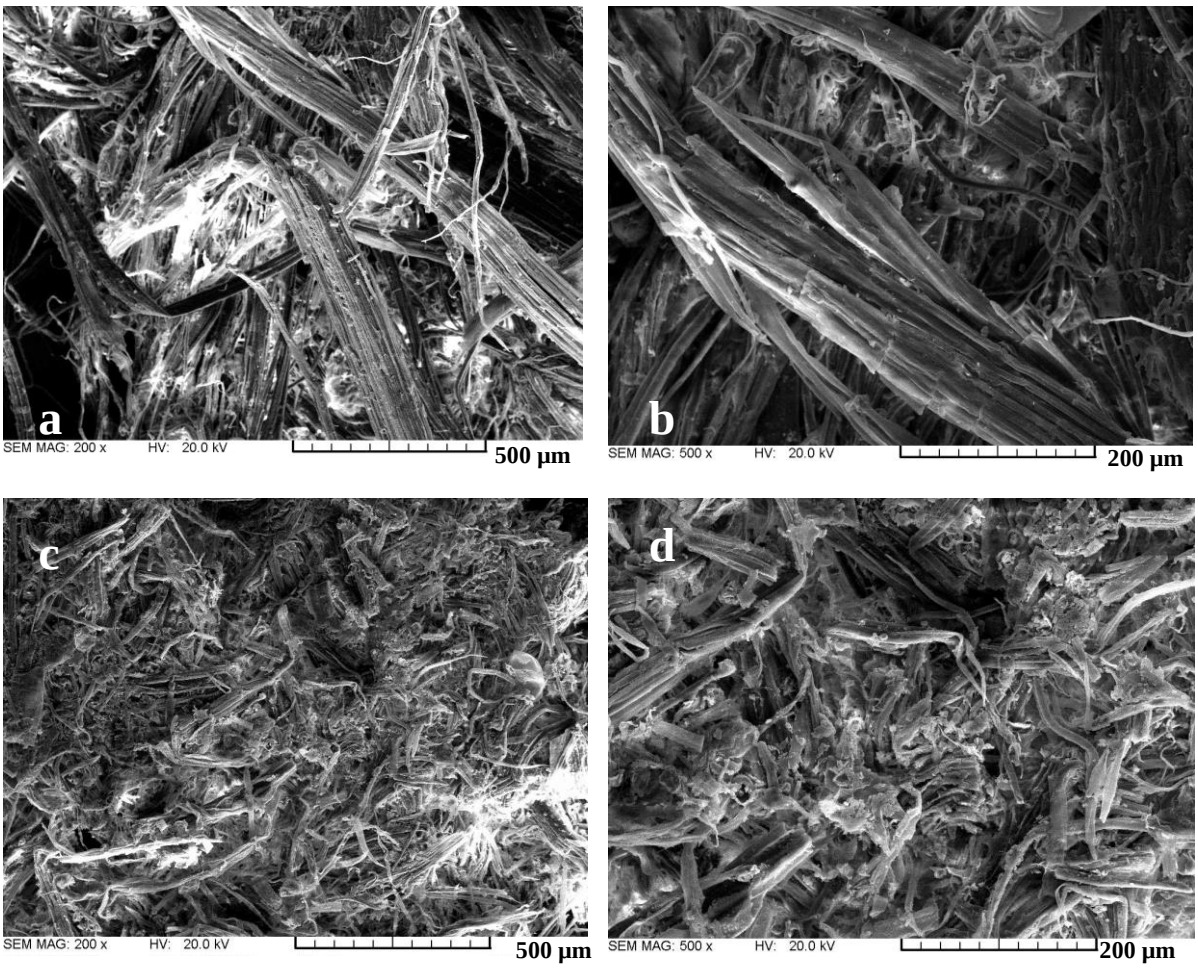
Kaņepju spaļu paraugus pētīja ar SEM pirms un pēc TS apstrādes, lai novērotu paraugu fizikālās izmaiņas izmēros un morfoloģiskās izmaiņas.

SEM attēli kaņepju spaļu paraugiem pirms apstrādes Ks-k (a un b) un pēc TS apstrādes tūlīt pēc temperatūras un spiediena pievades Ks-0 (c un d) un pēc 30 sekunžu apstrādes Ks-0,5 (e un f) divos dažādos palielinājumos apkopoti 3.10. attēlā. Kā redzams a un b attēlā, neapstrādāti kaņepju spaļi sastāv no apmēram 1–1,5 mm platiem un 5–7 mm gariem gabaliņiem, kas veidoti no paralēliem cieši sakļautiem šķiedru kūļiem. Pēc TS apstrādes (c, d, e un f) kaņepju spaļi ir sadalījušies sīkākos gabalos, šķiedru kūļos un atsevišķās šķiedrās. Novērojama paraugu sašķiedrošanās jeb fibrillēšanās. Kā redzams 3.10. attēlā (c un e), kaņepju spaļi TS apstrādes ietekmē sašķiedrojas nevienmērīgi, un paraugs sastāv no dažāda izmēra frakcijām – no dažiem μm līdz 1 mm platumā un apmēram 2–3 mm garumā. Palielinot TS barguma faktoru (e un f), sašķiedrošanās turpinās un tiek iegūts paraugs ar mazākām šķiedru frakcijām.



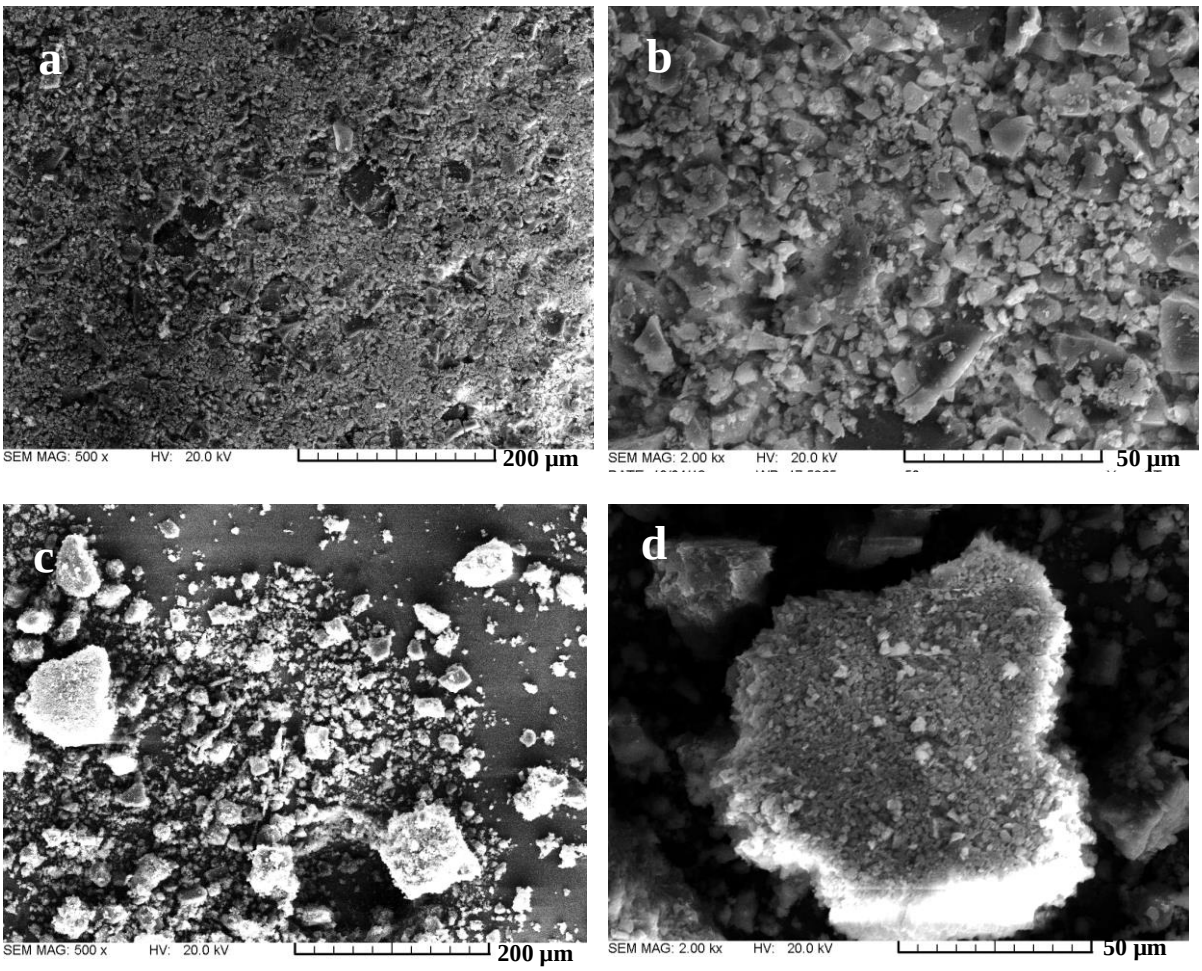
3.10. att. **Kaņepju spaļu SEM attēli pirms (KS-k – a un b) un pēc TS (KS-0 – c un d; Ks-0,5 – e un f) ar 50x palielinājumu (a; c; e) un 200x palielinājumu (b; d; f)**

SEM attēli pēc 30 sekunžu KS-0,5 (a un b) un 1 min KS-1 (c un d) TS apstrādes divos dažādos palielinājumos apkopoti 3.11. attēlā. Paraugiem, kas apstrādāti pie lielāka barguma faktora, izvēlēts lielāks SEM palielinājums, lai novērotu paraugu fibrillēšanos un no parauga izdalīto repolimerizēto vielu – pseidolignīna izgulsnēšanos uz paraugu virsmas.



3.11. att. **Kaņepju spaļu SEM attēli pēc 30 sekunžu (KS-0,5 – a un b) un 1 min (KS-1 – c un d) TS apstrādes 200x un 500x palielinājumā**

3.11. attēlā (a) redzama kaņepju spaļu sašķiedrošanās pēc 30 sekunžu TS apstrādes, veidojot tievākas šķiedras. Apskatot paraugu lielākā palielinājumā (b), redzama šķiedru fibrillēšanās – no garākām šķiedrām, kas sastāv no paralēliem šķiedru kūļiem, daļēji atrautas mikrošķiedras, tas nodrošina parauga uzirdināšanos. Uz šķiedru virsmas (b) novērojami mazi, kristāliski nosēdumi, kas, iespējams, skaidrojams ar pseidolignīna izdalīšanos uz parauga virsmas. Palielinot TS apstrādes laiku (c un d), sākas parauga destrukcija – turpinās sašķiedrošanās, smalkās fibrillas ir pilnībā atrautas no šķiedrām. Pārrauto ķīmisko saišu dēļ un ķīmiskās destrukcijas ietekmē šķiedras ir sarautas sīkākās daļās. Veidojas aglomerāti un uz parauga virsmas ir novērojami izgulsnējumi (d). Lai salīdzinātu un apstiprinātu uz paraugu virsmas izgulsnēto vielu izcelsmi (iespējamais pseido lignīns), veica lignīna izdalīšana no kaņepju spaļu paraugiem un uzņēma SEM attēlus (3.12. attēls).



3.12. att. **Kaņepju spaļu izdalītā lignīna SEM attēli pirms un pēc TS**

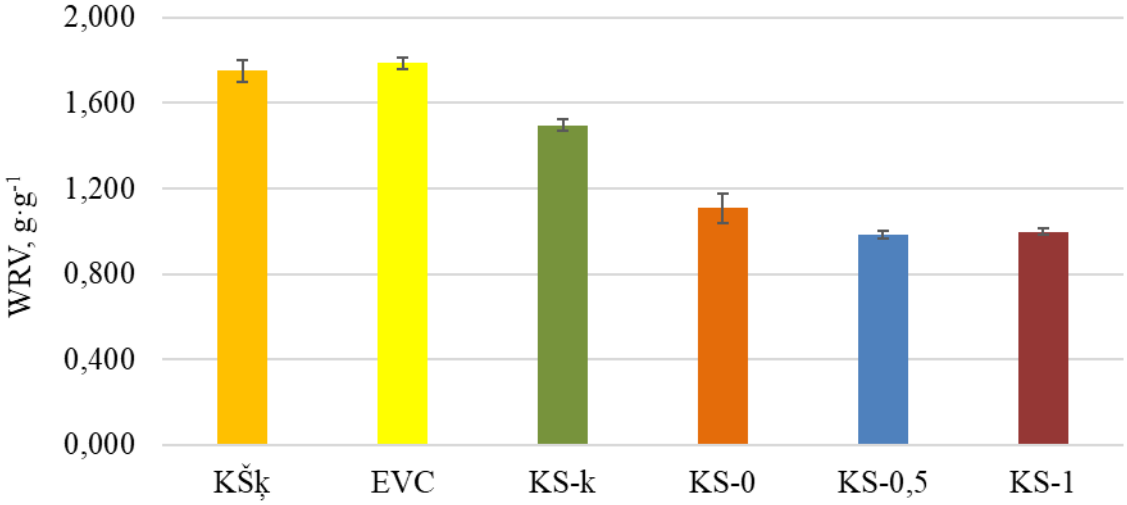
Kā redzams 3.12. attēlā, izdalīto kaņepju spaļu lignīna paraugi pirms (a un b) un pēc TS apstrādes (c un d) pēc struktūras neatšķiras, taču redzams, ka pēc TS apstrādes lignīna paraugi veido aglomerātus (c). 3.12. attēlā redzamie lignīna paraugi pēc struktūras un izmēra atbilst 3.11. attēlā uz šķiedru virsmas redzamajiem izdalītajiem savienojumiem.

3.3.5. Ūdens aizturēšanas spēja

WRV ir būtiska īpašība siltumizolācijas materiāliem. Svarīgi, lai siltumizolācijas materiālam ir zemāka WRV, kas norāda, ka materiāls ātrāk izžūs samitrināšanas (piemēram, ēkas applūšanas) gadījumā.

WRV rezultāti kaņepju spaļu paraugiem pirms un pēc TS redzami 3.13. attēlā un salīdzināti ar tirgū esošajiem beramās siltumizolācijas analogiem – kokšķiedrām un ekovati. Kokšķiedru un ekovates WRV ir lielāka, jo tās galvenokārt sastāv no celulozes. Celulozei ir spēja veidot ūdeņraža saites ar ūdens molekulām, kā rezultātā ir nodrošināta ūdens aizturēšana. Neapstrādātu kaņepju spaļu WRV ir mazāka nekā kokšķiedrām un ekovatei, jo tie ir mazu gabaliņu formā, un nav brīvi pieejamas celulozes šķiedras un šķiedru fibrillas. Kā redzams 3.13. attēlā, pieaugot barguma faktoram (TS apstrādes laikam), kaņepju spaļu paraugu WRV samazinās, lai arī TS apstrādē pie maza barguma faktora notiek paraugu fibrillācija, un WRV būtu jāpieaug. Tas skaidrojams ar hidrofīlo hemiceluložu satura samazināšanos, kā arī pseidolignīna veidošanos un izgulsnēšanos uz parauga virsmas (Stelte, 2013), kas novērotas SEM attēlos. Hidrofobais lignīns samazina ūdens absorbciju un attiecīgi arī WRV. Līdzīgi

rezultāti ir iegūti arī ar citiem lignocelulozes materiāliem (Tupciauskas et al., 2023b; Zhuang et al., 2020).



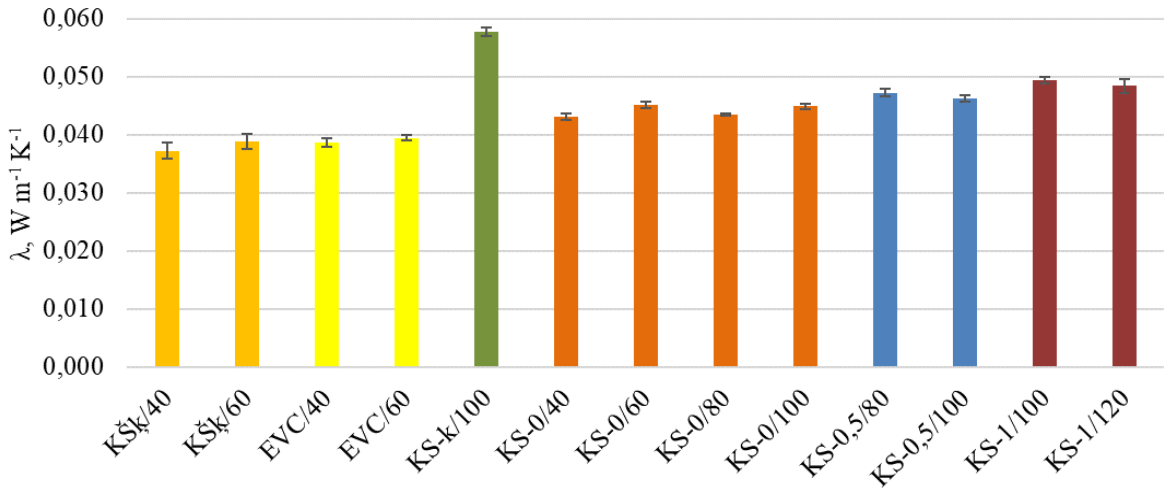
3.13. att. **WRV neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industriālajiem siltumizolācijas materiāliem**

3.3. apakšnodaļas kopsavilkums: KS-0 paraugam TS apstrādē beramblīvums samazinās vairāk kā 2 reizes, ir vismazākie masas zudumi un vismazāk pieaug smalkās frakcijas daudzums. Tie ir būtiski rādītāji, izvēloties siltumizolācijas materiālu no tehniski ekonomiskā viedokļa. Pie ilgākas TS apstrādes beramblīvums pieaug, kā arī palielinās masas zudumi un smalkās frakcijas daudzums, kas ir skaidrojams ar paraugu ķīmisko destrukciju, autohidrolīzi, depolimerizāciju un pāriešanu gaistošajos un ūdenī šķīstošajos savienojumos. KS-0 parauga gadījumā galvenokārt notiek parauga mehāniska "uzpūkošana", sašķiedrošana jeb fibrillēšanās. Tas nodrošina parauga beramblīvuma pieaugumu. Tas novērots arī SEM attēlos. Pie ilgākas TS apstrādes gan termoķīmisko reakciju ietekmē, gan mehāniskā procesā no parauga lielākajām šķiedrām tiek atrautas fibrillas un šķiedru fragmenti, pieaug sīkās frakcijas daudzums un palielinās beramblīvums. Lai arī pie TS apstrādes notiek fibrillācija un ir vairāk brīvi pieejamu hidroksilgrupu, šķiedru WRV samazinās. Tas skaidrojams ar hidrofobā pseidolignīna veidošanos un izdalīšanos uz šķiedru virsmas, tādejādi atgrūžot ūdeni. Analizējot fizikālo īpašību izmaiņas, var secināt, ka siltumizolācijas materiālam atbilstošākais ir paraugs TS-0.

3.4. Siltumvadītspēja

Siltumvadītspējas koeficients ir svarīgākā īpašība, ko parasti apskata, izvēloties siltumizolācijas materiālu. Siltumizolācijas materiāla siltumvadītspējas koeficients λ, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, tiek noteikts robežās no $0^{o}C$ līdz $+30^{o}C$, taču 3.14. att. tiek norādīts iegūto rezultātu kopsavilkums saskaņā ar standartu LVS ISO 8302:2001 (International Organisation of Standardization, 2001), pie $+10^{o}C$. Zināms, ka, pieaugot mērīšanas temperatūrai, arī siltumvadītspējas koeficients pieaug, tātad pasliktinās, paātrinot konvekciju un palielinot lamdu λ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Balstoties uz zināšanām par materiāla struktūru un īpašībām, pētījumā izvēlēti dažāda blīvuma viena apstrādes veida materiāli, meklējot optimālo blīvumu.

Salīdzinot kontroles parauga KS-k/100 siltumvadītspējas rezultātus ar TS ilgāk apstrādātajiem paraugiem, redzams (3.14. att.), ka TS apstrāde ir būtiski uzlabojusi (pazeminājusi) siltumvadītspējas koeficientu λ.



3.14. att. **Siltumvadītspēja neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industrālajiem siltumizolācijas materiāliem**

Lai izvērtētu, cik liels ir lamdas samazinājums, aprēķināts tās samazinājums pret kontroles paraugu un izteikts procentos. KS-0/40 – 25,4 %, KS-0/60 – 21,8%, KS-0/80 – 25,5%, KS-100 – 22,3%, kas arī skaidri parāda, ka apstrādes režīms pie nulles laika ir efektīvāks, salīdzinot pret 0,5 min vai 1 min cikliem, attiecīgi KS-0,5/80 – 18,1%, KS-0,5/100 – 19,9% un KS-1/100 – 4,4%.

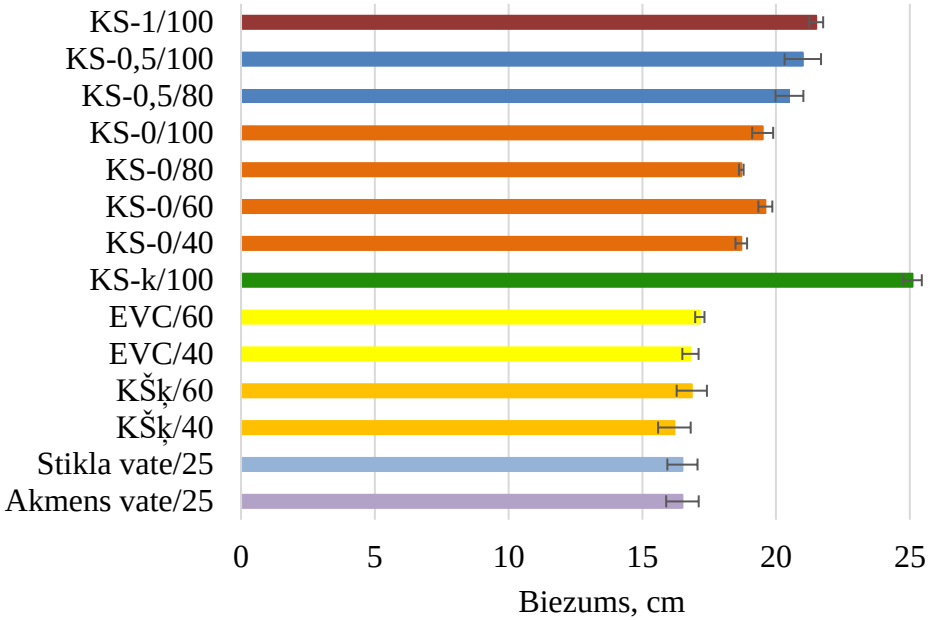
Redzams, ka optimālais materiāla blīvums meklējams starp KS-0 paraugiem ar siltumvadītspējas koeficientu 0,043 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, jo, palielinot apstrādes laiku līdz 0,5 min., piemēram, KS-0,5/80, būtiski pieaug siltumvadītspējas koeficients, sasniedzot 0,047 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Tas ir statistiski būtiski augstāks nekā paraugam KS-0/100, kuram rādītājs ir 0,045 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (p=0,046). Optimālais blīvums beramiem kaņepju spaļu siltumizolācijas materiāliem variē starp 40 un 80 $kg \cdot m^{-3}$, jo rezultāti šajās robežās ir ļoti līdzīgi – starp tiem nav statistiski būtiskas atšķirības (p=0,226 un p=0,135). Salīdzinot kaņepju spaļu materiālu KS-0/40 ar tirgū esošiem kokšķiedru vai ekovates siltumizolācijas materiāliem ar līdzīgu blīvumu, secināms, ka to siltumvadītspējas koeficienta atšķirības nepārsniedz 10%, tāpēc tos var uzskatīt par līdzīgiem materiāliem gan pēc īpašībam, gan pēc struktūras.

Ir vispārzināms, ka labākais izolators ir nekustīgs gaiss, taču tam ir jāatrodas miera stāvoklī. Gaisa daudzumam izolācijas materiālā ir būtiska nozīme. Ja materiālā ir pārāk lielas poras, pieaug gaisa daudzums un gaiss tajās sāk kustēties straujāk, pasliktinot siltumizolācijas īpašības. Katram materiālam ir optimālais blīvums, kad tam ir vismazākā siltumvadītspēja un lielākā siltumpretestība (Noviks, 2002). Brīvās gaisa poras tiešā veidā ietekmē materiāla blīvumu (Brzyski et al., 2017). Dabiskās izcelsmes šķiedru izolācijas materiālos gaiss ir ne tikai starpšķiedru telpā, bet arī pašas šķiedras lumenā, kur gaiss ir gandrīz nekustīgs. No dabiskās izcelsmes materiāliem vislabākie rādītāji ir tādiem anizotropiem materiāliem ar neviendabīgu struktūru kā koks, salmi, kaņepju spaļi.

Analizējot izstrādāto šķiedru materiālu paraugu siltumvadītspēju, labākos rādītājus uzrādīja KS-0 paraugi. Tas ir skaidrojams ar vislielāko šķiedru fibrillāciju un vienlaicīgi vismazāko parauga destrukciju, kas nodrošina parauga uzirdināšanos. Šķiedu fibrilēšanās ir redzama 3.1. attēlā (izstrādāto materiālu fotovizualizācija) un 3.10. attēlā (izstrādāto materiālu SEM attēli). Šī parādība shematiski attēlota 3.2. attēlā. Parauga uzirdināšanās nodrošina arī vismazāko beramblīvumu (3.8. attēls). Primāri šķiedru uzirdināšanās notiek pateicoties tam, ka šķiedras iekšienē tiek pārrautas ūdeņraža saites, daļēji atbrīvojot celulozes fibrillas. Tiek atvērti šķiedru kūļi un daļēji šķeltas saites starp celulozi, lignīnu un hemicelulozēm.

Pētījumā izstrādātie materiāli ir konvektīvie (Christiansen et al., 2022) porainas struktūras materiāli ar atvērtām porām, labi vada mitrumu un gaisu. Lai šādi materiāli funkcionētu pareizi un λ koeficients saglabātos nemainīgs, konstrukcijās tie ir jāiestrādā ar vēja

aizsargbarjerām, aizsargājot no mitruma iedarbības, kā arī no ūdens tvaiku iedarbības, kas nāk no telpas iekšpuses. Siltumvadītspēju tiešā veidā ietekmē materiāla mitruma saturs, blīvums un vides temperatūra.



3.15. att. **Ārsienu biezums, kuriem ir vienāda U=0,23 W·m^{-2}·K^{-1} , atbilstoši siltuma caurlaidības koeficienta vērtība** (LR Ministru kabinets, 2020b)

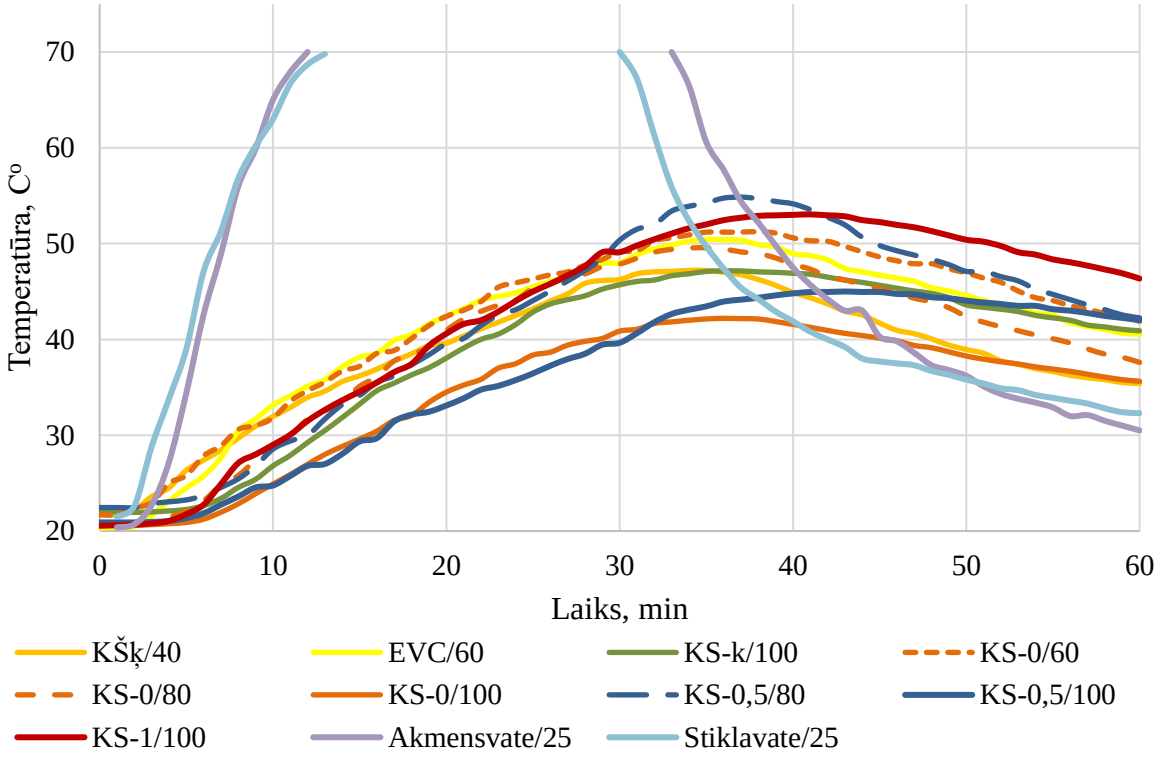
Lai varētu salīdzināt materiālus praktiskā pielietojuma aspektā, aprēķināja siltuma caurlaidības koeficienta vērtību atbilstīgi Latvijas būvnormatīva LBN 002-19 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika" prasībām (3.15. att.). Būvnormatīvs nosaka, ka ēkas siltuma caurlaidības koeficienta U maksimālā vērtība, izbūvējot sienas dzīvojamajām ēkām, pansionātiem, slimnīcām un bērnudārziem, nedrīkst pārsniegt 0,23 W·m^{-2}·K^{-1}. Lai atbilstu noteiktajām prasībām, KS-k/100 sienas biezumam būtu jābūt 25,1 cm, KS-0/60 sienas biezumam 19,6 cm un KS-0/40 sienas biezumam 18,7cm. Tātad siena no KS-0/60 materiāla varētu būt par 5,5 cm, bet KS-0/40 materiāla siena par 6,4 cm plānāka nekā KS-k/100. Izmantojot līdzīgus tirgū esošos materiālus, piemēram, ekovati EVC/40, paredzamais sienas biezums būtu 16,8 cm, kas ir par 1,9 cm mazāk kā KS-0/40 paraugiem.

3.4. apakšnodaļas kopsavilkums: TS apstrādes KS-0 režīms statistiski būtiski (p=0,0001 un p=0,0002) samazina (uzlabo) siltumvadītspējas koeficientu, salīdzinot ar kontroles parauga KS-k/100 koeficientu 0,058 W·m^{-1}·K^{-1}. Samazinājums robežās ir no 21,8% līdz 25,5%, atkarībā no blīvuma. Piemērotākais siltumizolācijas materiāls, analizējot TS apstrādes laiku, ir KS-0 ar blīvumu 40-80 kg·m^{-3}, jo konkrētajā blīvuma intervālā siltumvadītspējas vērtība nav statistiski būtiski atšķirīga. Parauga iestrādes blīvums jāizvēlas atbilstoši konstrukcijaas veidam, iestrādes iespējām, un ņemot vērā paredzamo parauga sasēšanos. Materiāls ir līdzvērtīgs citiem dabiskās izcelsmes šķiedru siltumizolācijas materiāliem.

3.5. Siltuma inerce

Materiālu siltuminerces atkarība no materiāla veida redzama 3.16. att. Izmantojot autora izstrādāto siltuminerces simulācijas iekārtu, iegūts grafiks, kurā attēlota siltuma difūzija noteiktā laika periodā.

Akmens vates un stikla vates paraugiem caursilšana notika 12–13 min laikā, t.i. materiāla otrā pusē novietotais temperatūras mērītājs sasniedza 70°C 12–13 min laikā. Minētā temperatūra 70°C ir konkrētās iekārtas mērierīču maksimums. Pēc starojuma izslēgšanas akmens un stikla vates materiāli turpināja siltuma pārnesi vēl vidēji 20 un 19 min, līdz atkal atdzisa līdz 70°C temperatūrai. Pēc tam temperatūra diezgan strauji (mērījuma 30.–60. min) pazeminājās no 70°C līdz 31°C un 32°C grādiem. Termiskās difūzijas aprēķins parāda (3.6. tabula), ka akmens un stikla vates materiāli caursilst 3,5 reizes ātrāk nekā, piemēram, KS-0/60, 4,8 reizes ātrāk nekā KS-0/80, 6,2 reizes ātrāk nekā KS-0/100, 4,1 reizi ātrāk nekā KS-K/100 un 2,2 reizes ātrā nekā KŠķ/40.



3.16. att. **Siltuminerce neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industrālajiem siltumizolācijas materiāliem**

Rezultāti parāda dabiskās izcelsmes materiālu būtisku priekšrocību salīdzinot ar akmens vates un minerālvates izolācijas materiāliem. Tas skaidrojams ar atšķirīgām materiāla īpašībām un struktūru. Dabiski materiāli sastāv no starpšūnu telpas, šūnu dobumiem jeb lumena, kas pildīts ar gaisu un ūdeni, bet akmens vates un minerālvates izolācijas materiāliem šķiedra ir kā monolīts pavediens.

No bioloģiskajiem izejmateriāliem gatavotu materiālu mērījumos maksimālā 70 °C temperatūra otrā materiāla pusē eksperimenta laikā netika sasniegta. Lai panāktu lēnāku termisko difūziju, ir būtiski palielināt tieši materiāla blīvumu. Materiāla blīvuma tieša ietekme uz siltuma inerci novērota, veicot mērījumus arī autora konstruētajā iekārtā. Kaņepju spaļu materiāliem saules starojuma simulatorā ir novērota būtiska TS režīmu ietekme uz siltuminerci. Piemēram, KS-1/100, kas TS apstrādē ir sagrauts visvairāk, ir ar augstāku siltuminerci nekā

tāda paša blīvuma materiāli, kas apstrādāti īsāku laiku, piemēram, KS-0/100 un KS-0,5/100, kam, savstarpēji salīdzinot, siltuminerce nav būtiski atšķirīga. Parauga KS-k/100 siltuminerces līkne, kas ir kā bāzes līnija neapstrādātam kaņepju spaļu materiālam, atrodas aptuveni pa vidu starp KS-0/100, KS-0,5/100 un KS-1/100. TS apstrāde statistiski būtiski samazina siltuminerci paraugam KS-0/100 pret kontroles paraugu (p=0,004). Tālāka TS apstrāde nelabvēlīgi ietekmē siltuminerces vērtības, jo paraugam KS-0,5/100 vairs nav statistiski būtiskas atšķirības salīdzinot ar kontroles paraugu KS-k/100 (p=0,13), un palielinot TS apstrādes laiku, parauga KS-1/100 siltuminerces vērtības ir statistiski būtiski augstākas (t.i. sliktākas) nekā kontroles paraugam KS-k/100 (p=0,33).

Koksne, kaņepju spaļi, celuloze, kokšķiedras ir dabiskas izcelsmes anizotropi materiāli. Anizotropija ietekmē materiāla fizikāli mehāniskās īpašības, šajā gadījumā arī siltumpretestību, jo tā ir atšķirīga dažādos virzienos, salīdzinājumā ar neorganiskās izcelsmes akmens vati vai stikla vati. Dabisko materiālu anizotropija ietekmē siltumietilpību un siltuma difūziju (3.6. tabulas rezultāti), kas ir dabisko materiālu priekšrocība, salīdzinot ar citiem materiāliem. Taču siltumietilpību dabas materiāliem var būtiski ietekmēt mitrums un mērīšanas vides temperatūra, jo, piemēram, pieaugot mitrumam, pieaug arī siltumietilpība (Radmanović et al., 2017). Ūdens siltumietilpība ir pat trīs reizes lielāka nekā dabiskajām šķiedrām – koksnes šķiedrām un kaņepju spaļiem (3.6. tabula).

3.6. tabula

Izstrādāto siltumizolācijas materiālu siltumietilpība un termiskā difūzija, salīdzinot ar tirgū esošajiem materiāliem

N.P.K.	Materiāls	C_p (10-20 °C), $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Termiskā difūzija, $\alpha \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot 10^{-1}$
1	Ūdens	4176	1,4
2	KS-k/100	1600	3,6
3	KS-0/60	1700	4,2
4	KS-0/80	1800	3,1
5	KS-0/100	1810	2,4
6	KŠķ/40	1400	6,6
7	Akmens vate/25	1030	14,8
8	Stikla vate/25	1030	14,8

Pētījumā izstrādātajiem kaņepju spaļu šķiedru materiāliem normālos ekspluatācijas apstākļos teorētiski aprēķinātā darbības laika aizture ir aptuveni 8–9 stundas (Nováková, 2018), kokšķiedrām vai celulozes izolācijai – 10 stundas, līdz siltums sasniegtu telpas iekšpusi (Gutex, 2024). Pie āra gaisa temperatūras svārstībām vairāk nekā 20 grādi, izmantojot izstrādāto kaņepju spaļu materiālu, līdzīgi kā kokšķiedrā,, telpas temperatūra visa gada laikā mainītos aptuveni 3°C robežās (Gutex, 2024). Lai katrs konstrukcijas materiāls darbotos pareizi, ir būtiski lietot konstruktīvi pareizus risinājumu un palīgmateriālus – tvaika barjeru, pretvēja apdari utt. Masīvāka sienas konstrukcija ir ekonomiski pamatota, salīdzinot ar vieglas konstrukcijas ēkas sienām, un ilgtermiņā atmaksājas. Uzlabojot telpas mikroklimatu, var ietaupīt dzesēšanas vai apkures izmaksas līdz pat 2,5 reizēm (Gaujēna, 2013).

Galvenie faktori, kas ietekmē ēkas sienas siltuma stabilitāti, ir ārējie faktori (saules starojums, temperatūra, vējš) un iekšējie faktori (iekštelpu gaisa temperatūra un pievadītais siltums). Viens no norobežojošo konstrukciju būtiskākajiem siltumtehniskajiem rādītājiem ir siltuma inerce (Borodiņecs & Gaujēna, 2012), savukārt, viens no ēku projektēšanas mērķiem ir panākt optimālu iekštelpu komforta līmeni un optimālu enerģijas patēriņu, sildot ēku ziemā un

dzesējot vasarā. Lai to panāktu, jāizvērtē ēkas projekts, sienas konstrukcijas, klimatiskie apstākļi un ēkas novietojums pret debespusēm. Siltuma plūsma sienas konstrukcijā var mainīties atkarībā no tā, no kuras puses ir siltuma avots, tādēļ būtiski izvērtēt siltuma inerces ietekmi. Būtiski siltuma inerci izvērtēt, optimizējot vai uzlabojot ēkas enerģijas patēriņu. Ieteicams palielināt sienas termālo masu, kas var absorbēt siltumu un tad, pēc nepieciešamības, atdot atpakaļ, šādā veidā panākot iespējami mazas temperatūras svārstības telpā. Materiāls darbojas kā termoregulators.

Ja ēku sienas konstrukcijas parasti ir diezgan masīvas un siltuminerce ir relatīvi maza, tad jumta stāvu un mansardstāvu apdzīvotajām ēkām materiālu siltuma inerces īpašību izvērtēšanai jānotiek daudz atbildīgāk. Vasaras mēnešos jumts darbojas kā liels saules panelis, kas absorbē siltumu, radot telpā krasas temperatūras svarstības. Pētījumā iegūtie siltuminerces rezultāti uzrāda, ka izstrādātie kaņepju spaļu siltumizolācijas materiāli veiksmīgi ir lietojami jumta un horizontālajās konstrukcijās, tādejādi nodrošinot optimālus siltuminerces rādītājus. Optimāli siltuminerces rādītāji palīdz stabilizēt telpas dzesēšanas un sildīšanas ierīču darbību, izvairīties no telpas siltuma un aukstuma krasām svārstībām un ļauj visu gadu saglabāt stabilu mikroklimatu.

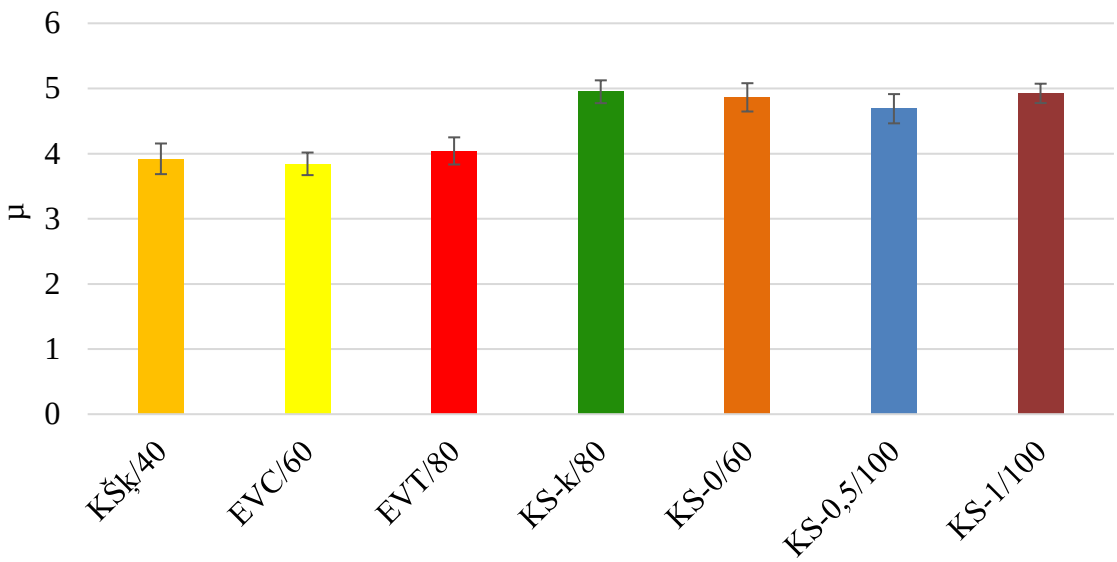
3.5. apakšnodaļas kopsavilkums: Materiāli ar līdzīgu blīvumu un siltumietilpības rādītāju C_p uzrāda līdzīgus siltuminerces rādītājus. Paaugstinot materiāla blīvumu, iespējams samazināt siltuma inerci. Dabiskās izcelsmes materiāliem ir būtiski lēnāka siltuma pārvade, ko uzrāda arī saules starojuma iedarbības simulators. Termiskās difūzijas koeficients izstrādātajam materiālam ir 2,4 – 4,2 $m^2 \cdot h^{-1} \cdot 10^{-1}$, salīdzinot ar organiskās izcelsmes siltumizolācijas materiāliem 14,8 $m^2 \cdot h^{-1} \cdot 10^{-1}$. TS apstrāde ar maksimāli īsu termoķīmisko fāzi paaugstina materiāla siltumietilpību un palēnina siltuma inerci.

3.6. Ūdens tvaika pārvade

Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienti kaņepju spaļu materiāliem salīdzinājumā ar ekovati un kokšķiedrām 3.17. attēlā.

Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients visiem pētītajiem materiāliem ir zems, kas liecina par siltumizolācijas materiāla spēju ātri izvadīt ūdens tvaikus. Pieaugot TS apstrādes barguma faktoram, ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vērtība sākotnēji samazinās (KS-0,5) un pēc tam pieaug (KS-3), tomēr TS apstrādes ietekme uz kaņepju spaļu siltumizolācijas materiālu ūdens tvaika caurlaidību nebija statistiski būtiska (attiecīgi p=0,78, p=0,62, p=0,64). Kaņepju spaļu siltumizolācijas materiāla ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients nedaudz pārsniedz kokšķiedru un ekovates tvaika difūzijas pretestības koeficienta vērtību. KS-0/60 un KS-0,5/100 paraugu un ekovates EVT/80 parauga vērtību atšķirība nav statistiski būtiska (attiecīgi p=0,051 un p=0,12).

Visiem analizētajiem materiāliem ir labas higroskopiskas īpašības, kas ir vēlama īpašība ēku interjerā izmantotajiem materiāliem, padarot tos piemērotus iekštelpu gaisa, it īpaši tā mitruma regulēšanai. Ja materiālu iekšpusē ir augsts mitrums, kas veidojas kā kondensāta rasas punkts temperatūras starpības dēļ, tad augstā ūdens tvaika caurlaidība (mazas μ vērtības) ļauj ātri izžūt. Ūdens tvaika pretestības koeficienti ir salīdzināmi ar industriāli lietojamo izolāciju, piemēram, stikla vati (2,4), kokšķiedras (3,6) un siltumizolāciju uz dabīgo šķiedru bāzes (2,1–4,0). Būtiski ir izvērtēt ūdens tvaika caurlaidības īpašības kopā ar WRV (3.4. nodaļa), īpaši hidrofilos dabisko šķiedru materiālos. Ūdens tvaika pārvade/ūdens tvaika pretestība kopā ar WRV ir divi higrotermiskie siltumizolācijas parametri, kas raksturo siltumizolācijas materiālu darbības procesus dažādos mitruma un temperatūras apstākļos.



3.17. att. **Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industrālajiem siltumizolācijas materiāliem**

Ūdens tvaika caurlaidība jeb ūdens tvaika difūzijas pretestība ir tikpat būtisks siltumizolācijas materiālu rādītājs kā siltumvadītspēja, ugunsdrošība un akustika (aizsardzība pret trokšņiem), jo šis rādītājs būtiski ietekmē materiāla lietojamības drošību, nekaitīgumu un higiēnu. Ūdens tvaika caurlaidība, iespējams, ir visvairāk ignorētā un vismazāk izprastā siltumizolācijas materiālu īpašība. Ūdens tvaika caurlaidība ir kritiska aukstā klimatā, kur difūzijas virziens ir no iekšpuses uz āru. Daudzu produktu ūdens tvaika caurlaidībai ir tendence palielināties, palielinoties gaisa relatīvajam mitrumam. Šādā situācijā sienu apšuvuma caurlaidības palielināšana nodrošina papildu drošības rezervi, piemēram, izmantojot tvaika difūzijas membrānas vai nodrošinot ventilējamas fasādes. Šī parādība konstatēta arī pētījumos par koksnes un papīra materiāliem (Cosentino et al., 2023; Ducoulombier & Lafhaj, 2017; Piatkiewicz et al., 2020). Salīdzinājumā ar parastajiem siltumizolācijas materiāliem uz minerālu un naftas ķīmijas bāzes, piemēram, akmens vati, stikla šķiedru un putupolistirola izolāciju, informācija par no dabīgiem materiāliem veidotu šķiedru materiālu izolācijas higroskopiskajām un termiskajām īpašībām ir ierobežotā daudzumā, lai gan šie siltumizolācijas materiāli ir lietoti jau vēsturiski. Ja ir zināmas izolācijas galvenās higroskopiskās un termiskās īpašības, datus pēc tam var novērtēt atsevišķi vai izmantot skaitliskās simulācijas programmatūrās, lai pētītu materiālu higrotermiskobs rādītājus ēkas norobežojošās daļās noteiktos higrotermiskos robežapstākļos (Latif et al., 2014). Tā, piemēram, var noteikt, vai sienas konstrukcijā ir nepieciešama tvaika barjera vai arī to, cik ilgs laiks būs nepieciešams, lai izžūtu siltumizolācijas materiāls, ja ir notikusi ūdens noplūde.

Visu pētījumā izstrādāto izolācijas materiālu higrotermiskā veiktspēja ir būtiski atkarīga no ēkas sastāvdaļu montāžas un robežnosacījumiem. Izolatoru higroskopiskais raksturs kopā ar labi izstrādātu iekštelpu klimata kontroles sistēmu var uzlabot ēkas energoefektivitāti līdz pat 5% apkurei un līdz 30% dzesēšanai (Fedorik et al., 2021).

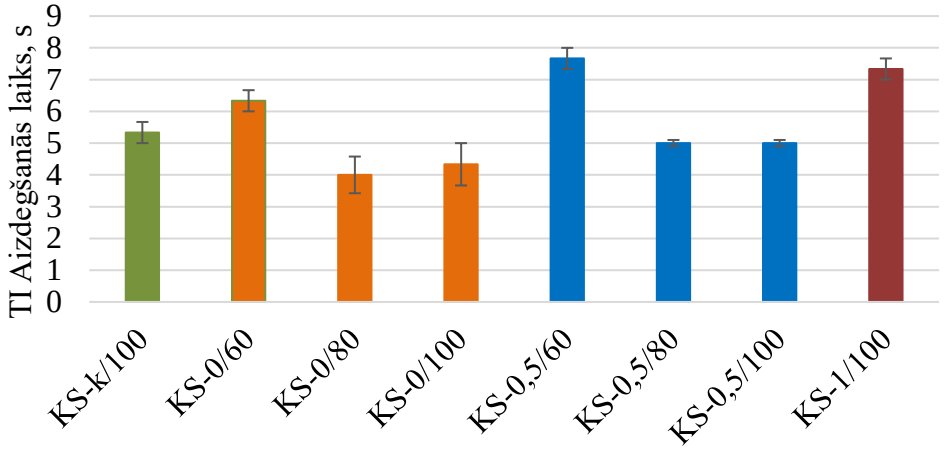
3.6. apakšnodaļas kopsavilkums: Visiem izstrādātajiem paraugiem ir labas higroskopiskās īpašības un ūdens tvaika difūzijas koeficienta μ vērtība statistiski būtiski neatšķiras no kontroles parauga (attiecīgi p=0,78; p=0,43; p=0,91). Izstrādāto materiālu μ ir salīdzināms ar industriālajiem siltumizolācijas materiāliem. Izvēloties siltumizolācijas materiālu, būtiski ir izvērtēt visas ēkas konstrukciju, kas kopā ar labu iekštelpu klimata kontroli var būtiski uzlabot ēkas energoefektivitāti.

3.7. Ugunsreakcijas pārbaude ar Koniskā kalorimetra metodi

Koniskā kalorimetra metode ir visplašāk pielietotā ugunsreakcijas metode pasaulē, jo ir nepieciešams neliels paraugs, metode ir vienkārša, paraugi ir savstarpēji salīdzināmi. Iekārta ir lieliski piemērota degšanas modeļu izstrādei, kā arī, lai priekšeksperimentos izvērtētu, kurš paraugs ir labākais ar mērķi virzīt tos uz vienas liesmas testu vai citu ugunsreakcijas pārbaudi produkta tālākajai attīstībai. Galvenie parametri, kas raksturo materiāla virsmu degšanas raksturu, ir aizdegšanās laiks (TI) un izdalītais kopējais siltuma daudzums, kas visskaidrāk parāda materiāla degšanas raksturu un to, kā tas ietekmē kopējo ugunsgrēka attīstību (THR), kā arī maksimālā degšanas jauda (HRR_{max}).

Autora nolūks bija konstatēt degšanas faktu un izveidot pārskatu par izstrādātā kaņepju spaļu materiāla degšanas attīstību, analizējot maksimālo degšanas jaudu HRR_{max}, siltuma izdalīšanos THR un aizdegšanās laiku TI un tos salīdzināt ar jau praksē lietojamiem beramajiem izolācijas materiāliem. Lai gan visiem materiāliem ar TS apstrādi materiālu sastāvs ir līdzīgs, novērtēšana ietvēra katra materiāla ķīmisko īpašību un atšķirību atrašanu un analīzi. Visu materiālu salīdzināšanai izveidotas kopīgas diagrammas (3.21.–3.26.).

Aplūkojot kaņepju spaļu materiālu izmērītos aizdegšanās laikus (3.18. attēls), redzams, ka, palielinot TS apstrādes laiku, aizdegšanās laiks statistiski būtiski nepieaug (p=0,25 un p=0,37), izņemot paraugam KS-1/100, kuram statistiski būtiski palielinājies aizdegšanās laiks (p=0,013).

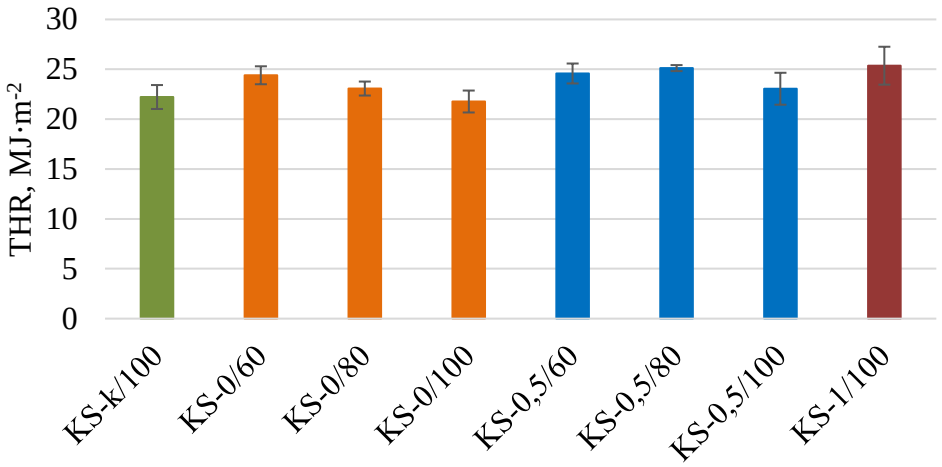


3.18. att. **TI Aizdegšanās laiks neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem pie dažādiem blīvumiem**

Tas skaidrojams ar parauga būtiskām ķīmiskām izmaiņām – hemiceluložu un arī daļēja lignīna destrukciju. Palielinot parauga blīvumu no 60 uz 80 vai 100 $kg \cdot m^{-3}$, statistiski būtiski samazinās aizdegšanās laiks (p=0,024 un p=0,0013). Nav vērojama statistiski būtiska atšķirība starp paraugiem ar blīvumu 80 un 100 $kg \cdot m^{-3}$ (p=0,72). Lai gan ir aizdegšanās laika atšķirības, tomēr visi šie materiāli uzliesmo tiešas liesmas vai augstas temperatūras iedarbībā, un maza iespēja, ka tie izturēs tiešās liesmas testu (SBI vienotā dedzināšanas ierīce, ar standartu LVS EN 13823:2022 (Eiropas standartizācijas komiteja, 2022)). Vairākos pētījumos teikts, ka šis ir viens no svarīgākajiem ugunsreakcijas rādītājiem, jo katram materiālam ir sava pašaizdegšanās temperatūra, notiekot straujam oksidēšanās procesam, kas var notikt bez dzirksteles vai liesmas (Hart & Summerscales, 2017). Petījumā (Hart & Summerscales, 2017) parādīts, ka dabiskām šķiedrām, atrodoties 180°C pat 15–120 min, vispirms notiek krāsas izmaiņas, tad degradācija un aizdegšanās. Lielākā daļa dabisko šķiedru termiski sadalās par 60% jau pie 215–310°C ar aktivācijas enerģiju 160–170 $kJ \cdot mol^{-1}$ vai 0,16 $MJ \cdot g^{-1}$. Promocijas darba ietvaros izstrādātā beramā materiāla ātrā uzliesmošana ir izskaidrojama ar tā struktūru – tas satur putekļus un

daudz sīku daļiņu (3.3.3. apakšnodaļa, Frakcionālais sastāvs). Pētījumā, kur tiek analizēta sīku putekļu minimālā pašaizdegšanās temperatūra tekstilrūpniecībā, papīra ražotnēs un kokapstrādes ražotnēs, ir konstatēts paaugstinātas bīstamības risks tieši putekļainu atlikumu dēļ tieksmi pašaizdegties un radīt ugunsgrēku bīstamību (Yuan et al., 2023). Putekļu daļinas ar izmēru zem D50 (0,05 mm) ir kritisks sprādzienu ietekmējošs faktors, turklāt, samazinoties to diametram vēl vairāk, būtiski palielinās uzliesmošanas iespējamība un seku nopietnība.

Apskatot kaņepju spaļu materiāla blīvuma ietekmi uz THR, sakarību var aplūkot 3.19. att. – pieaugot blīvumam, samazinās kopējā izdalītā siltuma jauda. Jo mazāks blīvums, jo vairāk skābekļa vai gaisa ir iekļauts materiālā, līdz ar to tā ietekmē tiek veicināta degšana un pieaug kopējais siltuma izdalīšanās daudzums. Lai arī sakarība ir vērojama, tā nav statistiski būtiska (p=0,08–0,80). TS apstrādātajiem paraugiem pie vienāda blīvuma kopējā izdalītā siltuma jauda ir ļoti līdzīga un statistiski būtiska atšķirība nav vērojama (p=0,15–0,43), izņemot paraugam KS-1/100, kam termiskā un ķīmiskā ietekme ir bijusi vislielākā (p=0,011).



3.19. att. **Kopējā siltuma izdalīšanās (THR) uz laukuma vienību 300 sekundēs neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem**

Attiecīgi pret kontroles paraugu THR pieaug KS-0/60 par 9,8%, KS-0,5/60 par 10,6% un KS-0/80 par 3,8%, bet KS-0,5/80 par 13,1%. Līdzīgi THR rezultāti ir iegūti pētījumā, kur analizēta kaņepju, salmu, kokšķiedru izolācijas ugunsreakcijas īpašības, pielietojot konisko kalorimetru pie mazākas apstarošanas jaudas, kas bija 35 kW·m^{-2} (Horváthová & Osvaldová, 2013). Teorētiski šādus rezultātus ir grūti salīdzināt, jo tiek izmantotas divas dažādas siltuma jaudas, taču praktiski neiespējami atrast salīdzināmus datus, jo šāda veida pētījumu ir maz.

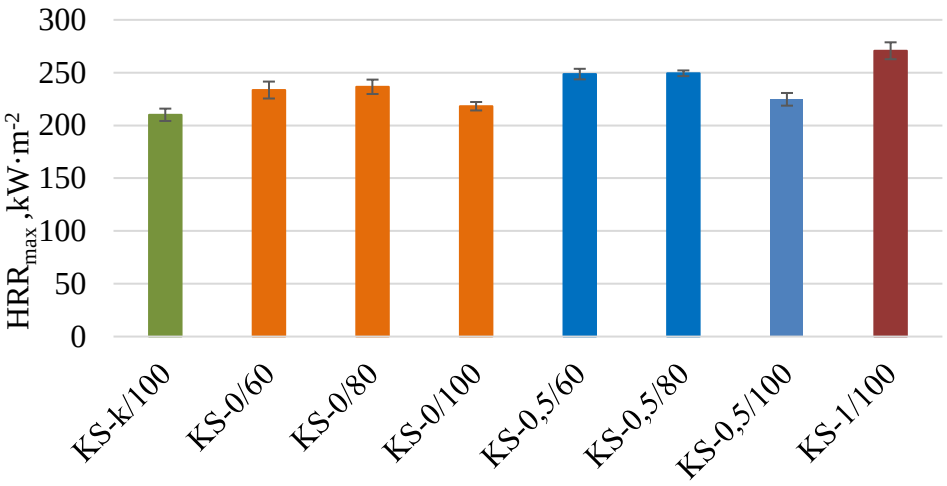
Lai analizētu degšanas laikā izdalīto enerģijas daudzumu, degšanas dinamiku raksturo maksimālās degšanas jauda HRR (skat. 3.20. att.).

Saskaņā ar degšanas teoriju vispārzināms degšanas jaudu ietekmējošs faktors ir materiāla blīvums un mitrums. Blīvāki un mitrāki materiāli grūtāk deg. Aplūkojot neapstrādātos un ar TS apstrādātos kaņepju spaļu materiālus, paraugu degšanas jaudas atkarība no blīvuma nav lineāra, bet sakarība ir vērojama, kaut arī statistiski nav būtiska (p=0,2–0,79).

Salīdzinot ar kontroles paraugu, degšanas jauda pieaug: KS-0/60 par 11,2%, KS-0/80 par 12,6%, KS-0/100 par 3,9%, KS-0,5/60 par 18,4%, KS-0,5/80 par 18,7%, KS-0,5/100 par 7% un KS-1/100 par 28,9%.

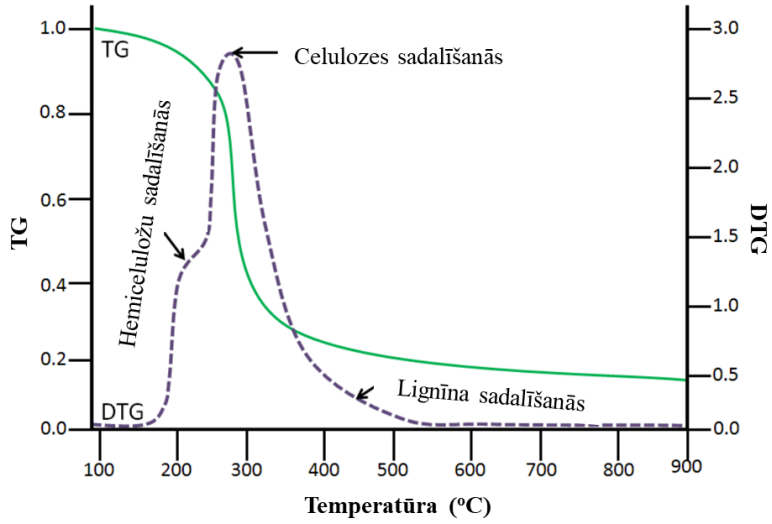
Promocijas darba autors novēroja, ka ietekmi uz rezultātiem rada arī materiāla iestrādes vienmērīgums koniskā kalorimetra ietvarā, dažos gadījumos vienmērīga iestrāde bija problemātiska. Mazais iesvara daudzums, kas variēja no 21 gramiem līdz 50 gramiem, atkarībā no vēlamā blīvuma ir tuvu iekārtas mērījuma minimālajai robežai, kas varēja radīt neprecizitātes. Pētījumos novērots, ka dabiskās izcelsmes šķiedrām uzliesmojamību daļēji nosaka ķīmiskais sastāvs – lielāks celulozes saturs nodrošina augstāku uzliesmojamību

(Dittenber & Gangarao, 2012), savukārt lielāks lignīna saturs rada lielāku pārogļošanos (Putu et al., 2011). Ar ķīmiskā satura izmaiņām var skaidrot ugunsreakcijas rezultātu atšķirības starp KS, KS-0, KS-0,5, KS-1 paraugiem. Pieaugot apstrādes režīma barguma faktoram, izmainās kaņepju spaļu ķīmiskajā sastāvā esošo pamatkomponentu attiecība (Skatīt 3.2. un 3.3. tabulu. Ķīmiskais sastāvs).



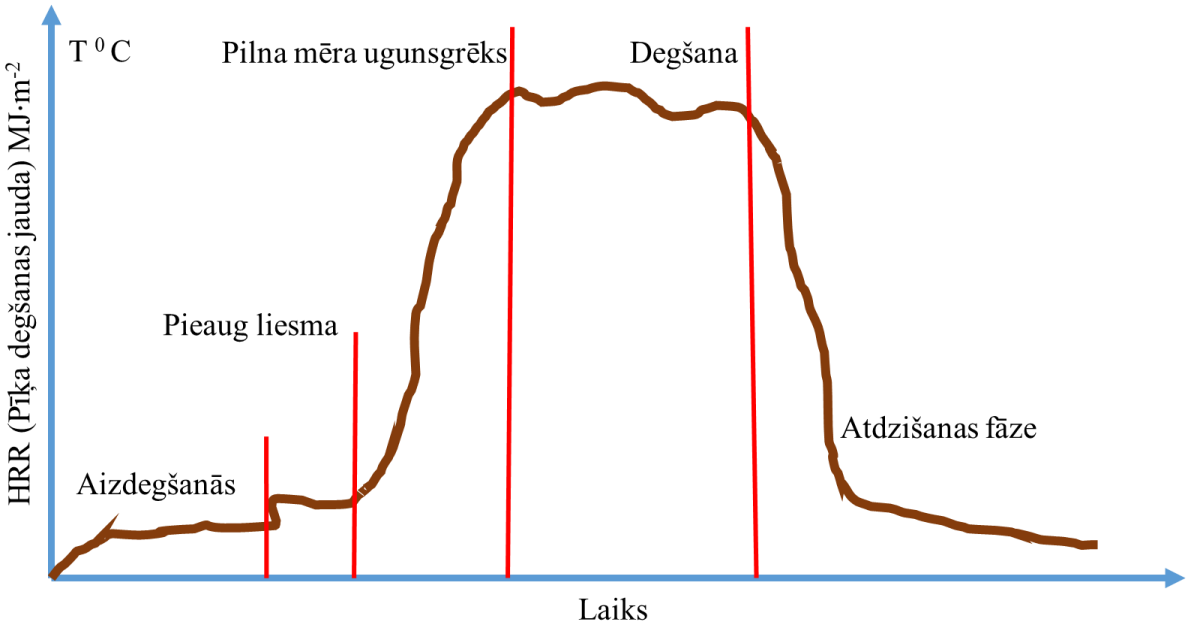
3.20. att. **Maksimālā degšanas jauda (HRR_{max}) uz laukuma vienību neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem**

Paraugiem, kas ir apstrādāti ar TS, uz šķiedru virsmas konstatēti lignīna izgulsnējumi. Turklāt, jo vairāk sagrauta ir kaņepju spaļu koksnes struktūra, jo vairāk lignīna izdalās uz virsmas. Ja aplūko ugunsreakciju no materiāla ķīmiskā viedokļa, koksne pie degšanas jāiedala trīs koksnes pamatsastāvdaļās – celuloze, hemicelulozes un lignīns (3.21. att.) (Azwa et al., 2013). Pie 50–100°C iztvaiko ūdens; pie 200–300°C temperatūras no dabiskām šķiedrām pirmās pirolīzes procesā noārdās hemicelulozes, jo tās ir visnestabilākās; ap 350°C notiek celulozes destrukcija, bet lignīns sadalās plašā temperatūras diapazonā no 200° līdz 600°C (Idumah, C.I., Hassan, 2016). Kā redzams pētījumā, kur tiek dedzināti dažādi pārtikas graudi, maksimālo siltuma izdalīšanos līdz pat 600 $MJ \cdot m^{-2}$ sasniedz produkti, kuru sastāvos ir eļļas, pektīni un vaski, kas ir arī kaņepju spaļos (Oguaka et al., 2023), līdz ar to izdalītais siltums ir lielāks vairāk apstrādātiem materiāliem (KS-1).



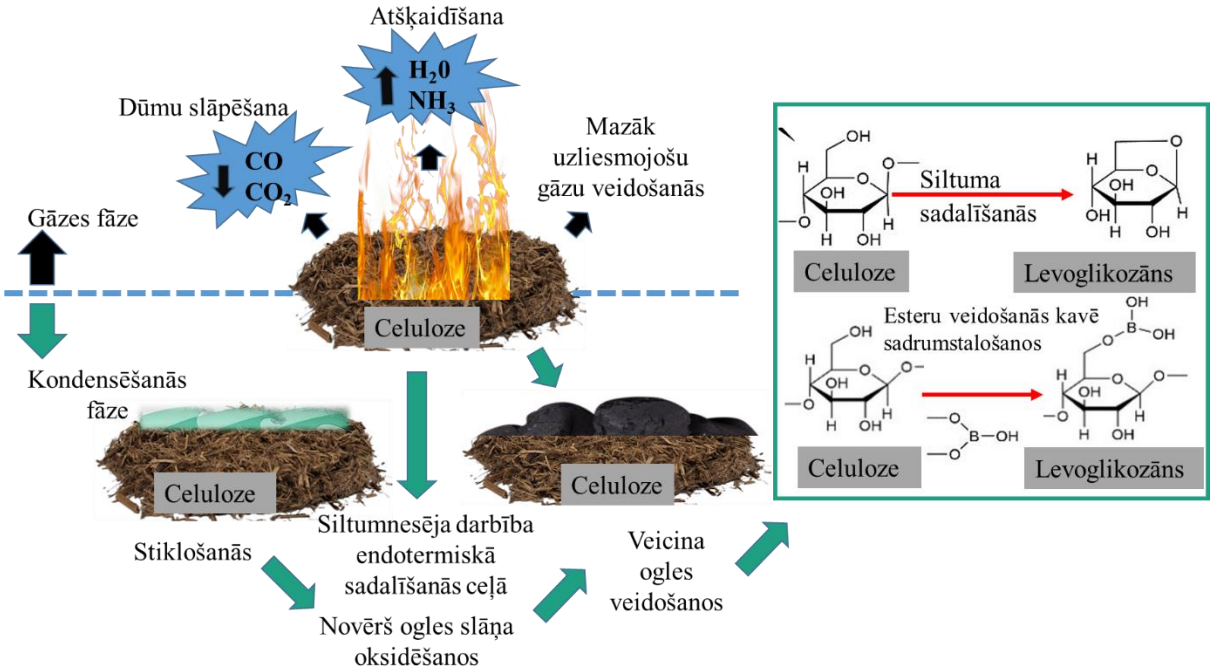
3.21. att. **Tipiska termogravimetriskā līkne dabisko šķiedru materiāliem** (Azwa et al., 2013)

Pēdējās desmitgadēs tiek aktīvi domāts, kā atrisināt ugunsdrošības jautājumus, tajā skaitā pievērsta uzmanība aktuālajai problēmai – kā samazināt uzliesmošanas un degšanas riskus. Degšanas process sastāv no vairākiem posmiem (3.22. att.): karsēšanas, aizdegšanās, sadegšanas un liesmas izplatīšanās. Liesmas slāpēšanu var panākt, iejaucoties jebkurā no posmiem, kas var pārtraukt procesu pirms faktiskās aizdegšanās. Viens no risinājumiem ir izstrādāt jaunas vai pievienot jau zināmās liesmu slāpējošas vielas.



3.22. att. **Ugunsgrēka attīstības modelis** (Lehner, 2005)

Lai samazinātu ugunreakcijas īpašības, promocijas darba pētījumā nolemts pielietot tradicionāli lietotu Boraka (Nātrija tetraborāta $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) antipirēnu, ko plaši lieto jau no 1940. gada, kad sāka iestrādāt un tirgot beramos celulozes izolācijas materiālus.



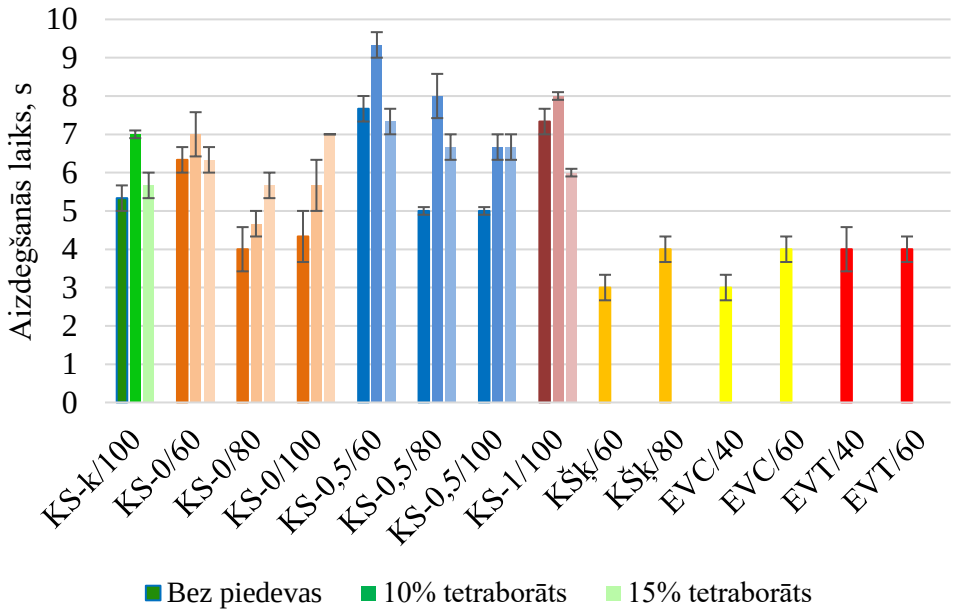
3.22. att. **Bora savienojumu liesmu slāpējošā iedarbība celulozes materiālos**

Boraka daudzums, iestrādājot to materiālā, var sasniegt līdz 20% no sākotnējā svara (Richard, 1996). Boraks ir maz toksisks (Dogan et al., 2021) un galvenokārt darbojas kā liesmas slāpētājs; efektīva iedarbība sākas jau no pievienošanas 2% apjomā. Boraks veicina ogles veidošanos pie uzliesmošanas un samazina gruzdēšanu. Bora savienojumu komerciāli izmanto, lai nodrošinātu uguns aizsardzību materiālos, kuru pamatā ir celuloze: kovilna, koks, papīrs, skaidas, izolācijas materiāli. Turklāt boru saturošas vielas efektīvi aizsargā materiālus no mikroorganismu un kukaiņu iedarbības un darbojas arī kā fungicīds. Bora savienojumu liesmu slāpējošā iedarbība celulozes materiālos apskatāma 3.23. attēlā (Dogan et al., 2021). Boraka klātbūtne būtiski samazina dūmu izdalīšanos, kas ēkās ir ļoti svarīgi, jo biežs nāves iemesls ugunsgrēkos ir nevis uguns tieša iedarbība, bet gan dūmi, kas izraisa cilvēku nosmakšanu (Wang et al., 2017).

Kā rāda autora iegūtie rezultāti (3.24. att.), virsmas aizdegšanās ātrums ir tieši saistīts ar virsmas reljefainumu, pūkainumu. To parāda arī citu autoru pētījums (Bukšāns, 2010), ka frēzētas vai reljefainas virsmas ietekmē aizdegšanās ātrumu, kā arī par 50% palielina THR. Parādība skaidrojama ar efektīvāku siltuma pārnesi, lielāku virsmas laukumu, kas izraisa daudz straujāku pirolīzi sākumā, tad degšanas intensitātes samazināšanos, bet pēc tam degšanas jauda samazinās un notiek process kā gludai virsmai.

Lai dabiskās izcelsmes organiskam siltumizolācijas materiālam iegūtu iespējami labas ugunsreakcijas īpašības, kas būtu salīdzināmas ar rūpnieciski ražotiem alternatīviem materiāliem, promocijas darba pētījumos antipirēns boraks pievienots 10–15% apjomā no materiāla masas, kā arī meklēts optimālais boraka piedevas apjoms.

Pievienojot antipirēnu piedevu 10% un 15% apmērā (skat. 3.24. att.), konstatēts, ka aizdegšanās laiks statistiski būtiski pieauga KS-0,5 visos blīvumos (p=0,024–0,075), izņemot paraugam KS-0,5/60 ar 15% antipirēna piedevu (p=0,51) salīdzinājumā ar paraugiem bez antipirēnu piedevām. Pārējiem paraugiem statistiski būtiska atšķirība aizdegšanās laikam, pievienojot antipirēnus, netika novērota (p=0,067–0,52). Novērojama blīvuma ietekme uz aizdegšanos – pieaugot blīvumam, aizdegšanās notiek ātrāk, kas skaidrojams ar to, ka šķiedru materiāliem virsmu klāj mikrošķiedras, kas apdeg liesmas pielikšanas brīdī un izraisa lielu ugunsgrēka attīstības indeksa pieaugumu.

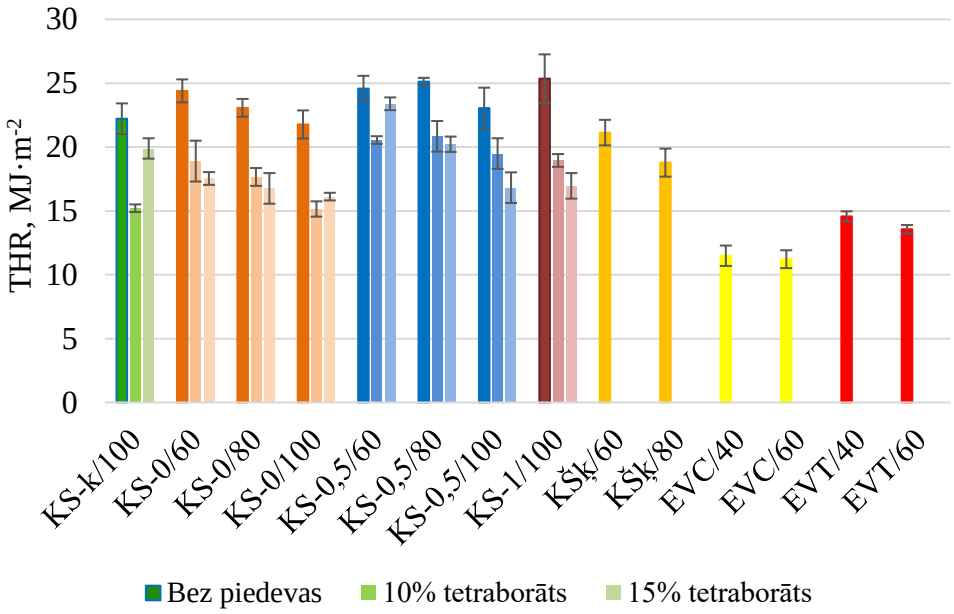


3.24. att. **TI Aizdegšanās laiks neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem pie dažādiem blīvumiem**

Promocijas darba pētījumā autors izstrādāto materiālu salīdzina ar kokšķiedru un celulozes siltumizolācijas materiālu, kurās iestrādātais tetraborāts funkcionē kā liesmas slāpētājs, kas neizplata uguni. Visu (izņemot KS-0/80 un KS-0/100) izstrādāto kaņepju spaļu siltumizolācijas paraugu aizdegšanās laiks bez antipirēniem ir statistiski būtiski lielāks (p=0,00058-0,013) kā komerciāli pieejamajiem celulozes un kokšķiedru izolācijas materiāliem. Pievienojot antipirēnus, statistiski būtiskā atšķirība pieaug (p=0,00015–0,047). Pētījuma laikā autors ievēroja, ka celulozes un kokšķiedru paraugu aizdegšanās ar liesmu bija 2–3 sekundes, pēc tam liesma nodzisa. Augstas temperatūras ietekme un pievienotie antipirēni rada vidi, kad celulozes šķiedra neaizdegas, bet tā pārogļojas 90–95 °C temperatūrā, neizdalot toksiskas gāzes (koka elementi aizdegas, sākot no 200 °C, un metāla elementi sāk zaudēt savas īpašības pie 300 °C). Ogles slānim ir lieliskas siltumizolējošas īpašības, un tas aizsargā no uzkaršanas (Papadopoulou et al., 2015).

Celulozes izolācija ir būtiski atšķirīga no autora izveidotā materiāla, jo tā ir viena veida šķiedra, homogēna, iegūta āmurdzirnavās; tas pats attiecas uz kokšķiedru izolācijas paraugu, kas iegūts šķiedrotājā ar noteiktiem šķiedras garuma un platuma parametriem. Autora izveidotais materiāls sastāv no nehomogēnām šķiedrām un šķiedru kūļiem, tātad būtiski atšķiras no salīdzināmā materiāla gan pēc ķīmiskām, gan fizikālām īpašībām.

Aplūkojot iegūtos rezultātus 3.25. att., redzams, ka 10% antipirēnu piedeva ir statistiski būtiski (p=0,004–0,039) samazinājusi kopējo siltuma izdalīšanos visās paraugkopās par 4–7 MJ·m^{-2}, kas ir par 20–30%, salīdzinot ar paraugiem, kuriem nav pievienoti antipirēni.

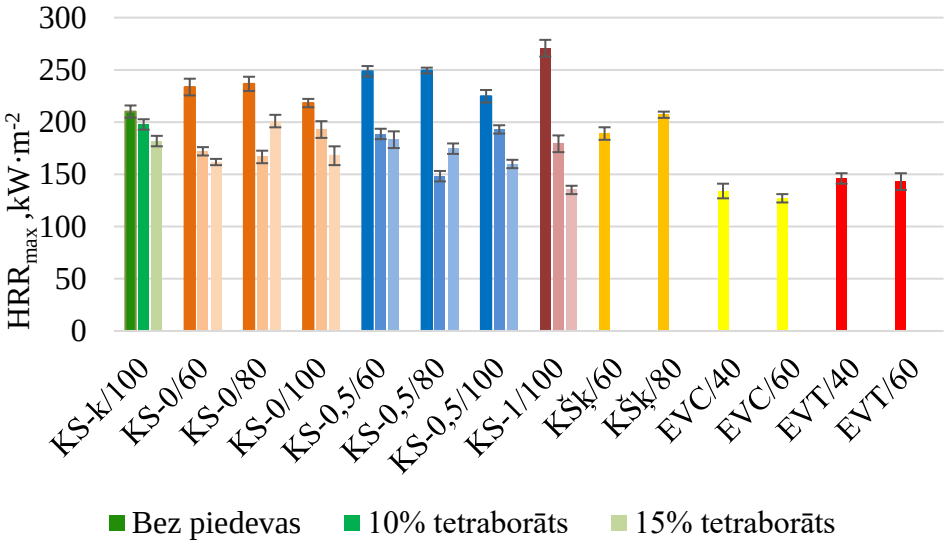


3.25. att. **Kopējā siltuma izdalīšanās (THR) uz laukuma vienību 300 sekundēs neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem ar antipirēna piedevu 10 un 15%**

Kopējā siltuma izdalīšanās ir samazinājusies materiālos pēc visām apstrādēm un visos blīvumos proporcionāli, kā arī redzama blīvuma ietekme uz rezultātiem. Ir vērojama tendence, ka, pieaugot blīvumam, siltuma izdalīšanās samazinās, mazāku ietekmi uz uguns reakciju atstājot ķīmisko īpašību variācijai. Tomēr, balstoties uz veiktajiem aprēķiniem, blīvuma pieaugumam nav statistiski būtiskas ietekmes (p=0,2–0,79). Antipirēna piedevas apjoma palielināšana no 10% uz 15% nerada būtisku efektu (p >0,05) uz paraugu kopējo siltuma izdalīšanās daudzumu THR. Pievienojot antipirēnus izstrādātajiem siltumizolācijas materiāliem vismaz 10% apmērā, kopējā izdalītā siltuma daudzums visās datu kopās statistiski būtiski neatšķiras no komerciāli lietoto kokšķiedru siltumizolācijas materiāla (p=0,3–0,5). Paraugam

KS-0/100 kopējais izdalītais siltuma daudzums statistiski būtiski neatšķiras no EVT paraugiem (0,08–0,5).

Paraugiem pievienotā antipirēnu piedeva degšanas jaudu ietekmē ļoti dažādi (skat. 3.26. att.). Kontroles paraugiem tetraborāta pievienošana degšanas jaudu samazina mazāk (par 6–13%), kas nav statistiski būtiski (p=0,2), nekā paraugiem, kas apstrādāti ar TS. Antipirēna pievienošana ar TS apstrādātiem paraugiem statistiski būtiski (p=0,00001–0,048) samazina maksimālo degšanas jaudu par 12–40%, pievienojot 10% antipirēna, un par 15–50%, pievienojot 15% antipirēna.



3.26. att. **Maksimālā degšanas jauda (HRR_{max}) uz laukuma vienību neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem ar antipirēna piedevu 10 un 15%**

Salīdzinot ar TS apstrādātu un neapstrādātu kaņepju spaļu materiālus ar rūpnieciski ražotajiem paraugiem, ugunsreakcijas īpašības ir zemākas (izņemot kokšķiedru izolācijas materiālu, kur p=0,09–0,75), bet, kā liecina promocijas darba pētījums, to ir iespējams uzlabot. Ekovates izolācijas materiāla uzliesmošana ir ātrāka nekā jebkuram no neapstrādātajiem un TS apstrādātajiem kaņepju spaļu un kokšķiedru paraugiem, bet kopējā siltuma izdalīšanās ir vismazākā. Pētījumā novērota būtiska atšķirība – ekovate uzliesmoja, un pēc īsa brīža liesma nodzisa, taču autora izstrādātie materiāli aizdegās un dega, liesma samazinājās līdz brīdim, kad materiāls koniskajā kalorimetra ietvarā bija sadedzis pilnībā. Rezultātus būtiski ietekmēja traucējošs faktors, ko neizdevās atrisināt visa pētījuma gaitā – antipirēnu uznešanas vienmērīgums. Antipirēns bija pulverveida viela, kuru sajauca ar materiāla masu atbilstošās proporcijās, pirms to iestrādāja iekārtas ietvarā.

Apakšnodaļas kopsavilkums: Aplūkojot izstrādāto materiālu bez antipirēnu piedevām rezultātus, aizdegšanās laikam nav konstatēta tieša sakarība ar TS apstrādi un paraugu blīvumu. THR rezultāti neuzrāda TS apstrādes ietekmi uz siltuma izdalīšanos. Pieaugot blīvumam, THR vērtība samazinājās. HRR vērtību neietekmē TS apstrāde, taču tā samazinās, palielinot paraugu blīvumu. Vienīgais atšķirīgais paraugs ir KS-1/100, kura atšķirīgās ugunsreakcijas īpašības skaidrojamas ar būtiskām ķīmiskā sastāva izmaiņām.

Pievienojot antipirēnus 10% apmērā izstrādātajam materiālam, novērojama būtiska pozitīva ietekme uz ugunsreakcijas īpašībām, taču aizdegšanās laika rezultātos kopsakarība netika novērota. 10% antipirēnu piedeva samazina THR par 4–7 $MJ \cdot m^{-2}$ (par 20–30%, salīdzinot ar bezpiedevu materiālu). HRR samazinājums ir par 12–40% atkarībā no blīvuma un TS apstrādes režīma.

Materiālu ugunsreakcijas īpašības noteiktas arī tirgū plaši lietotiem siltumizolācijas materiāliem, kurus savstarpēji salīdzināja ar izstrādāto kaņepju spaļu siltumizolācijas materiālu. Visiem pārbaudītājiem paraugiem konstatētas ļoti līdzīgas īpašības, kas atbilst EUROCLASS E ugunsreakcijas klasei. Lai šo varētu droši apgalvot, ir svarīgi veikt papildu pētījumus ar liesmas testu.

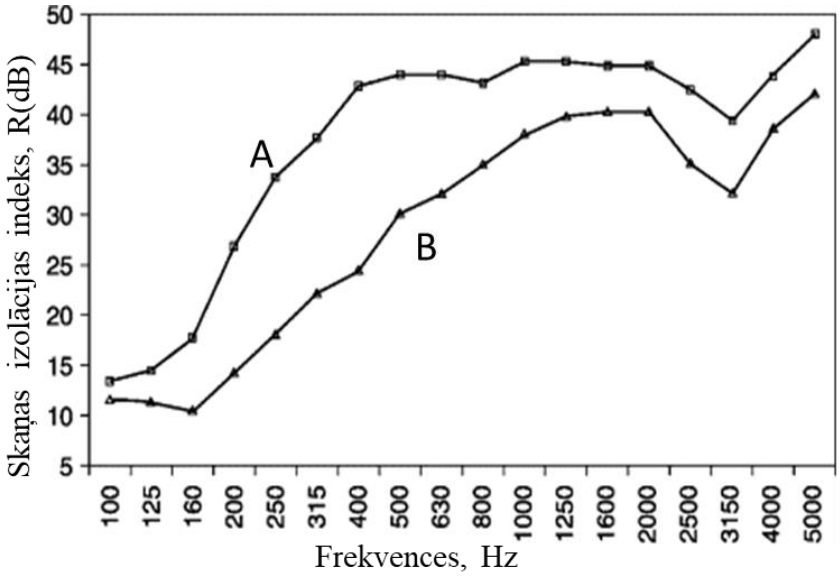
Pētījumā atklātie un ugunsreakciju ietekmējošie faktori vai apstākļi.

Beramo materiālu testēšana ir īpaši sarežģīts process, jo katrs materiāls atšķiras pēc beramības, šķiedrainuma, sīkšķiedrainuma un frakcionālā sastāva, kas savukārt ietekmē iegūto ugunsrekcijas rezultātu. Tetraborāta iestrāde katram materiāla veidam ir atšķirīga un var būtiski ietekmēt vienmērīgu vielas uzklāšanu uz šķiedru virsmas. Iestrādājot beramo materiālu testēšanas ietvarā, ir sarežģīti vienmērīgi iestrādāt materiālu, var veidoties pūkaina virsma vai mikrošķiedras, tās jācenšās nogludināt, jo to klātbūtne var būtiski ietekmēt aizdegšanos. Parauga iesvars beramiem materiāliem ir ar mazu masu, šajā gadījuma 21–50 g, kas ir iekārtas svēršanas minimālā robeža. Promocijas darba pētījumā izstrādātais materiāls ir paredzēts iestrādei konstrukcijā, tāpēc nepieciešams īpaši pievērst uzmanību antipirēnu iestrādes tehnoloģijai beramās šķiedru situmizolācijas materiāliem.

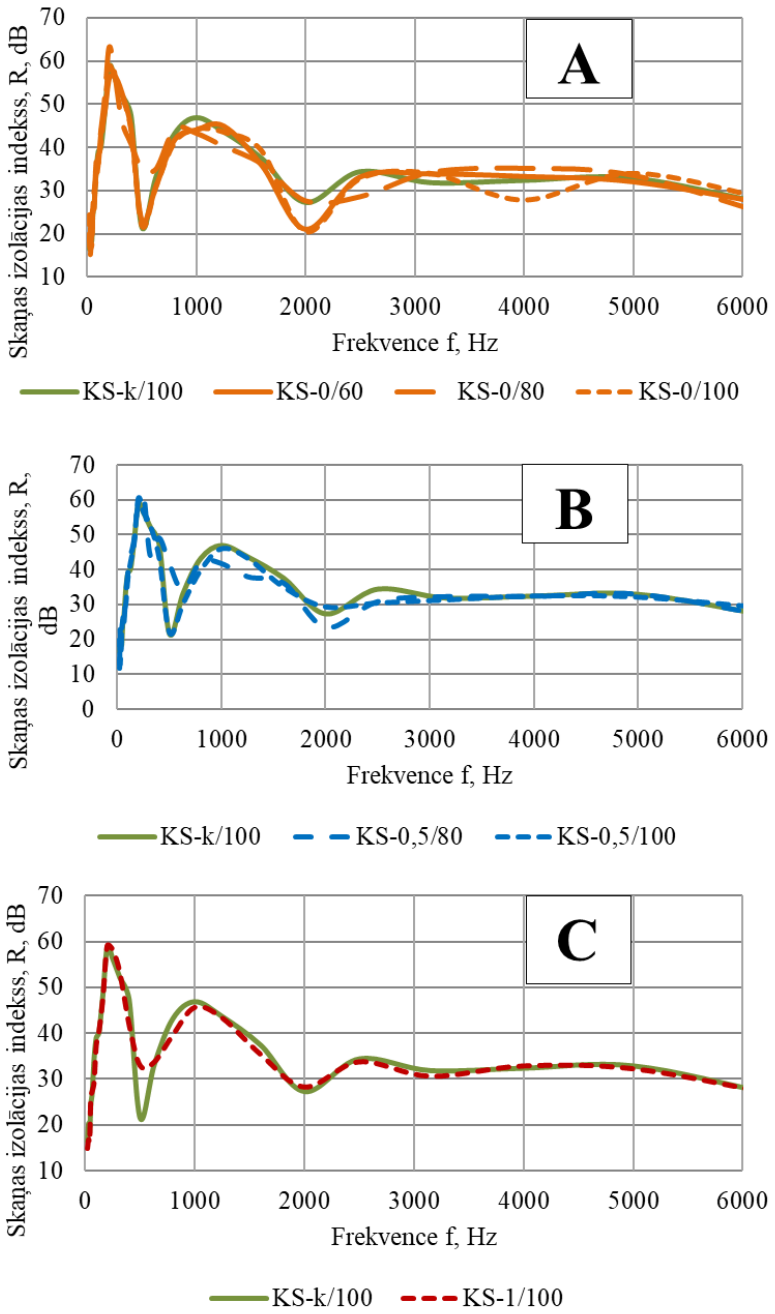
3.8. Skaņas izolācija īpašību analīze

Pasaules veselības organizācija (PVO) troksni definē kā vienu no būtiskām mūsdienu problēmām. Pārmērīgs troksnis nopietni kaitē cilvēka veselībai un traucē cilvēku ikdienas aktivitātēm skolā, darbā, mājās un brīvajā laikā. Troksnis var traucēt miegu, izraisīt sirds un asinsvadu slimības, ietekmēt psihofizioloģiski, samazināt veiktspēju un izraisīt kaitinošas reakcijas un izmaiņas sociālajā uzvedībā (Shamsipour et al., 2022) (Zhang C, Li H, 2022).

3.28. attēlā atspoguļoti 75 mm sienas konstrukcijas, kas sastāv no 50 mm izstrādātā siltumizolācijas materiāla un abpusējas rīģipša kārtas akustiskās izolācijas īpašības frekvenču diapazonā no 50–6000Hz. Visi izstrādātie materiāli ir ar līdzīgām skaņas izolācijas īpašībām. Labas skaņas izolācija ir novērojama pie 50 un 1000Hz, bet zemāka skaņas izolācijas spēja novērota pie 500 un 2000Hz. Kā redzams 3.28. attēlā, izstrādātajiem paraugiem augstākās skaņas izolācijas indeksa vērtības ir tieši pie zemākām frekvencēm. Lai arī teorija nosaka, ka parauga tilpummasai ir būtiska ietekme, tomēr izstrādāto paraugu masas atšķirības ir pārāk maza, lai novērotu būtisku ietekmi uz skaņas gaisa izolācijas indeksu (R).



3.27. att. **Skaņas izolācijas indekss R.** (J. António, 2011)
A – ar ievietotu šķiedru materiālu; B – ar starpkārtu gaiss

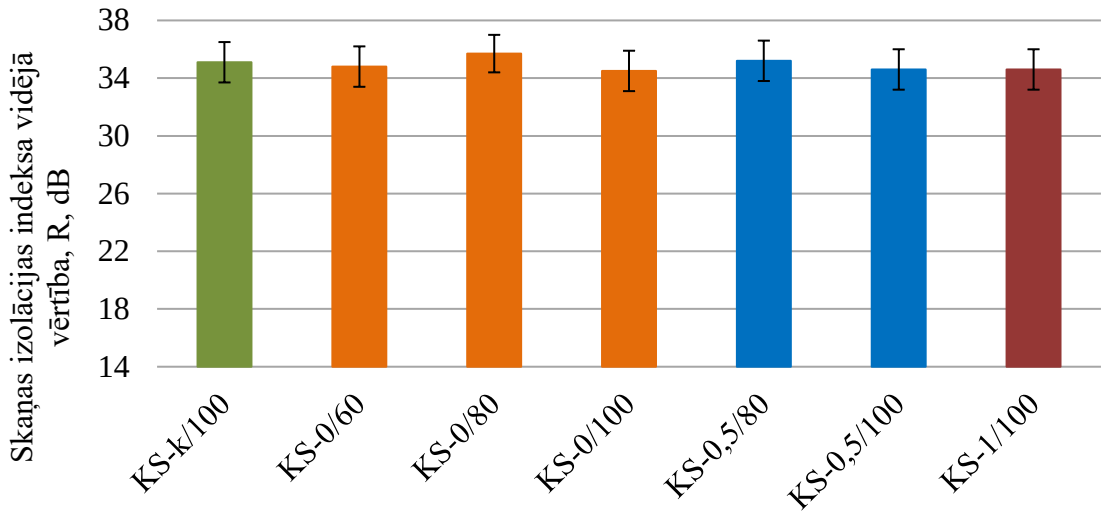


3.28. att. **Skaņas izolācijas eksperimentālā līkne 75 mm starpsienas konstrukcijai. A – TS 0 min, B – TS 0,5 min, C – TS 1min salīdzinājumā ar kontroles paraugu**

Dažādus trokšņus vislabāk slāpē konstrukcijas, kas sastāv no trīs vai vairākiem slāņiem, jo skaņai ir jāiesvārsta katra kārta atsevišķi, kā rezultātā, samazinoties skaņas spēkam, tiek zaudēta tās enerģija. Materiāli savā starpā nedrīkst būt tieši savienoti kā skrūves vai naglas, starpkārtai jābūt elastīgai, mīkstai, piemēram, elastīga līme, jo citādi tie būs ideāli vadītāji jeb skaņas tilti. Daudz pētījumu ir tieši par tradicionālajām sienām, kas sastāv no diviem rīģipša slāņiem ar gaisa starpkārtu vai šķiedru izolācijas materiāla starpkārtu. Ir skaidri parādīts, ka, ievietojot šķiedru materiālu starp divām loksnēm, skaņas izolācijas indeksu noteiktās frekvenču joslās iespējams palielināt pat divas reizes (3.27. attēls). Tas pamato arī izstrādāto šķiedru materiālu skaņas izolācijas spēju, tos iestrādājot konstrukcijās.

50 mm izstrādāto izolācijas materiālu, kas iestrādāti 75 mm rīģipša sienas konstrukcijā, vidējās skaņas izolācijas indeksa R vērtības visos frekvenču diapazonos apkopoti 3.29. attēlā. Redzams, ka neatkarīgi no apstrādes apstākļiem un izolācijas blīvuma, vidējās R vērtības

statistiski būtiski neatšķiras (p=0,75–0,94). Visu paraugu skaņas izolācijas indeksa vidējā vērtība ir ~35 dB. Iegūtie rezultāti ir līdzvērtīgi citu dabisko šķiedru siltumizolācijas materiālu R vērtībām (Obuka et al., 2013), tai skaitā tirgū esošajiem analogiem (Halliwell et al., 1998). Faktiskie caurules testā iegūtie rezultāti ir zemāki (eksperimentālā līkne) nekā reālajā dzīvē mērāmie rezultāti (izrēķinātā līkne/teorētiskā līkne) (Līcītis, 2013), jo caurulē tiek mērīta skaņa, kas tieši perpendikulāri krīt uz paraugu, bet reāli dzīvē skaņa krīt no visām pusēm, līdz ar to izolācija ir labāka.



3.29. att. **Skaņas izolācijas indekss R, vidējās vērtības visos frekvenču diapazonos**

3.8.apakšnodaļas kopsavilkums: Visiem izstrādātajiem materiāliem ir līdzīga skaņas izolēšanas spēja, statistiski nav būtisku atšķirību (p=0,75–0,94). Eksperimentālās līknes būtisko svārstību ietekmē R rādījumi ir zemāki 3.27. att. visās paraugu grupās. Ne TS apstrādei, ne blīvumam nebija būtiskas ietekmes uz skaņas izolācijas īpašībām.

Labas skaņas izolācijas rādījumi novērojami pie 50 un 1000 Hz frekvencēm, bet zemāka skaņas izolācijas spēja novērota pie 500 un 2000 Hz.

Ja apskata materiālu pēc struktūras bez rīģipša plāksnēm atbilstoši materiāla tipam, tam ir labas skaņas absorbcijas spēja, "izolēšana" notiek, skaņu absorbējot.

Datu rezultātus ietekmē beramā materiāla iestrādes vienmērīgums akustiskajā caurulē, jo nevar garantēt pilnīgu virsmas noklāšanu tās birstošās struktūras dēļ.

4. EKONOMISKAIS IZVĒRTĒJUMS

Pilns tehnoloģiski ekonomiskās priekšizpētes dokuments apskatāms pielikumā. Tehnoloģiski ekonomiskās priekšizpētes sagatavošanā autora ieguldījums – 50%.
Ekonomiskais izvērtējums izstrādāts rēķinot uz pilna izmēra ražotni.

4.1. Kopsavilkums

TEP "Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas komercializācija" **mērķis** bija veikt potenciāli jauna produkta (kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla) un potenciāli jaunas tehnoloģijas (kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas ar TS metodi) ieviešanas novērtējumu un analīzi, lai objektīvi un racionāli apzinātu jaunā produkta un tehnoloģijas priekšrocības, trūkumus, iespējas un draudus, kā arī noteiktu komercializācijas īstenošanai vajadzīgos resursus un īstenošanas izredzes.

Tehniski ekonomiskās priekšizpētes **uzdevumi** bija:

1) Veikt jaunā produkta analīzi;
2) Veikt analogo produktu tirgus un potenciālā noieta tirgus analīzi;
3) Analizēt intelektuālā īpašuma tiesību aizsardzības pasākumus;
4) Analizēt līdzšinējo un plānoto sadarbību ar citām pētniecības organizācijām un komersantiem;
5) Veikt produkta komercializācijas izmaksu – ieguvumu analīzi.

Tehniski ekonomiskā priekšizpēte ir veikta saskaņā EK Regulas Nr. 651/2014 2. panta 87. punkta definīciju, kā arī saskaņā ar 25.10.2016. Ministru kabineta noteikumiem Nr. 692 "Darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 1.2.1. specifiskā atbalsta mērķa "Palielināt privātā sektora investīcijas P&A" 1.2.1.2. pasākuma "Atbalsts tehnoloģiju pārneses sistēmas pilnveidošanai" īstenošanas noteikumi".
Dokumentā analizētais potenciāli jaunais produkts (kaņepju spaļu beramais siltumizolācijas materiāls) un potenciāli jaunā tehnoloģija (kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģija ar TS metodi) **atbilst divām RIS3** (Viedās specializācijas stratēģija) **specializācijas jomām** – Viedie materiāli, tehnoloģijas un inženiersistēmas un Zināšanu ietilpīga bioekonomika. Tādējādi, lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas izpēte ir starpdisciplināra. Kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla ieviešana ražošanā Latvijas tautsaimniecības nozarēs ar augstu pievienoto vērtību veicinās Latvijas komersantu starptautiskās konkurētspējas celšanos un to iekļūšanu jaunos ārvalstu tirgos.

Produktam un tehnoloģijai ir augsts novitātes līmenis – šobrīd tirgū nav pieejams siltumizolācijas materiāls, kas iegūts, izmantojot TS tehnoloģiju. Augsto produkta novitāti apliecina iegūtie patenti un zinātniskās publikācijas.
Produkts – kaņepju spaļu beramais siltumizolācijas materiāls – ir izstrādāts un tehnoloģija ir validēta mākslīgā (laboratorijas) vidē. Ir iegūts siltumizolācijas materiāla paraugs nelielos apjomos laboratorijas apstākļos, izmantojot 0,5l TS iekārtu. Komercializācijas pētījumā izstrādāts produktu līdz TRL6 (*Technology Readiness Levels*, latv. – Tehnoloģiju gatavības līmeņi) līmenim – ir saražots siltumizolācijas materiāla pilotpartija, testējot tehnoloģiju pilotražotnes līmenī un pārbaudot produkta īpašības reālā darbības vidē (koka karkasa mājās).

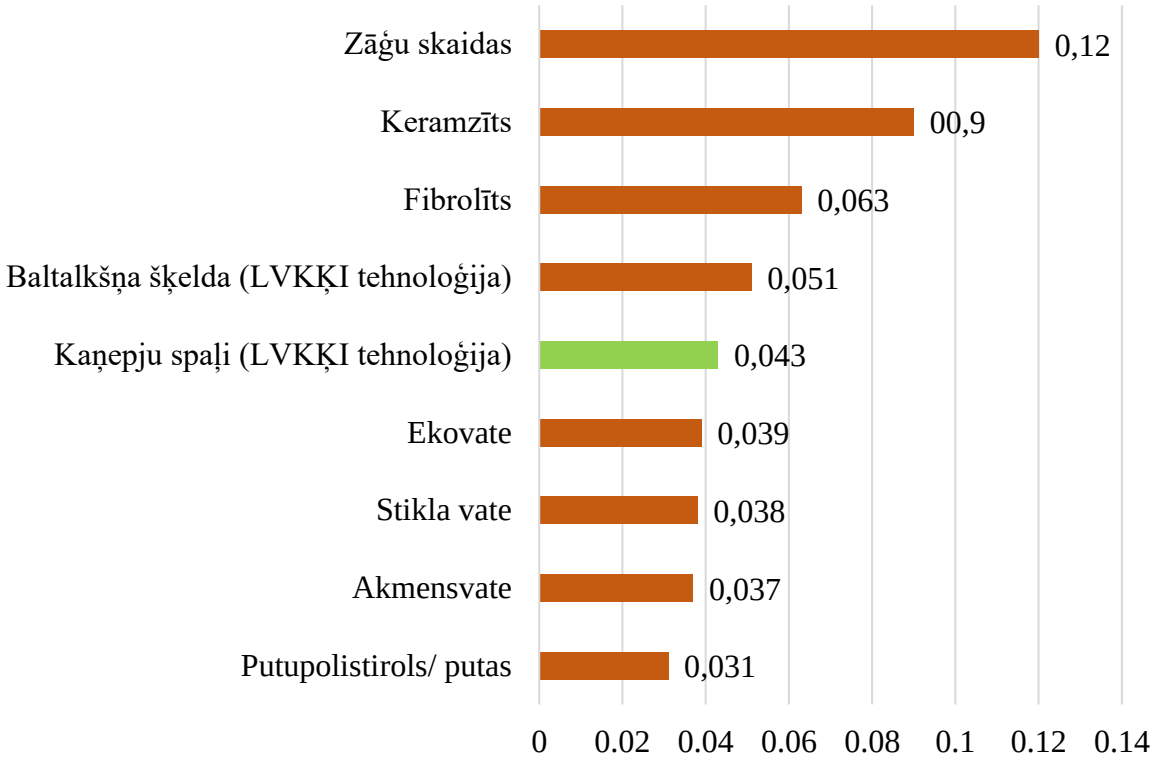
Atbilst tautsaimniecības transformācijas virzienam "Nākotnes izaugsmes nozares, kurās eksistē vai var rasties produkti un pakalpojumi ar augstu pievienoto vērtību", 2.prioritātei "Jaunu produktu/ pakalpojumu pastāvīga meklēšana, kuras ietvaros ir nepieciešams radīt efektīvu identifikācijas sistēmu, kas spēj atrast un sniegt atbalstu jaunu produktu radīšanai esošo nozaru un starpnozaru ietvaros, kā arī veidot jaunas nozares ar augstu izaugsmes potenciālu".

Tehniski ekonomiskās priekšizpētes rezultātā **secināts**, ka kaņepju spaļu beramais siltumizolācijas materiāls ir **produkts ar augstu komercializācijas potenciālu**. Kaņepju spaļu beramais siltumizolācijas materiāls ir dabisks no atjaunojamiem dabas resursiem un ražošanas blakusproduktiem izgatavots materiāls, kas ir nekaitīgs cilvēka veselībai. Produkta komercializācijai vērā ņemami šķēršļi nepastāv. Komercializējamajam produktam (kaņepju spaļu beramajam siltumizolācijas materiālam) **var būt būtiska nozīme strauji augošu tirgu paplašināšanā, tādēļ tam ir īpaši augsts investīciju piesaistes potenciāls**.

4.2. Produkta analogi un aizvietotāji

Šobrīd tirgū pieejamos izolācijas materiālus iespējams klasificēt pēc dažādām pazīmēm: 1) beramie siltumizolācijas materiāli vai plāksnes, 2) dabiskie un ķīmiskie siltumizolācijas materiāli.

Dažādu siltumizolācijas materiālu siltumvadītspējas salīdzinājums redzams 4.1. attēlā.



4.1. att. **Siltumizolācijas materiālu siltumvadītspējas** ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) **salīdzinājums**

Pēc veiktajiem mērījumiem, siltumvadītspēja jaunajam beramajam kaņepju spaļu siltumizolācijas materiālam no kaņepju spaļiem ir no 0,051 līdz 0,043–0,045 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Lielākā daļa no tirgū esošiem beramiem siltumizolācijas materiāliem tiek ražoti no minerālām (akmens un stikla) un celulozes (papīrmasa no koksnes) šķiedrām. Promocijas darba pētījumā izstrādātais kaņepju spaļu beramais siltumizolācijas materiāls arī sastāv no šķiedru masas, taču atšķiras ar iegūšanas paņēmienu (tvaika sprādziens), kas ir salīdzinoši vienkāršs un lēts. Celulozes šķiedru iegūšanas procesā koksnes izejvielai pirms šķeldu ieguves obligāti veic nomizošanu, kas rada papildu operāciju un blakus produktu. Izstrādātās tehnoloģijas gadījumā ir nepieciešama izejvielas smalcināšana (šķeldu iegūšana), bet nomizošana nav vajadzīga. Produkta galvenā inovācija ir tā, ka šķiedru masa tiek iegūta vienā posmā TS iekārtā, kas ir vienkārši un ātri. TS tehnoloģija ir ieviesta pasaules tirgū, taču tiek pielietota citu produktu ražošanai, kas nav saistīta ar siltumizolācijas materiālu iegūšanu.

4.1. tabulā apkopots izstrādātā kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla salīdzinājums ar alternatīvajiem siltumizolācijas materiāliem.

4.1. tabula

Siltumizolācijas materiālu īpašību salīdzinājums

Priekšrocība	**Beramie siltumizolācijas materiāli**		
	Kaņepju spaļu beramais siltumizolācijas materiāls, izmantojot TS tehnoloģiju	**Celulozes šķiedras iegūtas defibrējot un rafinējot / reciklēts papīrs**	**Akmens/stikla vate**
Izejmateriāli un piedevas	Organisks (augu atliekas), neorganiskie antipirēni	Organisks (koksne – papīrmalka), neorganiskie antipirēni	Neorganisks (akmens, stikls), organiskās saistvielas
Siltumvadītspēja, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,043–0,057	0,046–0,054	0,030–0,040
Ietekme uz veselību	Kairinošie putekļi montāžas laikā	Kairinošie putekļi montāžas laikā	Kairinošie putekļi montāžas laikā
Ražošanas izmaksas	Zemas	Augstas/vidējas	Augstas
Ietekme uz vidi	Neitrāla	Neitrāla/negatīva	Negatīva
Uguns reakcija	Strauja (bez antipirēniem) Lēna (ar antipirēniem)	Strauja (bez antipirēniem) Lēna (ar antipirēniem)	Ļoti lēna
Mitruma uzsūcamība	Vāja	Laba	Laba

Kā redzams tabulā 4.1., izstrādātais beramais siltumizolācijas materiāls ir līdzvērtīgs tirgū esošajiem ar paredzamām zemākām ražošanas izmaksām. Mitruma uzsūcamība ir svarīgs parametrs ekspluatācijas laikā, jo izolācijas materiāla mitruma paaugstināšanās samazina tā siltumvadītspēju. Materiālam mitruma uzsūcamība ir zema TS apstrādes dēļ, kuras procesā samazinās hemiceluložu daudzums, kas augu materiālos uzsūc/piesaista mitrumu.

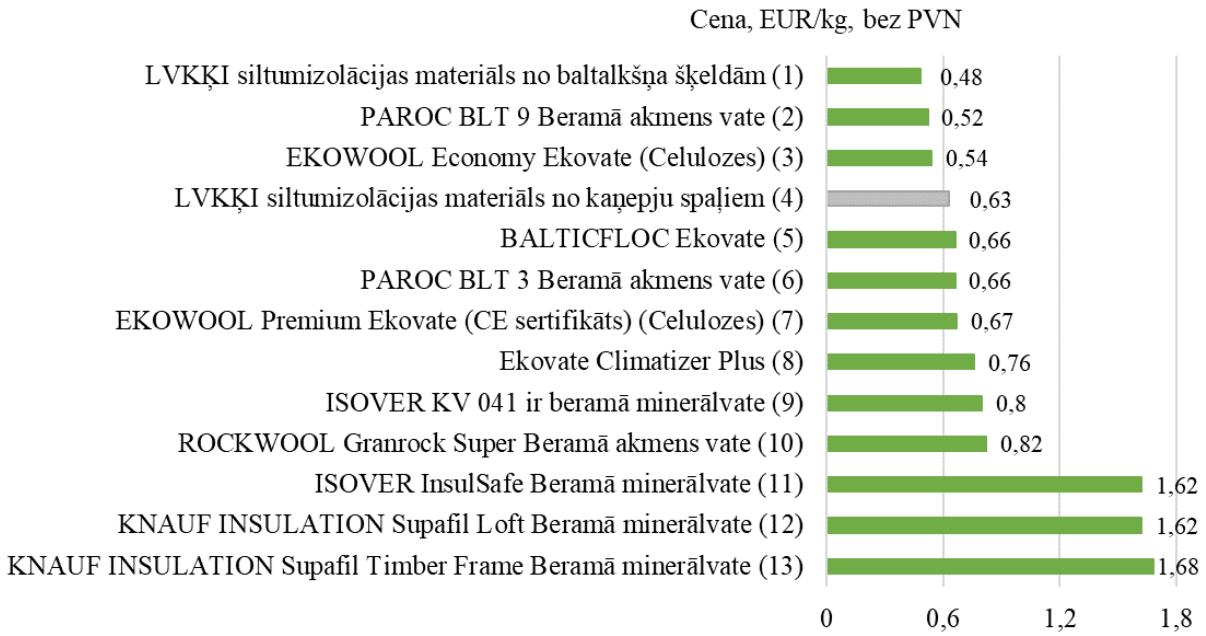
Tā kā kaņepju spaļu saturā ir lignoceluloze, kas ir organisks pašatjaunojošs dabisks materiāls, tajā ir sekvestrēts ogleklis, kas samazina CO_2 emisijas, kas potenciāli rastos, to sadedzinot. Eiropā ir apstiprināta bioekonomikas stratēģija, kas balsta jaunu materiālu ieviešanu un ražošanu no atjaunojamiem resursiem. Promocijas darba pētījuma laikā izstrādātā jaunā kaņepju spaļu produkta ieviešana nodrošinās bioekonomikas stratēģijas mērķu sasniegšanu.

Celulozes šķiedru siltumizolācijas materiāli, kas ir analogs piedāvātajam beramajam kaņepju spaļu siltumizolācijas materiālam, tiek iegūti defibrēšanas un rafinēšanas ceļā, līdzīgi kā papīrrūpniecībā, galvenokārt, pārstrādājot izmantoto papīru jeb makulatūru, kas prasa lielus enerģijas un ūdens apjomus (Kosny et al., 2006). Pētījumā piedāvātā paņēmiena apstrādei nepieciešamās enerģijas daudzums pie reaktora darba temperatūrām līdz 230°C nepārsniedz 10% no biomasas siltumspējas, bet piesātināta tvaika patēriņš – viens kg uz kilogramu sausā biomasas satura pie 50% enerģijas izmantošanas efektivitātes (Abolins & Gravitis, 2009). Tehnoloģijas piedāvātais ieguvums ir vienkāršība, priekšrocība izmantot biomasas atlikumus, salīdzinoši zema energoietilpība un ūdens patēriņš ražošanas procesā, iegūstot dabisku bezatlikumu siltumizolācijas materiālu.

Ieviešot TS tehnoloģiju Latvijā, būtu iespējams ne tikai ražot beramos lignocelulozes izolācijas materiālus, bet arī citus vērtīgus produktus ar pievienoto vērtību ķīmijas un biotehnoloģiju nozarēs.

4.3. Produkta cena

Produkta cenu ietekmē trīs faktori: produkta pašizmaksa, uzcenojums un konkurentu jeb analogu materiālu cenas. Aprēķinā izdarīts pieņēmums, ka beramā siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem cena būs 0,63 EUR·kg^{-1} (veidojot apmēram 11,00% uzcenojumu jeb peļņu). Cenu salīdzinājums ar citiem tirgū pieejamajiem beramajiem siltumizolācijas materiāliem ir sniegts 4.2. attēlā.



4.2. att. **Izstrādātā materiāla un tirgū pieejamo analogu cenu salīdzinājums**
(aktuālās cenas skatītas 2024. gada 7. oktobrī)

(1) un (4) veikti aprēķini pamatojoties uz produkta ražošanas pašizmaksu un uzcenojumu;
(2) https://www.darbamateriali.eu/katalogs/PAROC-BLT9-beram%C4%81-akmens-vate-15kg-p319897393
(3) https://prof.lv/p-170749-ekowool-economy-ekovate-135kg?ff=6&fp=3258
(5) https://videstehnika.lv/katalogs/siltumizolacijas-materiali/balticfloc-ekovate-13-6kg/
(6) https://www.darbamateriali.eu/katalogs/PAROC-BLT3-beram%C4%81-akmens-vate-15kg-p319897392
(7) https://prof.lv/p-168614-ekowool-premium-ekovate-ce-sertifikats-135kg?ff=6&fp=3261
(8) https://www.buvbaze.lv/ru/catalog/50278/ekovate-climatizer-plus.html
(9) https://topbuve.lv/siltumizolacijas-materiali/berama-vate/isover-berama-vate/isover-kv041-ka-berama-mineralvate-16kg.html
(10) https://buvniecibas-abc.lv/lv/veikals/buvmateriali/siltumizolacijas-materiali/berama-vate/berama-vate-rockwool-granrock-super-20kg-066m3maisa-12maisipalete
(11) https://www.darbamateriali.eu/katalogs/ISOVER-InsulSafe-Beram%C4%81-miner%C4%81lvate-16kg-p363967893
(12) https://www.darbamateriali.eu/katalogs/ISOVER-InsulSafe-Beram%C4%81-miner%C4%81lvate-16kg-p363967893
(13) https://topbuve.lv/siltumizolacijas-materiali/berama-vate/knauf-insulation-berama-vate/knauf-supafil-timber-frame-16-6kg.html

Kā redzams 4.2. attēlā, saskaņā ar pašreizējiem aprēķiniem izstrādātie siltumizolācijas materiāli ir cenas ziņā konkurētspējīgi ar citiem tirgū esošajiem produktiem, tostarp gan minerālvati, gan ekovati. No kaņepju spaļiem iegūtais siltumizolācijas materiāls ir 4. lētākais materiāls 13 materiālu izlasē, ieskaitot siltumizolācijas materiālu no baltalkšņa. Turklāt izstrādātie siltumizolācijas materiāli ir otri lētākie ekovates segmentā. No kaņepju spaļiem iegūtā siltumizolācijas materiāla cena ir zemāka nekā BALTICFLOC celulozes ekovatei.

4.2. Nodaļas secinājumi

1. Tehniski ekonomiskās priekšizpētes rezultātā secināts, ka kaņepju spaļu beramais siltumizolācijas materiāls ir produkts ar augstu komercializācijas potenciālu. Materiāls ir dabisks, energoefektīvs un nekaitīgs cilvēka veselībai, jo ir izgatavots no atjaunīgajiem dabas resursiem un ražošanas blakusproduktiem. Produkta komercializācijai vērā ņemami šķēršļi nepastāv. Komercializējamajam produktam (kaņepju spaļu beramajam siltumizolācijas materiālam) var būt būtiska nozīme strauji augošu tirgu paplašināšanā, tādēļ tam ir īpaši augsts investīciju piesaistes potenciāls.
2. Būtiska priekšrocība lignocelulozes beramo siltumizolācijas materiālu no kaņepju spaļiem un komercializācijai Eiropā ir plaša izejmateriālu pieejamība: industriālo kaņepju sējumi Eiropā pēdējo 5 gadu laikā ir trīskāršojušies. Šobrīd lielākā problēma ir ražošanas blakusproduktu ekonomiski pamatota izmantošana, nevis izejmateriālu ieguve.
3. Veiktā izmaksu – ieguvumu analīze parādīja, ka lignocelulozes beramie siltumizolācijas materiāli no kaņepju spaļiem ir konkurētspējīgi ne tikai nišas būvmateriālu tirgū, bet arī plaša patēriņa tirgū, ņemot vērā zemās ražošanas pašizmaksas un labo siltumvadītspēju. Cenas un kvalitātes ziņā lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls konkurē pat ar minerālvati, taču, atšķirībā no minerālvates, tas ir dabisks produkts.
4. Būtiska tehnoloģijas priekšrocība ir vienkāršība un nepieciešamība pēc salīdzinoši zemām investīcijām ražošanas infrastruktūrā: tehnoloģijas ieviešanai tirgū nepieciešamas jau esošas standarta iekārtas. Nav nepieciešamas specifiskas ražošanas telpas. Darbam ar iekārtām nav nepieciešami augsti kvalificēti darbinieki vai liels darbinieku skaits – darbiniekus iespējams apmācīt ražotnē uz vietas, uzsākot darba attiecības. Līdz ar to tehnoloģijai ir salīdzinoši zemas ieviešanas izmaksas.
5. Šobrīd par visperspektīvāko tirgu lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ieviešanai ražošanā ir Eiropa, plaši pieejamo izejvielu – kaņepju spaļu dēļ. Būvmateriālu ražošanas tradīciju dēļ perspektīvs tirgus tehnoloģijas ieviešanai ir Baltijas valstis un arī Skandināvijas valstis, jo ir attīstīts ekomāju un ekobūvmateriālu tirgus.
6. Veiktā nozares izpēte parādīja to, ka šobrīd neviens cits uzņēmums vai zinātniskā institūcija pētījumus par lignocelulozes (tai skaitā kaņepju spaļu) apstrādi ar TS tehnoloģiju būvmateriālu ražošanai neveic. Tas nozīmē, ka ir salīdzinoši maza varbūtība, ka kāds cits izstrādās un komercializēs kaņepju spaļu beramo siltumizolācijas materiālu pirms LVKĶI. LVKĶI ir ļoti augstas izredzes komercializēt produktu pirmajam.
7. Kaņepju spaļu beramajam siltumizolācijas materiālam, atšķirībā no analogiem (minerālvates, celulozes ekovates) piemīt virkne objektīvu priekšrocību: siltumizolācijas materiāls ir dabisks, drošs un nekaitīgs cilvēka veselībai, produkta ražošanas process ir videi nekaitīgs un produktam ir ļoti labi siltumvadītspējas rādītāji. Turklāt produktu ir iespējams piedāvāt par cenu, kas ir zemāka par citu ekoloģisko un dabisko siltumizolācijas materiālu cenu un pat atsevišķu minerālvašu cenu.

SECINĀJUMI

1. Izstrādāta inovatīva šķiedru iegūšanas tehnoloģija beramā šķiedru siltumizolācijas materiāla iegūšanai no kaņepju spaļiem (kaņepju šķiedras ražošanas blakusproduktiem) ar TS metodi, ko nav iespējams īstenot ar tradicionālajām šķiedrošanas metodēm.
2. Optimālie TS metodes apstrādes parametri beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanai no kaņepju spaļiem ir T=235 °C, p_{max}=32 Bar, ar atbrīvošanu uzreiz pēc spiediena un temperatūras maksimuma sasniegšanas, t.i. izturēšanas laiks τ=0 min (paraugs KS-0)
3. Izstrādātajā TS metodes tehnoloģijā kaņepju spaļu apstrādē būtiskākais ir adiabātiskais process (otrā fāze – sprādziens), kas veic spaļu sašķiedrošanu, maksimāli saīsinot termoķīmisko procesu (pirmā fāze).
4. Optimālajos TS apstrādes apstākļos iegūtajam kaņepju spaļu beramam siltumizolācijas materiāla paraugam KS-0:
   - ✓ beramblīvums samazinās 2,3 reizes (salīdzinot ar kontroles paraugu - neapstrādātiem kaņepju spaļiem) līdz 43,5 $kg \cdot m^{-3}$,
   - ✓ masas zudumi - 2,4%,
   - ✓ mazākais smalkās frakcijas apjoms (10%),
   - ✓ termiskā difūcija (2,4–4,2 $\alpha \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot 10^{-1}$)
   - ✓ siltumvadītspēja 0,043 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (par 25% mazāka, salīdzinot ar, kontroles paraugu - neapstrādātiem kaņepju spaļiem)
5. Ar TS apstrāde iegūtā kaņepju spaļu beramā materiāla ar iestrādes blīvumu no 40 līdz 80 $kg \cdot m^{-3}$ siltumvadītspējas koeficients λ ir līdzvērtīgs tirgū esošajiem siltumizolācijas materiālu analogiem.
6. TS apstrādes parametru ietekme uz kaņepju spaļu beramās siltumizolācijas materiāla ugunsreakcijas un skaņas izolācijas īpašībām ir nebūtiska.
7. Optimālajos TS apstrādes apstākļos iegūtā kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla blīvuma paaugstināšana (līdz 100 $kg \cdot m^{-3}$) būtiski pasliktina tā siltuminerces un ugunsreakcijas rezultātus.
8. Optimālajos TS apstrādes apstākļos iegūtā kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla blīvumam robežās no 40 līdz 100 $kg \cdot m^{-3}$ nav būtiskas ietekmes siltumvadītspēju un uz skaņas izolācijas īpašībām.
9. Ekonomiskais izvērtējums rāda, ka optimālajos TS apstrādes apstākļos iegūtais kaņepju spaļu beramās siltumizolācijas materiāls ir konkurētspējīgs ne tikai nišas būvmateriālu tirgū, bet arī plašāka patēriņa tirgū tā zemo ražošanas pašizmaksu un labo siltumvadītspējas īpašību dēļ. Cenas un kvalitātes ziņā izstrādātais beramais siltumizolācijas materiāls konkurē pat ar minerālvati, turklāt tā priekšrocība ir augstāks ilgtspējības potenciāls, jo iegūts no atjaunīga resursa un ražošanas blakusproduktiem.

Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem un izdarītajiem secinājumiem, var apgalvot, ka promocijas darba mērķis ir sasniegts, un izvirzītā hipotēze – no kaņepju šķiedru ražošanas blakusproduktiem – kaņepju spaļiem – ar TS apstrādes metodi iespējams iegūt beramo siltumizolācijas materiālu ar līdzvērtīgām vai labākām siltumizolācijas īpašībām nekā komerciāli pieejamajiem analogiem siltumizolācijas materiāliem – ir apstiprinājusies.

REKOMENDĀCIJAS

1. Lai nodrošinātu ugunsreakcijas klasi, līdzīgu tirgū esošajiem analogiem, nepieciešams lietot vismaz 10% antipirēna (tetraborāts). Būtiski pievērst uzmanību kvalitatīvai antipirēnu uzstrādei.
2. Ņemot vērā izstrādātā siltumizolācijas materiāla augstos siltumietilpības un zemos siltuminerces rādītājus, materiālu veiksmīgi var izmantot jumta un ārsienu konstrukcijās karstā klimatā.
3. Izstrādāto siltumizolācijas materiālu izmantojot aukstā klimatā, ieteicams lietot tvaika difūzijas membrānas un ventilējamas fasādes.
4. Atbilstoši Latvijas būvnormatīvam par norobežojošo konstrukciju siltumtehniku, sienu konstrukcijas minimālais biezums 190 mm.
5. Atkarībā no pielietojuma – sienas, jumta vai horizontālajām konstrukcijām – ieteicamais iestrādes blīvums ir robežās no 60–80 kg m^{-3}.

Izmantotie informācijas avoti

1. A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. S., Slui, J., & ter, D. Templeton, and D. C. (2008). Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP). *Technical Report NREL/ TP -510 -42618*, *January*, 1–15. http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/42618.pdf
2. Abdou, A., & Budaiwi, I. (2013). The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construction and Building Materials*, *43*, 533–544. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.058
3. Abolins, J., & Gravitis, J. (2009). Energy from Biomass for Conversion of Biomass. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, *46*(5), 16–23.
4. Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, *40*(3), 353–366. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013
5. Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*, *68*, 2–16. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041
6. Andzs, M., Gravitis, J., Veveris, A., & Abolins, J. (2016). Biorefinery technology for biomass conversation to heat insulation material. *Proceedings for Poster Presentations of 14th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp*, 147–150.
7. Andzs, M., & Skrupskis, V. (2011). POSSIBLE USE OF HEMP AND WOOD IN PRODUCTION OF THE HEAT INSULATION MATERIALS. In *Rēzeknes Augstskola* (Vol. 1).
8. Arambakam, R., Tafreshi, H. V., & Pourdeyhimi, B. (2012). Analytical Monte Carlo Ray Tracing simulation of radiative heat transfer through bimodal fibrous insulations with translucent fibers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *55*(23–24), 7234–7246. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.049
9. Arambakam, R., Tafreshi, H. V., & Pourdeyhimi, B. (2014). Modeling performance of multi-component fibrous insulations against conductive and radiative heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *71*, 341–348. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.031
10. Arambakam, R., Vahedi Tafreshi, H., & Pourdeyhimi, B. (2013). A simple simulation method for designing fibrous insulation materials. *Materials and Design*, *44*, 99–106. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.058
11. AS Latvenergo. (1997). Elektrum Energoefektivitātes centrs. *Https://Www.Elektrum.Lv/Lv/Majai/Energoefektivitate/Energoefektivitates-Centru/Par-Centru/*.
12. Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, *4*, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002
13. Auriga, R., Pędzik, M., Mrozowski, R., & Rogoziński, T. (2022). Hemp Shives as a Raw Material for the Production of Particleboards. *Polymers*, *14*(23), 1–10. https://doi.org/10.3390/polym14235308
14. Auxenfans, T., Crônier, D., Chabbert, B., & Paës, G. (2017). Understanding the structural and chemical changes of plant biomass following steam explosion pretreatment. *Biotechnology for Biofuels*, *10*, 1–16. https://doi.org/10.1186/s13068-017-0718-z
15. Auxenfans, T., Crônier, D., Chabbert, B., Paës, G., Auxenfans, T., Crônier, D., Chabbert, B., Paës, G., Auxenfans, T., Crônier, D., Chabbert, B., & Paës, G. (2020). Understanding the structural and chemical changes of plant biomass following steam explosion pretreatment To cite this version : Biotechnology for Biofuels Understanding the structural and chemical changes of plant biomass following steam explosion pretre. *Biotechnology for Biofuels*, 0–16. https://doi.org/10.1186/s13068-017-0718-z

16. Avotniece, Z., Aņiskeviča, S., & Maļinovskis, E. (2017). Klimata pārmaiņu scenāriji Latvijai. *LVĢMC Ziņojums*, 231.
17. Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C., & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials and Design*, *47*, 424–442. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025
18. Babcock, L. W. (1932). *Method of producing fermentable sugars and alcohol from wood* (Patent No. U.S. Patent No. 1855464).
19. Bartlett, A. I., Hadden, R. M., & Bisby, L. A. (2019). A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *Fire Technology*, *55*(1), 1–49. https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y
20. Beltran, S. G., Kochova, L., Pugliese, G., & Sopoliga, P. (2009). Ēku energoefektivitāte ("Taupīga Enerģijas izmantošana skolā" (IUSES- Intelligent use of Energy at school). In *Tulkojums latv. val. Zeidmane.A.*
21. Berardi, U., & Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, *94*, 840–852. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029
22. Biswas, A. K., Yang, W., & Blasiak, W. (2011). Steam pretreatment of Salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production. *Fuel Processing Technology*, *92*(9), 1711–1717. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.04.017
23. Bodner, L. (2023). *COMMON REED PANELS*. EXTERNAL THERMAL INSULATION.
24. Bonini, C., Auria, M. D., Maggio, P. Di, & Ferri, R. (2007). *Characterization and degradation of lignin from steam explosion of pine and corn stalk of lignin : The role of superoxide ion and ozone*. *7*, 182–188. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.023
25. Borodiņecs, A., & Gaujēna, B. (2012). Metodika publisko ēku energoefektīvai projektēšanai un būvniecībai. *Valsts Pētījumu Programmas Projekta Nr. 2 „Latvijas Reģionu Energoresursu Daudzveidības Analīze Un Pasākumu Izstrāde Energoresursu Efektīvai Izmantošanai Nodrošinot Ilgtspējīgu Energoapgādi" 3. Posma 2. Darba Uzdevuma Galvenais Rezultāts*, *2*, 1–36.
26. Brazdausks, P., Puke, M., Rizhikovs, J., & Pubule, J. (2017). Evaluation of cellulose content in hemp shives after salt catalyzed hydrolysis. *Energy Procedia*, *128*(October), 297–301. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.316
27. Brazdausks, P., Tupciauskas, R., Andzs, M., Rizhikovs, J., Puke, M., Paze, A., Meile, K., & Vedernikovs, N. (2015). Preliminary Study of the Biorefinery Concept to Obtain Furfural and Binder-less Panels from Hemp (Cannabis Sativa L.) Shives. *Energy Procedia*, *72*, 34–41. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.006
28. Brüel&Kjær. (2006). *Impedance/Transmission Loss Measurement Tubes. Type 4206, The Four-microphone Method with PULSE Acoustic Material Testing software - Type 7758*.
29. Brzyski, P., Barnat-Hunek, D., Suchorab, Z., & Łagód, G. (2017). Composite Materials Based on Hemp and Flax for Low-Energy Buildings. *Materials*, *10*(510), 1–23. https://doi.org/10.3390/ma10050510
30. Bukšāns, E. (2010). *Koksnes materiālu ugunsdrošību ietekmējošie faktori un ugunsreakcijas prognozēšana*. Latvijas Lauksaimniecības Universitāte, Jelgava.
31. Būmane, I. (2009). Lauku Avīze, Nr.180. *Latvijā Top Kaņepju Nozare*, 13–15.
32. Cader Mhd Haniffa, M. A., Ching, Y. C., Abdullah, L. C., Poh, S. C., & Chuah, C. H. (2016). Review of bionanocomposite coating films and their applications. *Polymers*, *8*(7), 1–33. https://doi.org/10.3390/polym8070246
33. Calvo-Flores, F. G., & Martin-Martinez, F. J. (2022). Biorefineries: Achievements and challenges for a bio-based economy. *Frontiers in Chemistry*, *10*, 1–23. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.973417
34. Cantarella, M., Cantarella, L., Gallifuoco, A., Spera, A., & Alfani, F. (2004). Comparison of different detoxification methods for steam-exploded poplar wood as a substrate for the bioproduction of ethanol in SHF and SSF. *Process Biochemistry*, *39*(11), 1533–1542.

https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00285-1
35. Chen, H. (2015). *Lignocellulose Biorefinery Engineering*. Elsiever Woodhead Publishing.
36. Christiansen, L., Jensen, R. L., & Arthur, E. (2022). Heat and air transport in differently compacted fibre materials. *Industrial Textiles*, *51*(8), 1–14. https://doi.org/10.1177/1528083719900386
37. Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2023). A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*, *16*(12). https://doi.org/10.3390/en16124676
38. Diakité, M. S., Lenormand, H., Lequart, V., Arufe, S., Martin, P., & Leblanc, N. (2021). Cell wall composition of hemp shiv determined by physical and chemical approaches. *Molecules*, *26*, 6334. https://doi.org/10.3390/molecules26216334
39. Dikmen, N., & Elias Ozkan, S. T. (2016). Unconventional Insulation Materials. In A. Almusaed & A. Almssad (Eds.), *Insulation Materials in Context of Sustainability There* (p. 150). https://doi.org/10.5772/63311
40. Dittenber, D. B., & Gangarao, H. V. S. (2012). Composites : Part A Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A*, *43*(8), 1419–1429. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019
41. Dogan, M., Dilem, S., Atabek, L., & Ozcelik, G. (2021). Flame retardant effect of boron compounds in polymeric materials. *Composites Part B*, *222*(June), 109088. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109088
42. Ducoulombier, L., & Lafhaj, Z. (2017). Comparative study of hygrothermal properties of five thermal insulation materials. *Case Studies in Thermal Engineering*, *10*(September 2016), 628–640. https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.11.005
43. E.Windandy, Jerrold, B. R. (1991). Roof Temperatures in Simulated Attics. In *Research Paper FPL-RP-543*.
44. Eiropadome. (2014). *Klimata un enerģētikas politikas satvars laikposmam līdz 2030. gadam*. *EUCO 169/1*.
45. Eiropas Komisija. (2022). *Pārkārtošanās uz tīru enerģiju*.
46. Eiropas Komisija. (2023a). European Green Deal: EU agrees stronger rules to boost energy efficiency. *Preses Relīze*, *March 2023*, 10–11.
47. Eiropas Komisija. (2023b). *Hemp*. https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/hemp_lv
48. Eiropas Komisija. (2023c). *Regula par par konkrētu kontaminantu maksimālajiem līmeņiem pārtikā* ((ES) 2023/915).
49. Eiropas Savienības parlaments un padome. (2012). *Direktīva par energoefektivitāti 2012/27/ES*.
50. Eiropas Savienības parlaments un padome. (2018). *Direktīva par ēku energoefektivitāti 2018/844* (2018/844). 2018/844.
51. Eiropas Savienības Parlaments un padome. (2010). *Direktīva par ēku energoefektivitāti* (2010/31/ES).
52. Eiropas standartizācijas komiteja. (2022). LVS EN 13501-1:2022 Būvizstrādājumu un būvelementu ugunsreakcijas klasifikācija. 1.daļa: Klasifikācija pēc ugunsreakcijas testos iegūtiem datiem.
53. Eiropas standartizācijas komiteja. (2010a). LVS EN 13238:2010 Būvmateriālu ugunsreakcijas testi - Kondicionēšanas procedūras un vispārīgie noteikumi.
54. Eiropas standartizācijas komiteja. (2010b). LVS EN 15103:2005 EN Cietās biodegvielas. Tilpumblīvuma noteikšana.
55. Eiropas standartizācijas komiteja. (2014). LVS EN 12086:2014 Siltumizolācijas materiāli lietošanai būvniecībā.
56. Eiropas standartizācijas komiteja. (2022). LVS EN 13823:2022 Būvizstrādājumu ugunsreakcijas testi. Celtniecības izstrādājumi, izņemot grīdas segumus, kas pakļauti viena degoša priekšmeta termiskai iedarbībai.
57. Ekonomikas Ministrija. (2020). Ēku atjaunošanas ilgtermiņa stratēģija. *Informatīvais*

Ziņojums.
58. Essaghouri, L., Mao, R., & Li, X. (2023). Environmental benefits of using hempcrete walls in residential construction: An LCA-based comparative case study in Morocco. *Environmental Impact Assessment Review*, *100*, 107085. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107085
59. Eurostat. (2022). *Energy efficiency statistics*.
60. Fahy, F. (2001). *Transmission of Sound through Partitions*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012247665-5/50012-6.
61. FAO. (2023). Crop Prospects and Food Situation. *Quaterly Global Report*, *2*, 1-32.
62. Fedorik, F., Zach, J., Lehto, M., Kymäläinen, H. R., Kuisma, R., Jallinoja, M., Illikainen, K., & Alitalo, S. (2021). Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials. *Energy and Buildings*, *253*, 111528. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111528
63. Fļorovs, V., Kolangs, I., Puķītis, P., Šilters, E., & Vainovskis, E. (1985). *Fizikas rokasgrāmata*.
64. Frauenhofer-Gesellschaft. (2013). *Using cattails for insulation*. ScienceDaily.
65. Freivalde, L., & Ulme, A. (2009). Renewable Material Development in Area of Latvia. *RTU Scientific Journal. Material Science. Textile Ans Clothing Technology*, *4*, 63–67.
66. Gaujēna, B. (2013). *Ēku norobežojošo konstrukciju materiālu īpašību ietekme uz mikroklimatu telpās*. file:///C:/Users/134.telpa/Downloads/sum17441 (1).pdf
67. Glé, P., Gourdon, E., & Arnaud, L. (2012). Modelling of the acoustical properties of hemp particles. *Construction and Building Materials*, *37*, 801–811. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.008
68. Goodhew, S., & Griffiths, R. (2005). Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings*, *37*(5), 451–459. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.005
69. Gravitis, J. (1987). Review Theoretical and applied aspects of steam explosion of plant biomass (In russian). *Wood Chemistry*, *5*(0201–7474), 21.
70. Grāvītis, J., Āboliņš, J., Tupciauskas, R., Andžs, M., Vēveris, A., & Šutka, A. (2013). Self-Binding Composite Boards of Steam Exploded Wood Biomass. Prospects for Advancement. In *Sustainable Use of Local Resources (Entrails of the Earth, Forest, Food and Transport) – New Products and Technologies (NatRes). National Research Programme, 2010-2013*.
71. Gravitis, J., Zandersons, J., Vedernikov, N., Kruma, I., & Ozols-kalnins, V. (2004). *Clustering of bio-products technologies for zero emissions and eco-efficiency & 20*, 169–180. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.019
72. Guan, Y., Yan, J., Shan, Y., Zhou, Y., Hang, Y., Li, R., Liu, Y., Liu, B., Nie, Q., Bruckner, B., Feng, K., & Hubacek, K. (2023). Burden of the global energy price crisis on households. *Nature Energy*, *8*, 304–316. https://doi.org/10.1038/s41560-023-01209-8
73. Guo, M., Ni, M. Y., Shyu, R. J., Ji, J. S., & Huang, J. (2023). Automated simulation for household road traffic noise exposure: Application and field evaluation in a high-density city. *Computers, Environment and Urban Systems*, *104*, 102000. https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2023.102000
74. Gutex. (2024). GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH & Co. KG. *Https://Gutex.Co.Uk/Product-Range/Product-Properties/Insulation-in-Summer/*.
75. Halliwell, R. E., Nightingale, T. R. T., Warnock, A. C. C., & Birta, J. A. (1998). Gypsum Board Walls : Transmission Loss Data. In *Research Council Canada* (Issue June). https://doi.org/10.4224/20331556
76. Han, G., Deng, J., Zhang, S., Bicho, P., & Wu, Q. (2010). *Effect of steam explosion treatment on characteristics of wheat straw*. *31*, 28–33. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.08.003
77. Hart, A., & Summerscales, J. (2017). ScienceDirect ScienceDirect Effect of time at

temperature for natural fibres. *Procedia Engineering*, *200*, 269–275. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.038
78. Hemp Benchmarks. (2023). *The European Hemp Sector: A Market in Transition*.
79. Hemp Eco Systems. (2023). *http://hempecosystems.lv/tehnologija.html Hemp Eco Systems Latvia 2023 Kaņepju spaļu betona tehnoloģija*. Kaņepju Spaļu Betona Tehnoloģija.
80. Hempcrete. (2014). *HEMPCRETE BUILDINGS – THERMAL PERFORMANCE AND COSTS*.
81. Hiss Reet. (2023). *Kompānijas Hiss Reet Gmbh interneta vietne*. Https://Www.Hiss-Reet.de/En/.
82. Hongzhang Chen. (2015). Heat and mass transfer in the steam explosion process and its impact on the intensity factor. In *Lignocellulose Biorefinery Engineering Principles and Applications* (p. 253). Elsevier.
83. Horváthová, M., & Osvaldová, L. M. (2013). TESTING OF NATURAL INSULATION MATERIALS USING A CONICAL CALORIMETER. *Materials and Design*, *47*, 424–442. https://doi.org/https://doi.org/10.12955/pns.v1.115
84. Hosseini, S. A., & Shah, N. (2009). Multiscale modelling of hydrothermal biomass pretreatment for chip size optimization. *Bioresource Technology*, *100*(9), 2621–2628. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.030
85. HurdMAster. (2023). *https://hurdmaster.com/#inventor Hemp Micro-Decorticator HurdMaster 2023*. Hemp Micro-Decorticator.
86. Idumah, C.I., Hassan, A. (2016). Emerging trends in flame retardancy of biofibers , biopolymers , biocomposites , and bionanocomposites. *Reviews in Chemical Engineering*, *32 (1)*(1), 115–148. https://doi.org/10.1515/revce-2015-0017
87. International Organisation of Standardization. (2001). LVS ISO 8302:1991 Siltuma izolācija – Siltuma pretestība un ar to saistīto īpašību noteikšana stacionārā režīmā – Norobežotās karstās plāksnes ierīce.
88. International Organisation of Standardization. (2013). ISO 717-1:2013 Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation.
89. International Organisation of Standardization. (2015). LVS ISO 5660-1:2015 Ugunsdrošības testi - siltuma izdalīšanās, dūmu veidošanās un masas zuduma ātrums - 1. daļa: Siltuma izdalīšanās ātrums (konusa kalorimetra metode) un dūmu veidošanās ātrums (dinamiskā mērīšana). www.efectis.com
90. International Organisation of Standardization. (2021). LVS EN ISO 10140:1:2021 Akustika. Ēkas elementu skaņas izolācijas laboratoriskie mērījumi. 1. daļa: Piemērošanas noteikumi konkrētiem izstrādājumiem.
91. Iwarm-lv.techinfus.com, 2021. (2024). *Putu poliuretāna un citu celtniecības materiālu siltuma vadītspēja*. Https://Iwarm-Lv.Techinfus.Com/Uteplenie/Poliuretan-Teploprovodnost.Html.
92. J. António. (2011). 11 - Acoustic behaviour of fibrous materials. In R. Fangueiro (Ed.), *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications, Woodhead Publishing* (pp. 306–324). In Woodhead Publishing Series in Textiles.
93. Jakovičs, A. (2014). *Inovatīvi siltumizolācijas materiāli* (Vol. 2).
94. Jakovičs, A., Gendelis, S., Ozoliņš, A., Ratnieks, J., Džeriņš, J., Kļaviņš, J., & Čertoks, S. (2013). *Būvkonstrukciju energoefektivitāte un ilgtspēja latvijas klimatā* (Issue 2011).
95. Johansson, P. (2012). *Vacuum Insulation Panels in Buildings. Literature review*. 1–27.
96. Johnson, R. (2014). *Hemp as an agricultural commodity*.
97. Jönsson, L. J., & Martín, C. (2016). Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. *Bioresource Technology*, *199*, 103–112. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.009
98. Kalembkiewicz, J., Galas, D., Sitarz-palczak, E., & Samples, A. (2018). *The Physicochemical Properties and Composition of Biomass Ash and Evaluating Directions*

of its Applications. *27*(6), 2593–2603. https://doi.org/10.15244/pjoes/80870
99. Karche, T., & Singh, M. R. (2019). The application of hemp Cannabis sativa l. for a green economy: A review. *Turkish Journal of Botany*, *43*(6), 710–723. https://doi.org/10.3906/bot-1907-15
100. Khedari, J., Charoenvai, S., & Hirunlabh, J. (2003). New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, *38*, 435–441.
101. Khedari, J., Nankongnab, N., Hirunlabh, J., & Teekasap, S. (2004). New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, *39*(1), 59–65. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.08.001
102. Kļimovska, K. (2023). *Lauku Tīkls*. Kurzemē Noticis Seminārs Par Kaņepju Audzēšanu.
103. Komisija, E. (2020). *Jauns aprites ekonomikas rīcības plāns Par tīrāku un konkurētspējīgāku Eiropu* (COM(2020) 98 final).
104. Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, *43*(9), 2518–2523. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012
105. Kosny, J. D. W., Yarbrough, K., Wilkes, D. L., & Syad, A. (2006). PCM-Enhanced Cellulose Insulation - Thermal Mass in Lightweight Natural Fibres. In *2006 ECOSTOCK Conference IEA, DOE, Richard Stockton College of New Jersey*.
106. Laizāns, T. (2010). *Dabīgo šķiedraugu produktu perspektīvie virzieni*.
107. Lam, P. S. (2011). *Steam Explosion of Biomass To Produce Durable Wood Pellets* (Issue May) [THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA]. https://doi.org/10.14288/1.0059133
108. Latif, E., Tucker, S., Ciupala, M. A., Wijeyesekera, D. C., & Newport, D. (2014). Hygric properties of hemp bio-insulations with differing compositions. *Construction and Building Materials*, *66*, 702–711. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.021
109. Latvian Hemp Union. (2023). *Visaptveroša industriālās kaņepes biedrība*.
110. Law, A., Spinardi, G., & Bisby, L. (2023). The rise of the Euroclass: Inside the black box of fire test standardisation. *Fire Safety Journal*, *135*(July 2022), 103712. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103712
111. Lehner, S. (2005). European fire classification of construction products, new test method "SBI", and in- troduction of the European classification system into German building regulations. *Otto-Graf-Journal*, *16*, 16. https://www.semanticscholar.org/paper/EUROPEAN-FIRE-CLASSIFICATION-OF-CONSTRUCTION-%2C-NEW-Lehner/8a4eb21e8c4a795909ba5c9c4b0cd11d31912760
112. Lekshmi, M. S., Vishnudas, S., & Anil, K. R. (2023). Experimental investigation on acoustic performance of coir fiber and rice husk acoustic panels. *Applied Acoustics*, *204*, 109244. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109244
113. Līcītis, I. (2013). *RACIONĀLS STARPSIENAS RISINĀJUMS, GALVENAIS KRITĒRIJS TROKŠŅU CAURLAIDĪBA*. LLU.
114. Liitiä, T., Rovio, S., Talja, R., Tamminen, T., Rencoret, J., Gutiérrez, A., del Río, J. C., Sutka, A., Tupciauskas, R., Andzs, M., & Gravitis, J. (2014). Effect of steam explosion on fibre lignin structure for self-binding fiber boards. In *13th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp, EWLP 2014, June 24-27, 2014, Seville, Spain. Proceedings*.
115. LiveTextiles. (2019). *Fibre Research - Hemp https://livetextiles.online/new-blog/2018/7/16/fibre-research-hemp 2019 Live Textiles*. Fibre Research - Hemp.
116. LR Ekonomikas ministrija. (2011). Informatīvā kampaņa "Dzīvo siltāk." *Youtube Vietne*.
117. LR Ekonomikas Ministrija. (2010). Konkurss "Energoefektīvākā ēka Latvijā." *Www.Eneroefektivakaeka.Lv*.
118. LR Ministru kabinets. (2015b). Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 201-15 "Būvju ugunsdrošība." *Noteikumi Nr.333*.
119. LR Ministru kabinets. (2019b). Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 003-19 "Būvklimatoloģija." *Noteikumi Nr.432*.

120. LR Ministru kabinets. (2020). Par Rīcības plānu pārejai uz aprites ekonomiku 2020.-2027. gadam. *Rīkojums Nr.489*.
121. LR Ministru kabinets. (2023). *Tiešo maksājumu piešķiršanas kārtība lauksaimniekiem* (Noteikumi nr. 198).
122. LR Ministru kabinets. (2015a). Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 016-15 "Būvakustika." *Noteikumi Nr.312*.
123. LR Ministru kabinets. (2016a). Darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 4.2.1. specifiskā atbalsta mērķa "Veicināt energoefektivitātes paaugstināšanu valsts un dzīvojamās ēkās" 4.2.1.1. specifiskā atbalsta mērķa pasākuma "Veicināt energoefektivitātes paaugstināšanu dzīvojamās ēk. *Noteikumi Nr.160*.
124. LR Ministru kabinets. (2016b). Darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 4.2.2. specifiskā atbalsta mērķa "Atbilstoši pašvaldības integrētajām attīstības programmām sekmēt energoefektivitātes paaugstināšanu un atjaunojamo energoresursu izmantošanu pašvaldību ēkās" un 13.1.3. spec. *Noteikumi Nr. 152*.
125. LR Ministru kabinets. (2018). Darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 4.2.1. specifiskā atbalsta 4.2.1.2. pasākuma "Veicināt energoefektivitātes paaugstināšanu valsts ēkās" otrās mērķa "Veicināt energoefektivitātes paaugstināšanu valsts un dzīvojamās ēkās" projektu iesniegumu . *Noteikumi Nr. 13*.
126. LR Ministru kabinets. (2019a). Darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 4.1.1. specifiskā atbalsta mērķa "Veicināt efektīvu energoresursu izmantošanu, enerģijas patēriņa samazināšanu un pāreju uz AER apstrādes rūpniecības nozarē" trešās projektu iesniegumu atlases kārtas īstenoš. *Noteikumi Nr. 506*.
127. LR Ministru kabinets. (2020a). Latvijas stratēģija klimatneitralitātes sasniegšanai līdz 2050. gadam. *Informatīvais Ziņojums*.
128. LR Ministru kabinets. (2020b). *Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 002-01 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika."*
129. LR Ministru kabinets. (2020c). Par Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021.–2030. gadam. Ministru kabineta rīkojums Nr. 46. *Latvijas Vēstnesis, Nr.29, 11.Feb.*
130. LR Pārresoru koordinācijas centrs. (2021). *ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķi Latvijā*.
131. LR Saeima. (1996). Narkotisko un psihotropo vielu un zāļu, kā arī prekursoru likumīgās aprites likums. *Latvijas Vēstnesis*, *89*.
132. LR Saeima. (2012). Ēku energoefektivitātes likums. *Latvijas Vēstnesis*, *201*.
133. LR Saeima. (2017). *Latvijas valsts Būvniecības likuma 9. pantā. Būtiskas būvei izvirzāmās prasības*. Skatīts 23.10.2023. https://likumi.lv/ta/id/258572-buvniecibas-likums/redakcijas-datums/2017/07/10
134. LR Zemkopības Ministrija. (2023). *Kaņepes*.
135. Luamkanchanaphan, T., Chotikaprakhan, S., & Jarusombati, S. (2012). A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers. *APCBEE Procedia*, *1*(January), 46–52. https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.009
136. *Mācību platforma "uzdevumi.lv."* (2023).
137. Maleviti, E. (2011). *Recent developments in energy and environmental research.* (E. Maleviti (Ed.)). ATHENS INST FOR EDUC RES.
138. Manohar, K. (2012). Experimental Investigation of Building Thermal Insulation from Agricultural By-products. *British Journal of Applied Science & Technology*, *2*(3), 227–239. https://doi.org/10.9734/bjast/2012/1528
139. Manohar, K., Ramlakhan, D., Kochhar, G., & Haldar, S. (2006). Biodegradable fibrous thermal insulation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *28*(1), 45–47. https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000100005
140. Mason, W. H. (1926). *Process and apparatus for disintegration of wood and the like.*
141. Mason, W. H., & Laurel, O. F. (1926). *Low-temperature explosion process of disintegrating wood and the like* (Patent No. US 1586159 A).

142. *Masonite Company History Timeline*. (2023).
143. Masonite Corporation. (1931). *Masonite structural insulation, insulating lath, quarterboard, pressed wood*.
144. Masonite Corporation. (1935). *Structural insulation*. Masonite Corporation.
145. Moscariello, C., Matassa, S., Esposito, G., & Papirio, S. (2021). From residue to resource: The multifaceted environmental and bioeconomy potential of industrial hemp (Cannabis sativa L.). *Resources, Conservation and Recycling*, *175*(July), 105864. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105864
146. Negro, M. J., Manzanares, P., Oliva, J. M., Ballesteros, I., & Ballesteros, M. (2003). *Changes in various physical / chemical parameters of Pinus pinaster wood after steam explosion pretreatment*. *25*, 301–308. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00017-5
147. Niemi, P., Pihlajaniemi, V., Rinne, M., & Siika-aho, M. (2017). Production of sugars from grass silage after steam explosion or soaking in aqueous ammonia. *Industrial Crops and Products*, *98*(Supplement C), 93–99. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.022
148. Nováková, P. (2018). Use of technical hemp in the construction industry. *MATEC Web of Conferences*, *146*, 1–8. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814603011
149. Noviks, J. (2002). *Būvdarbi IV* (B. Aivars (Ed.)). ISAVE.
150. Obuka, V., Korjakins, A., Brencis, R., & Purmalis, O. (2013). Sapropeļa kūdras , sapropeļa kokskaidu siltumizolācijas plāksnes un to īpašības. *Materials Science and Applied Chemistry*, *April 2014*. https://doi.org/10.7250/msac.2013.029
151. Oficiālās Statistikas Portāls. (2023). *https://stat.gov.lv/lv Oficiālās statistikas portāls 2023*.
152. Oguaka, A., Quiroz, N. F., & Walls, R. (2023). Fire parameters , behavior , and comparative thermal hazard of food grains based on the cone calorimeter tests. *Process Safety and Environmental Protection*, *179*(April), 928–940. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.078
153. Overend, R. P., Chornet, E., & Gascoigne, J. a. (1987). Fractionation of Lignocellulosics by Steam-Aqueous Pretreatments [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *321*(1561), 523–536. https://doi.org/10.1098/rsta.1987.0029
154. Paiva, A., Pereira, S., Sá, A., Cruz, D., Varum, H., & Pinto, J. (2012). A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*, *45*, 274–279. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019
155. Pal, L., & Lucia, L. (2019). Renaissance of industrial hemp: A miracle crop for a multitude of products. *BioResources*, *14*(2), 2460–2464.
156. Panyakaew, S., & Fotios, S. (2011). New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings*, *43*(7), 1732–1739. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.015
157. Papadopoulou, E., Bikiaris, D., Chrysafis, K., Wladyka-Przybylak, M., Wesolek, D., Mankowski, J., Kolodziej, J., Baraniecki, P., Bujnowicz, K., & Gronberg, V. (2015). Value-added industrial products from bast fiber crops. *Industrial Crops and Products*, *68*, 116–125. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.028
158. Paroc. (2021). *Būvēju siltu māju 11, PAROC rokasgrāmata projektētājiem un celtniekiem*. 162.
159. Pārresoru koordinācijas centrs. (2020). *Latvijas Nacionālās attīstības plāns 2021.-2027. gadam*. 127.
160. Piatkiewicz, W., Narloch, P., & Pietruszka, B. (2020). Influence of hemp-lime composite composition on its mechanical and physical properties. *Archives of Civil Engineering*, *66*(3), 487–503. https://doi.org/10.24425/ace.2020.134409
161. Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A., Pereira, S., Tavares, P., Fernandes, L., & Varum, H. (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials*, *34*, 28–33. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014

162. Pinto, J., Paiva, A., Varum, H., Costa, A., Cruz, D., Pereira, S., Fernandes, L., Tavares, P., & Agarwal, J. (2011). Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Energy and Buildings*, *43*, 1985–1990. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.004
163. Pleikšnis, S., & Teirumnieka, Ē. (2014). *Sapropeļa un kaņepju spaļu betons ēku siltumizolācijai* (Patent No. 14869).
164. Putniņa, A., Kukle, S., & Grāvītis, J. (2013). Extraction of highly purified microfibrils from the renewable resources by using green technology. *Energetika*, *59*(1), 20–25. https://doi.org/10.6001/energetika.v59i1.2616
165. Putu, N., Suardana, G., Seuck, M., & Kyoo, J. (2011). Effects of diammonium phosphate on the flammability and mechanical properties of bio-composites. *Materials and Design*, *32*(4), 1990–1999. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.069
166. Radmanović, K., Đukić, I., & Pervan, S. (2017). Specific Heat Capacity of Wood. *Drvna Industrija*, *65 (2)*(June), 151–157. https://doi.org/10.5552/drind.2014.1333
167. Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., Davison, B. H., Dixon, R. a, Gilna, P., Keller, M., Langan, P., Naskar, A. K., Saddler, J. N., Tschaplinski, T. J., Tuskan, G. a, & Wyman, C. E. (2014). Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. *Science (New York, N.Y.)*, *344*(6185), 1246843. https://doi.org/10.1126/science.1246843
168. Ragauskas, A. J., Williams, C. K., Davison, B. H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C. a, Frederick, W. J., Hallett, J. P., Leak, D. J., Liotta, C. L., Mielenz, J. R., Murphy, R., Templer, R., & Tschaplinski, T. (2006). The path forward for biofuels and biomaterials. *Science (New York, N.Y.)*, *311*(5760), 484–489. https://doi.org/10.1126/science.1114736
169. Ramanaiah, K., Ratna Prasad, A. V., & Hema Chandra Reddy, K. (2011). Thermal and mechanical properties of sansevieria green fiber reinforcement. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, *16*(8), 602–608. https://doi.org/10.1080/1023666X.2011.622358
170. Ratnieks, J. (2014). *Silta fizika aukstā laikā*.
171. Richard, A. (1996). *Insulation Handbook*. McGraw-Hill (November 8, 1996). https://doi.org/10.1036/0071414614
172. ROCKWOOL. (2023). *Skaņas izolācijas nozīme ēkās*.
173. Santoni, A., Bonfiglio, P., Fausti, P., Marescotti, C., Mazzanti, V., Mollica, F., & Pompoli, F. (2019). Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres. *Applied Acoustics*, *150*, 279–289. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.022
174. Sasaki, C. A. C., & Nakamura, A. S. Y. (2017). Total Biorefinery Process of Lignocellulosic Waste Using Steam Explosion Followed by Water and Acetone Extractions. *Waste and Biomass Valorization*, *0*(0), 0. https://doi.org/10.1007/s12649-017-0157-x
175. Schartel, B., & Hull, T. R. (2007). *Development of fire-retarded materials — Interpretation of cone calorimeter data*. *May*, 327–354. https://doi.org/10.1002/fam
176. Schnabel, T., Huber, H., Petutschnigg, A., & Jäger, A. (2019). Analysis of plant materials pre-treated by steam explosion technology for their usability as insulating materials. *Agronomy Research*, *17*(S1), 1191–1198. https://doi.org/10.15159/AR.19.061
177. Seddeq, H. S., & Aly, N. M. (2012). *Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials*. *43*(1), 56–73. https://doi.org/10.1177/1528083712446956
178. Sertolli, A., Gabnai, Z., Lengyel, P., & Bai, A. (2022). Biomass Potential and Utilization in Worldwide Research Trends—A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, *14*, 5515. https://doi.org/10.3390/su14095515
179. Shamsipour, M., Zaredar, N., Monazzam, M. R., Namvar, Z., & Mohammadpour, S. (2022). Burden of diseases attributed to traffic noise in the metropolis of Tehran. *Environmental Pollution*, *301*(January), 119042. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119042

180. Sihabut, T., & Laemsak, N. (2010). Feasibility of producing insulation boards from oil palm fronds and empty fruit bunches. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, *32*(1), 63–69.
181. Silveira, M. H. L., Morais, A. R. C., Da Costa Lopes, A. M., Olekszyszen, D. N., Bogel-Łukasik, R., Andreaus, J., & Pereira Ramos, L. (2015). Current Pretreatment Technologies for the Development of Cellulosic Ethanol and Biorefineries. *ChemSusChem*, *8*(20), 3366–3390. https://doi.org/10.1002/cssc.201500282
182. Šķietniece, I. (2023). Žurnāls "IR." *Latvijas Zelts*.
183. Skujans, J., Lljins, U., Ziemelis, I., Gross, U., Osītis, N., Brencis, R., Veinbergs, A., & Kukuts, O. (2010). Experimental research of foam gypsum acoustic absorption and heat flow. *Chemical Engineering Transactions*, *19*, 79–84.
184. Soret, G. M., Vacca, P., Tignard, J., Hidalgo, J. P., Maluk, C., Aitchison, M., & Torero, J. L. (2021). Thermal inertia as an integrative parameter for building performance. *Journal of Building Engineering*, *33*(December 2019), 101623. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101623
185. Soundproofing Company INC. (2023). *Understanding STC and STC Ratings*.
186. Steinbach, D., Kruse, A., Sauer, J., & Storz, J. (2020). Is steam explosion a promising pretreatment for acid hydrolysis of lignocellulosic biomass? *Processes*, *8*, 1626. https://doi.org/10.3390/pr8121626
187. Stelte, W. (2013). Steam explosion for biomass pre-treatment. *Danish Technological Institute*.
188. Steven M. Shepard. (2018). Comprehensive Composite Materials II. *Comprehensive Composite Materials II*, *7*, Pages 250-269.
189. Štrausa, S., Ziemeļniece, A., Brencis, R., & Vulāns, A. (2011). *Ēku energoefektivitāte klimata maiņas apstākļos*.
190. Struik, P. C., Amaducci, S., Bullard, M. J., Stutterheim, N. C., Venturi, G., & Cromack, H. T. H. (2000). Agronomy of fibre hemp (Cannahis satira L.) in Europe. *Industrial Crops and Products*, *11*, 107–118. https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00048-5
191. Taban, E., Khavanin, A., Ohadi, A., Putra, A., Jafari, A. J., Faridan, M., & Soleimanian, A. (2019). Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibres: Experimental and theoretical approaches. *Building and Environment*, *161*, 106274.
192. Tangjuank, S. (2011). Thermal insulation and physical properties of particleboards from pineapple leaves. *International Journal of Physical Sciences*, *6*(19), 4528–4532. https://doi.org/10.5897/IJPS11.1057
193. TAPPI. (1999). TAPPI 280 pm Acetone Extractives of Wood and Pulp, Test Method.
194. TAPPI. (2006). TAPPI 222 om (2011) Acid-insoluble lignin in wood and pulp, Test Method.
195. TAPPI. (2015). TAPPI 211om – 22 Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 C.
196. Teirumnieka, Ē. (2023). *KAŅEPJU ATTĪSTĪBAS ILGTSPĒJA ENERĢĒTIKĀ UN CITĀS TAUTSAIMNIECĪBAS NOZARĒS*. Rīgas Tehniskā Universitāte.
197. Thek, G., & Obernberger, I. (2010). *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Pellets*. Routlledge, London. https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781849775328
198. Titirici, M. M., Antonietti, M., & Baccile, N. (2008). Hydrothermal carbon from biomass: A comparison of the local structure from poly- to monosaccharides and pentoses/hexoses. *Green Chemistry*, *10*, 1204–1212.
199. Tunte, L. (2011). Energoaudits. *Māja Dzīvoklis*, *11*(000701175), 74.
200. Tupciauskas, R., Berzins, A., Pavlovics, G., Bikovens, O., Filipova, I., Andze, L., & Andzs, M. (2023a). Optimization of Thermal Conductivity vs. Bulk Density of Steam-Exploded Loose-Fill Annual Lignocellulosics. *Materials*, *16*(10). https://doi.org/10.3390/ma16103654

201. Tupciauskas, R., Berzins, A., Pavlovics, G., Bikovens, O., Filipova, I., Andze, L., & Andzs, M. (2023b). Optimization of Thermal Conductivity vs. Bulk Density of Steam-Exploded Loose-Fill Annual Lignocellulosics. *Materials*, *16*, 1–16.
202. Tupciauskas, R., Gravitis, J., Belkova, L., & Tuherm, H. (2010). Grey alder fibreboard processed by modified steam explosion unit. In Z. Gaile (Ed.), *Annual 16th international Scientific Conference Proceedings Research for Rural Development"* (Vol. 1, pp. 248–254). LLU.
203. UNEP. (2023). *UNEP*. United Nations Environment Programme.
204. Van De Riet, D. (2019). *Evaluating Steam Explosion as Pre-treatment of Hemp Fibres for Use in High Value Products*. University of Groningen.
205. Vandenbossche, V., Rigal, L., Saiah, R., & Perrin, B. (2012). New agro-materials with thermal insulation properties. *Proceedings of the 18th International Sunflower Conference*, 949–954.
206. Vedernikovs, N., Kampars, V., Puke, M., & Kruma, I. (2010). Changes in the Birch Wood Lignocellulosic Composition in the Pretreatment Process. *Scientific Journal of Riga Technical University*, *22*, 68–73.
207. Velvizhi, G., Balakumar, K., Shetti, N. P., Ahmad, E., Kishore Pant, K., & Aminabhavi, T. M. (2022). Integrated biorefinery processes for conversion of lignocellulosic biomass to value added materials: Paving a path towards circular economy. *Bioresource Technology*, *343*(September 2021), 126151. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126151
208. Von Hans Koret, W. (2002). Holzfaserdammstoff nach dem super-Trockenverfahren. In *Holz-Zentralblatt* (Vols. 110, seite).
209. Vulāns, A. (2011). Cik vērta ir būvprojektu energoefektivitātes sadaļas detalizēta izstrāde ? *Būvinženieris*, *19*(19), 38–41.
210. Walls, R., & Zweig, P. J. (2017). *Towards sustainable slums : understanding fire engineering in informal settlements*. *October*, 0–5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48725-0
211. Wang, F., Junliang, L., & Wenhua, L. (2017). Thermal degradation and fire performance of wood treated with PMUF resin and boron compounds. *Fire and Materials*, *41*(September 2016), 1051–1057. https://doi.org/10.1002/fam.2445
212. Wang, H., Liu, Z., Hui, L., Zheng, X., Li, J., & Zhang, Y. (2020). Understanding the structural changes of lignin in poplar following steam explosion pretreatment. *Holzforschung*, *74*(3), 275–285.
213. Wang, J., Bras, R. L., Sivandran, G., & Knox, R. G. (2010). A simple method for the estimation of thermal inertia. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, *37*, 1–5. https://doi.org/10.1029/2009GL041851
214. World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European region*.
215. Yang, X. Y. (1991). Cultivation history of hemp, sesame and flax in China. *Agricultural Archaeology*, *3*, 267–274.
216. Yarbrough, D. W., Wilkes, K. E., Olivier, P. A., Graves, R. S., & Vohra, A. (2005). Apparent Thermal Conductivity and Related Information for Rice Hulls and Crushed Pecan Shell. *Thermal Conductivity*, *27*, 222–230.
217. Yu, Y., Wu, J., Ren, X., Lau, A., Rezaei, H., Takada, M., Bi, X., & Sokhansanj, S. (2022). Steam explosion of lignocellulosic biomass for multiple advanced bioenergy processes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *154*(January 2021), 111871. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111871
218. Yuan, Q., Zheng, W., Paul, A., Zhang, H., Bu, Y., Li, C., Liu, Z., Chen, H., Li, G., & Yuan, C. (2023). Journal of Loss Prevention in the Process Industries An investigation on minimum ignition energy (MIE) and thermodynamic analysis of typical fibrous dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *86*(April), 105179. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105179

219. Zach, J., Slávik, R., & Novák, V. (2016). Investigation of the Process of Heat Transfer in the Structure of Thermal Insulation Materials Based on Natural Fibres. *Procedia Engineering*, *151*, 352–359. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.389
220. Zhang C, Li H, G. J. (2022). The review of fiber-based sound-absorbing structures. *Textile Research Journal*, *Volume 93*(1–2), 434–449. https://doi.org/10.1177/00405175221084736
221. Zhang, Y., Zhang, G., Wei, M., Gao, Z., & Tian, M. (2019). *Comparisons of Acid and Water Solubilities of Rice Straw Ash Together with Its Major Ash-Forming Elements at Different Ashing Temperatures : An Experimental Study*. https://doi.org/10.3390/su11071989
222. Zhou, X., Zheng, F., Li, H., & Lu, C. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and BuildingsBuildings*, *42*, 1070–1074. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.020
223. Zhuang, J., Li, M., Pu, Y., Ragauskas, A. J., & Yoo, C. G. (2020). Observation of Potential Contaminants in Processed Biomass Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Applied Science*, *10*, 1–13.
224. Zommere, G., Vilumsone, A., Kalnina, D., Solizenko, R., & Stramkale, V. (2013). Comparative Analysis of Fiber Structure and Cellulose Contents in Flax and Hemp Fibres. *Materials Science. Textile and Clothing Technology*, *8*, 96–104. https://doi.org/10.7250/mstct.2013.016
225. Гравитис, Я. А. (1987). Теоретические и прикладные аспекты метода взрывного автогидролиза растительной биомассы. Абзор. *Химия Древесины*, *5:3 – 21*, 21.

PIELIKUMS

TEHNISKI EKONOMISKĀ PRIEKŠIZPĒTE

PROJEKTAM

„LIGNOCELULOZES BERAMĀ SILTUMIZOLĀCIJAS MATERIĀLA IEGŪŠANAS TEHNOLOĢIJAS KOMERCIALIZĀCIJA”

PIELIKUMS

Projekta Nr.: KC-PI-2020/13

Līguma ar LIAA Nr.: KC-L-2017/7

Rīga

2020

Saturs

Izmantotie termini un saīsinājumi 3
Kopsavilkums 4
1. Produkta analīze 6
1.1. Produkta apraksts 6
1.2. Projekta nozare 9
1.3. Tehnoloģijas apraksts 10
1.4. Produkta pielietojums 13
1.5. Produkta analogi un aizvietotāji 14
1.6. SVID analīze 17
1.7. Risku analīze 18
2. Tirgus analīze 20
2.1. Tirgus izmērs 20
2.2. Izejmateriālu pieejamība 22
2.3. Mērķa tirgus analīze 28
2.4. Pieprasījuma prognoze 31
3. Intelektuālā īpašuma tiesību aizsardzība 33
4. Sadarbība ar citām zinātniskajām institūcijām un komersantiem 34
5. Ekonomiskais pamatojums 35
5.1. Produkta attīstībai nepieciešamie resursi un izmaksas 35
5.2. Finanšu un ekonomiskie pieņēmumi 35
5.3. Produkta pašizmaksas aprēķins 37
5.4. Produkta cena 38
5.5. Izmaksu – ieguvumu analīze 39
5.6. Jūtīguma analīze 41
Secinājumi 43
Pielikumi 44

PIELIKUMS

Izmantotie termini un saīsinājumi

ASV – Amerikas Savienotās Valstis

B2B – *Business to business*

CAGR - *compound annual growth rate* (angļu val.) - saliktais gada pieauguma temps

ENEA - ENEA - Centro Ricerche Trisaia - S.S. (pētniecības institūts Itālijā, kas specializējas tvaika sprādziena tehnoloģijas attīstībā)

ERAF – Eiropas Reģionālās attīstības fonds

ES – Eiropas Savienība

EUR – *euro*

IIT – intelektuālā īpašuma tiesības

kg – kilogrami

LIAA – Latvijas Investīciju un attīstības aģentūra

LR – Latvijas Republika

LVKĶI – Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūts

m^3 – kubikmetri

PCT - *Patent Cooperation Treaty* (angļu val.)

Projekts – projekts "Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas komercializācija"

RIS3 – Latvijas viedās specializācijas stratēģija

t – tonnas

TEP – tehniski ekonomiskā priekšizpēte

TS – tvaika sprādziens

GOS – *volatile organic compound* (angļu val.) – gaistoši organiski savienojumi

PIELIKUMS

Kopsavilkums

TEP "Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas komercializācija" **mērķis** bija veikt potenciāli jauna produkta (lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla) un potenciāli jaunas tehnoloģijas (lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas ar tvaika sprādziena metodi) ieviešanas novērtējumu un analīzi, lai objektīvi un racionāli apzinātu jaunā produkta un tehnoloģijas priekšrocības, trūkumus, iespējas un draudus, kā arī noteiktu komercializācijas īstenošanai vajadzīgos resursus un īstenošanas izredzes.

Tehniski ekonomiskās priekšizpētes **uzdevumi** bija:

1) Veikt jaunā produkta analīzi;
2) Veikt analogo produktu tirgus un potenciālā noieta tirgus analīzi;
3) Analizēt intelektuālā īpašuma tiesību aizsardzības pasākumus;
4) Analizēt līdzšinējo un plānoto sadarbību ar citām pētniecības organizācijām un komersantiem;
5) Veikt produkta komercializācijas izmaksu – ieguvumu analīzi.

Tehniski ekonomiskā priekšizpēte ir veikta saskaņā EK Regulas Nr. 651/2014 2. panta 87. punkta definīciju, kā arī saskaņā ar 25.10.2016. Ministru kabineta noteikumiem Nr. 692 "Darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 1.2.1. specifiskā atbalsta mērķa "Palielināt privātā sektora investīcijas P&A" 1.2.1.2. pasākuma "Atbalsts tehnoloģiju pārneses sistēmas pilnveidošanai" īstenošanas noteikumi".

Tehniski ekonomiskā priekšizpēte tika veikta no 01.04.2020. līdz 30.09.2020.

Dokumentā analizētais potenciāli jaunais produkts (lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls) un potenciāli jaunā tehnoloģija (lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģija ar tvaika sprādziena metodi) **atbilst divām RIS3 specializācijas jomām** - Viedie materiāli, tehnoloģijas un inženiersistēmas un Zināšanu ietilpīga bioekonomika. Tādējādi, lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas izpēte ir starpdisciplināra. Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ieviešana ražošanā Latvijas tautsaimniecības nozarēs ar augstu pievienoto vērtību veicinās Latvijas komersantu starptautiskās konkurētspējas celšanos un to iekļūšanu jaunos ārvalstu tirgos. Taču LVKĶI izskatīs iespēju komercializēt jauno produktu un tehnoloģiju arī Eiropas un pasaules tirgos.

Produktam un tehnoloģijai ir augsts novitātes līmenis – šobrīd tirgū nav pieejams siltumizolācijas materiāls, kas iegūts, izmantojot tvaika sprādziena tehnoloģiju. Augsto produkta novitāti apliecina iegūtais Latvijas patents nr. LV 15328 (skat. Pielikumā Nr. 1) un projekta komandas izstrādātie zinātniskie raksti (skat. Pielikumā Nr. 2). Produkta komercializācijā tiks izmantoti LVKĶI iepriekš veikto pētījumu rezultāti.

Šobrīd komercializējamais produkts – lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls – ir izstrādāts līdz TRL4 līmenim. Tehnoloģija ir validēta mākslīgā (laboratorijas) vidē. LVKĶI ir ieguvis siltumizolācijas materiāla paraugus nelielos apjomos laboratorijas apstākļos, izmantojot 0,5l tvaika sprādziena iekārtu. Komercializācijas projekta 2.posmā plānots izstrādāt produktu līdz TRL6 līmenim. Projekta 2.posmā tiks saražotas siltumizolācijas materiāla pilotpartijas, testējot tehnoloģiju pilotražotnes līmenī un pārbaudot produkta īpašības reālā darbības vidē (koka karkasa mājās).

Komercializējamā produkta – lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla – **novešanai no pašreizējā TRL4 līdz komercializējamam TRL6 līmenim ir nepieciešami 305 510,43 euro.** Līdzekļus plānots piesaistīt, izmantojot ERAF līdzfinansējumu 1.2.1.2. pasākuma "Atbalsts tehnoloģiju pārneses sistēmas pilnveidošanai" ietvaros un citu publisko finansējumu (LVKĶI bāzes finansējumu). Komercializācijas projekta 2.posmā plānots īstenot **tikai tādas darbības, kurām nav saimnieciska rakstura.**

- Komercializācijas projekta 2.posmā tiks iesaistīti vismaz 5 LVKĶI esošie darbinieki:
- Projekta zinātniskais vadītājs Dr.sc.ing. Ramūnas Tupčiauskas, kas ir patenta LV 15328 (skat. Pielikumā nr. 1) līdzautors un vairāku zinātnisko publikāciju par projekta tēmu līdzautors

PIELIKUMS

(zinātniskās publikācijas skat. Pielikumā Nr. 2). Vadījis līgumpētījumu izstrādi industrijas partneriem. Ramūnas Tupčiauskas strādā pētnieka amatā LVKĶI kopš 2012. gada 11.maija, bet kopš 2020. gada 22.jūlija ievēlēts vadošā pētnieka amatā.

- Komercializācijas eksperts Mg.sc.ing. Mārtiņš Andžs kas ir patenta LV 15328 līdzautors un daudzu zinātnisko publikāciju par projekta tēmu līdzautors (zinātniskās publikācijas skat. Pielikumā Nr. 2). Pieredzējis uzņēmējs ar praktisku pieredzi jaunu produktu un tehnoloģiju komercializācijā.
- Finanšu analītiķe un projekta administratīvā vadītāja Mg.oec Karīna Orlova ar 10 gadu pieredzi ES struktūrfondu finansēto projektu vadībā, komercializācijā un uzņēmējdarbībā. Vadījusi komercializācijas un ES struktūrfondu līdzfinansētos projektus gan zinātniskajās institūcijās, gan privātos uzņēmumos. Specializējusies zinātnes projektu un ražošanas infrastruktūras projektu vadībā.
- Divi zinātniskie asistenti.

Projekts atbilst tautsaimniecības transformācijas virzienam "Nākotnes izaugsmes nozares, kurās eksistē vai var rasties produkti un pakalpojumi ar augstu pievienoto vērtību", 2.prioritātei "Jaunu produktu/ pakalpojumu pastāvīga meklēšana, kuras ietvaros ir nepieciešams radīt efektīvu identifikācijas sistēmu, kas spēj atrast un sniegt atbalstu jaunu produktu radīšanai esošo nozaru un starpnozaru ietvaros, kā arī veidot jaunas nozares ar augstu izaugsmes potenciālu".

Tehniski ekonomiskās priekšizpētes rezultātā **tika secināts**, ka lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls ir **produkts ar augstu komercializācijas potenciālu**. Lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls ir dabisks no atjaunojamiem dabas resursiem un ražošanas blakusproduktiem izgatavots materiāls, kas ir nekaitīgs cilvēka veselībai. Produkta komercializācijai vērā ņemami šķēršļi nepastāv. Komercializējamajam produktam (lignocelulozes beramajam siltumizolācijas materiālam) **var būt būtiska nozīme strauji augošu tirgu paplašināšanā, kā dēļ tam ir īpaši augsts investīciju piesaistes potenciāls**.

PIELIKUMS

1. Produkta analīze

1.1. Produkta apraksts

Projektā komercializējamais produkts ir **lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls**, kas iegūts no kaņepju spaļiem vai baltalkšņa šķeldām. Produkts ir dabisks berams siltumizolācijas materiāls, kas paredzēts visa veida dzīvojamo un nedzīvojamo ēku konstrukciju siltināšanai.

Nozarē konstatētās problēmas:

1) Ēku energoefektivitātes problēma

Šobrīd vairs gandrīz nevienam nav šaubu, ka globālā sasilšana ir reāla un ka to izraisa oglekļa dioksīda (CO_2) daudzuma palielināšanās atmosfērā. Skaidri redzama korelācija starp CO_2 un citu siltumnīcas efektu izraisošu gāzu daudzuma pieaugumu un globālu temperatūras paaugstināšanos. Oglekļa dioksīds galvenokārt rodas, sadedzinot fosilos energoresursus – galvenie piesārņotāji ir rūpniecība, transports un mājoklis. Tieši CO_2 izmeši, kas rodas sakarā ar ēku ekspluatāciju (apkure, elektrība), veido lielu daļu no kopējā CO_2 daudzuma – Latvijā tas ir ap 36 % , kas ir vidējs rādītājs attīstīto un jaunattīstības valstu vidū, Lielbritānijā 50%, Kanādā 45% , ASV 40%, Ķīnā 20%[1].

Būvniecības nozarē no siltumizolācijas ir atkarīga ēkas energoefektivitāte, ekoloģiskums un komforta sajūta tajā[2]. Pašlaik galvenie siltumizolācijas materiāli, kas tiek izmantoti būvniecībā, ietver minerālvates (stikla vai akmens), putu polistiroli, putu poliuretānus un beramo celulozi. Siltumizolācijas materiāli mēdz būt dažādu veidu: paklāja jeb ruļveida (minerālvates), plākšņu (minerālvates, putu materiāli) un beramie (celuloze, minerālvates). Pastāv arī alternatīvie siltumizolācijas materiāli, tādi kā kokšķiedras un citu augu šķiedras, aitas vilna, korķa koka miza, perlīts un citi, kurus ražo ierobežoti, pārsvarā, augstāku izmaksu dēļ[3]. Ir zināms, ka, plaši izmantojamie minerālie siltumizolācijas materiāli ir ļoti energoietilpīgi, t.i. ar augstām ražošanas izmaksām vai arī negatīvu ietekmi uz vidi, tāpēc, arvien lielāku interesi būvniecības nozarē izraisa videi draudzīgi siltumizolācijas materiāli iegūti no atjaunojamiem resursiem ar zemām ražošanas izmaksām[4].

Aizvien augošais būvmateriālu tirgus un pieprasījums pēc "zaļākiem" būvmateriāliem ar zemāku GOS emisiju līmeni liek ražotājiem ieviest jaunus, inovatīvus būvmateriālu veidus.

2) Ražošanas blakusproduktu efektīvas izmantošanas problēma

Kaņepju šķiedru pārstrādātāji šobrīd saskaras ar problēmu kaņepju spaļu realizācijā – no novāktas un izkaltētas kaņepju biomasas šobrīd lietderīgi izmantojami ir tikai 25%-30%: kaņepju sēklas (pārtikas pārstrādē, kosmētikā) un kaņepju šķiedras (tekstila rūpniecībā). Pārējos 70%-75% kaņepju biomasas veido kaņepju spaļi.

PIELIKUMS

[1] Šinka, M., Korjakins, A., Šahmenko, G. Kaņepju spaļu ar hidrauliskā kaļķa saistvielu izmantošana siltumizolācijas materiālos. No: *Ilgtspējīga uzņēmējdarbība mainīgos ekonomiskos apstākļos: XIII starptautiskā zinātniskā konference: Biznesa augstskolas "Turība" konferenču rakstu krājums*, Latvija, Rīga, 30.-30. marts, 2012. Rīga: Biznesa augstskola "Turība", 2012, 305.-313.lpp. ISSN 1691-6069.

[2] M. S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Build. Environ.*, vol. 40, no. 3, pp. 353–366, 2005.

[3] H. R. Kymäläinen and A. M. Sjöberg, "Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 7, pp. 1261–1269, 2008.

[4] J. Hroudova and J. Zach, "Acoustic and Thermal Insulating Materials Based O n Natural Fibres Used in Floor Construction," *Int. J. Civil, Environ. Struct. Constr. Archit. Eng.*, vol. 8, no. 11, pp. 1152–1155, 2014.

Attēls 1. Neapstrādāti kaņepju spaļi LVKĶI laboratorijā

Pateicoties HES LV (Hemp Eco Systems Latvia) izstrādātajai tehnoloģijai, kaņepju spaļus var un ieteicams pielietot ēku renovācijas darbos, kā fasādes, pārsegumu un jumtu siltumizolācijas slāni. No kaņepju spaļiem šobrīd tiek ražoti dažādi "zaļie" būvmateriāli – beramie kaņepju spaļi kā siltumizolācija un kaņepju betons. Piemēram, sajaucot kaņepju spaļus ar hidraulisko kaļķi, tiek iegūts tā sauktais kaņepju betons, monolīta konstrukcija, kura savu formu iegūst iestrādājot ēkas karkasā (veidnī), un pēc izžūšanas ieņem tās formu. Kaņepju betons satur vismaz 75% (no kopējās masas) hidraulisko kaļķi kā saistvielu. Hidrauliskie kaļķi kļūst noturīgāki, uzņemot CO_2. Tādējādi, arī pēc izstrādes materiāls turpina absorbēt CO_2. Hidrauliskais kaļķis ir būtiski atšķirīgs no parastās kaļķu javas, ja parastais kaļķis cietē un karbonizējas saskaroties ar gaisā esošo CO_2, tad hidrauliskais kaļķis nebaidās no mitruma un ūdens vidē vislabāk cietē. Hidrauliskās kaļķa javas satur mālu kā saistvielu stiprības nodrošināšanai.

Problēmu risinājums:

Kaņepju šķiedru ražošanas blakusproduktus (kaņepju spaļu) un mežizstrādes blakusproduktu pārpalikumus (baltalkšņa šķeldas) ir iespējams izmantot augstas pievienotās vērtības produktu ražošanā – ekoloģiskā beramajā siltumizolācijas materiālā ar augstiem siltumizolācijas rādītājiem. Izmantojot tvaika sprādziena tehnoloģiju, lignocelulozes materiālu var pakļaut spiediena, temperatūras un ūdens tvaika ietekmei, kā rezultātā mainās lignocelulozes materiāla fizikālās īpašības. Turklāt baltalkšņa un industriālo kaņepju audzēšana samazina CO_2 atmosfērā, t.i., šāda būvmateriāla ražošana no kaņepju šķiedru ražošanas blakusproduktiem un mežizstrādes blakusproduktiem ir videi draudzīga.

PIELIKUMS

Attēls 2. Ar tvaika sprādziena tehnoloģiju apstrādāti kaņepju spaļi LVKĶI laboratorijā

Beramos siltumizolācijas materiālus, piemēram, beramo ekovati vai akmens vati, iesaka izmantot sarežģītās konstrukcijās vai grūti pieejamās vietās, jo šāda veida siltumizolācijas materiāls ir elastīgāks. Tāpat beramos siltumizolācijas materiālus pārsvarā izmanto sienu siltināšanai, kamēr salīdzinoši līdzenākās un tehniski vienkāršākās grīdu un griestu konstrukcijas izvēlas siltināt ar siltumizolācijas plāksnēm (putupolistirols, utml.). Lai gan lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls ir piemērots visu veidu konstrukciju siltināšanai, ņemot vērā to, ka tas tiks piedāvāts ekoloģisko jeb "zaļo" būvmateriālu segmentā, tā primārais pielietojums ir dzīvojamo ēku būvniecība, īpaši pasīvo māju un koka māju būvniecība.

Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšana, izmantojot tvaika sprādziena tehnoloģiju, **atrisinās nozarēs esošās problēmas**:

1) Tirgum tiks piedāvāts jauns, inovatīvs un dabisks beramais siltumizolācijas materiāls ar augstām siltumizolācijas īpašībām;
2) Kaņepju pārstrādes un mežistrādes nozarēm tiks piedāvāts alternatīvs ražošanas blakusproduktu pārstrādes veids, kas nodrošinās efektīvāku blakusproduktu pārstrādi un lielāku peļņu.

Lai komercializējamo produktu novestu no pašreizējā TRL4 līdz komercializējamam TRL6 līmenim, **nepieciešams veikt šādas aktivitātes**:

- Tehnoloģijas mērogošana no pašreizējās 0,5l tvaika sprādziena iekārtas uz vismaz 50l tvaika sprādziena iekārtu;
- Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla pilotpartiju iegūšana pilotražotnē;
- Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ugunsizturības pētījumu veikšana par iespējamo borskābes un tetraborātu aizstāšanu ar citām lētākām ķimikālijām vai dabiskām izejvielām;
- Pētījumu veikšana par zemākās kvalitātes kaņepju spaļu izmantošanu lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražošanai;
- GOS emisiju testu veikšana produkta pilotpartijām;
- Komercializācijas piedāvājuma sagatavošana un izstrādātās tehnoloģijas demonstrācija ieinteresētajām pusēm;

PIELIKUMS

- Tiešie kontakti ar industriju pārstāvjiem un dalība zinātniskajās konferencēs;
- Intelektuālā īpašuma tiesību aizsardzība.

Augstāk minētās aktivitātes plānots īstenot komercializācijas projekta 2.posma ietvaros.

1.2. Projekta nozare

Saskaņā ar Nace 2.red. klasifikāciju, būvniecības materiālu ražošana kā atsevišķa nozare nav izdalīta. Ņemot vērā to, ka lignocelulozes beramo siltumizolācijas materiālu var izgatavot no kaņepju biomasas, kuru primāri izmanto tekstilšķiedru apstrādes rūpniecībā, un baltalkšņa šķeldām vai bērzu lēveriem, kas ir kokapstrādes nozares blakusprodukti, par projekta nozarēm uzskatāmas šādas apstrādes rūpniecības apakšnozares:

- C 13.9 "Pārējo tekstilizstrādājumu ražošana";
- C 16.29 "Pārējo koka izstrādājumu ražošana; korķa, salmu un pīto izstrādājumu ražošana".

Šis ir daudznozaru projekts, jo, pielietojot identisku tehnoloģiju, augstas kvalitātes beramo siltumizolācijas materiālu iespējams iegūt no tekstila un no kokrūpniecības pārstrādes blakusproduktiem.

Nozarē C 13.9 saskaņā ar Lursoft datiem 2020. gadā Latvijā bija reģistrēti 305 uzņēmumi[5]. Saskaņā ar CSB datiem, C 13.9 apakšnozarē nodarbināto skaits 2018. gadā bija 2718[6].

Nozarē C 16.29 saskaņā ar Lursoft datiem 2020. gadā Latvijā bija reģistrēti 516 uzņēmumi[7]. Sasķaņā ar CSB datiem, C 16.29 apakšnozares neto apgrozījums 2018. gadā bija 263 miljoni euro, nodarbināto skaits – 1676[8]. Kokapstrādes rūpniecība vēsturiski ir bijusi Latvijas galvenā apstrādes rūpniecības nozare pēc apgrozījuma, nodarbinātības, darba samaksas, pievienotās vērtības u.c. rādītājiem.

Vienlaikus projekts ir saistīts ar šādām tautsaimniecības nozarēm:

A 01.16 "Šķiedraugu audzēšana"

Kaņepju pārstrādes blakusproduktu ilgtspējīgas izmantošanas jomas paplašināšana noteikti veicinās alternatīvās lauksaimniecības attīstību un kaņepju audzēšanu Latvijā un citur Eiropā: šobrīd kaņepju audzēšana nav tik izplatīta nozare galvenokārt lielā blakusproduktu daudzuma dēļ, kuram nav rasts efektīvs un ekonomiski pamatots pielietojums.

Tiek lēsts, ka globālais rūpniecisko kaņepju tirgus apgrozījums 2019. gadā bija ap 4,71 miljardiem ASV dolāru, un paredzams, 2020-2027. gadā tas izaugs par 15,8%.[9]

A 02.20 "Mežizstrāde"

LVKĶI izstrādātās tehnoloģijas ieviešana siltumizolācijas materiālu ražošanā uzlabos mežizstrādes nozares konkurētspēju, ļaujot tās blakusproduktus kā baltalksnis vai bērzu lēveri pārstrādāt produktos ar augstu pievienoto vērtību.

Tāpat projekts atbilst OECD zinātņu nozaru FOS klasifikācijas inženierzinātnes un tehnoloģijas nozarēm 2.4. "ķīmijas inženierija" un 2.5. "materiālu inženierija".

[5] https://nace.lursoft.lv/13.9/parejo-tekstilizstradajumu-razosana/companies/?vr=3&old=0
[6] Centrālā statistikas pārvalde, SBG010. Uzņēmumu galvenie uzņēmējdarbības rādītāji, 2019
[7] https://nace.lursoft.lv/16.29/parejo-koka-izstradajumu-razosana%3B-korka-salmu-un-pito-izstradajumu-razosana/companies/?vr=3&old=0
[8] Centrālā statistikas pārvalde, SBG010. Uzņēmumu galvenie uzņēmējdarbības rādītāji, 2019
[9] https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-hemp-market

PIELIKUMS

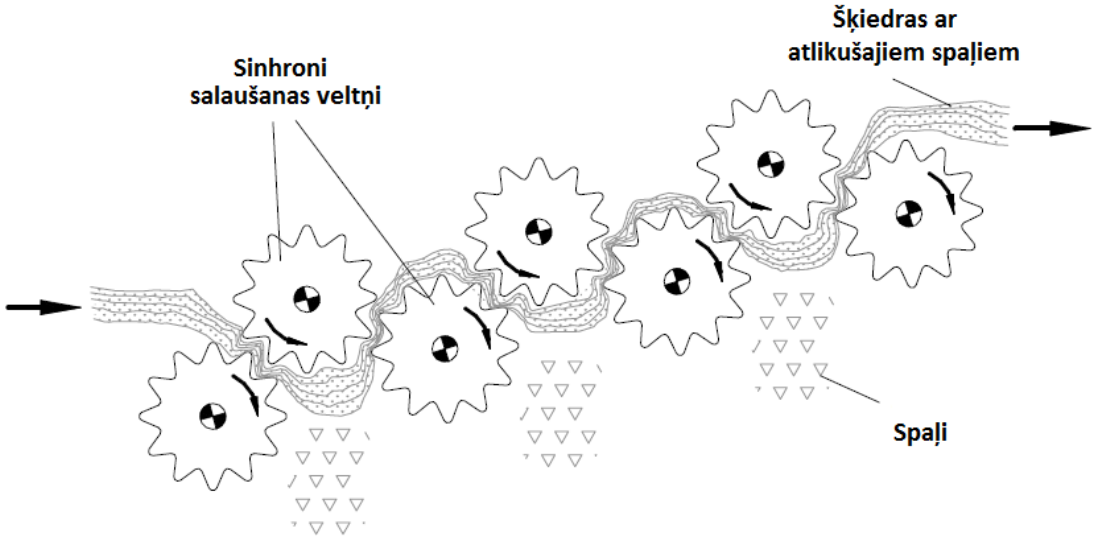
1.3. Tehnoloģijas apraksts

LVKĶI ir izstrādājis lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas paņēmienu, izmantojot tvaika sprādziena tehnoloģiju.

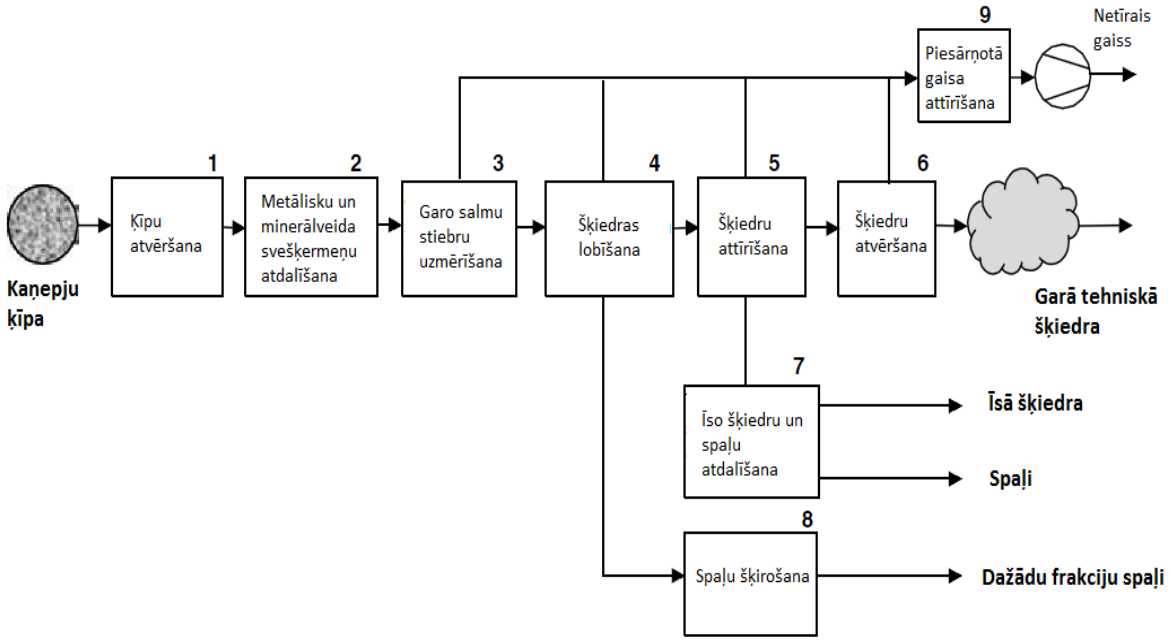
Izejmateriālu sagatavošana

Kaņepju spaļi tvaika sprādziena (TS) izolācijas materiāla ražotnei tiek piegādāti no kaņepju stiebru pārstrādes uzņēmumiem, kam pamatražošanas mērķis ir šķiedru ieguve tekstila ražošanai.

Attēls 3. Kaņepju stiebru pārstrādes process.



Attēls 4. Kaņepju stiebru apstrādes tehnoloģiskā shēma



Kaņepju spaļi uz ražotni tiek saņemti ar auto kravām vai lielajos 1,5m^3 "BigBag" maisos. Kaņepju spaļi ir iespējami tīri - bez minerālajiem piemaisījumiem, trupes un pelējuma – taču var saturēt šķiedru piemaisījumu. Kaņepju spaļi tiek izkrauti un glabāti piramīdas krautnēs atvērta tipa angāros, bez

sienām, tādā veidā nodrošinot dabīgo žūšanu un vēdināšanos. Ja saņemtie kaņepju spaļi ir netīri un pilni ar minerālvielām, ir iespējams uzstādīt mehāniskos vibroseperātorus, kas noņem šos piemaisījumus.

Lai no krautnes uz ražošanu padotu spaļus, ir paredzēta speciāla ierīce, kura atrodas grīdas līmenī un ir nosegta ar restēm un uz tās uzbrauc traktors un ieber kaņepju spaļus, zem restēm atrodas vītņu konveijers, kas satver kaņepju spaļus un aizvada uz lentas konveijeru. Lentas konveijera galā pieslēgti elektromagnēti, kas atdala no masas metālu piemaisījumus.

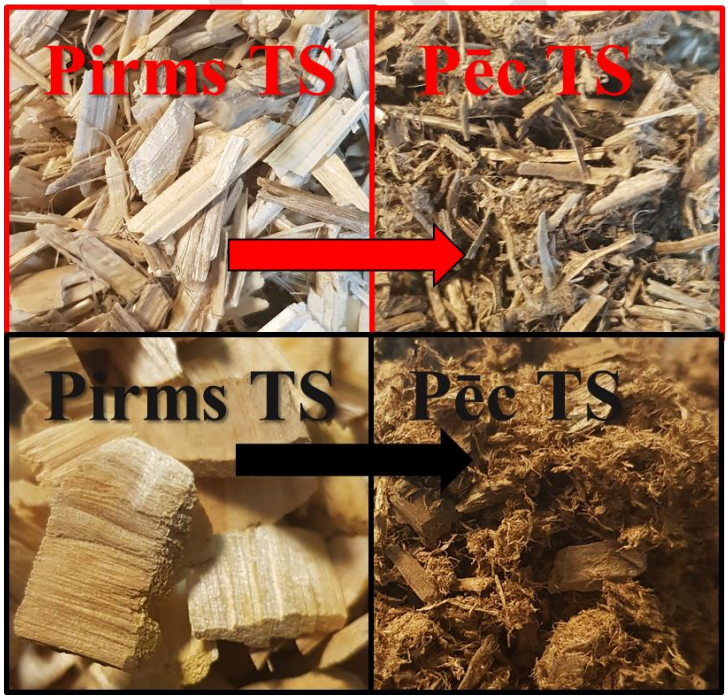
Kaņepju spaļu masa TS iekārtas reaktorā tiek padota ar vītņu konveijeru vienmērīgāos daudzumos līdz noteiktam līmenim, ko regulē devēji.

<u>Tvaika sprādziena tehnoloģija</u>

TS galvenie faktori ir apstrādes laiks, spiediens un temperatūra, kas kopā nosaka to režīmu. Jo bargāks apstrādes režīms, jo lielāki iespējamie zudumi, gaistošu savienojumu veidā. Izstrādātajā beramajā siltumizolācijas materiāla tehnoloģijā TS apstrādes laiks ir 1-30 sekunds, temperatūra 235 ^{0}C, spiediens 32 bar. Pie šada režīma izejmateriāla zudumi ir tikai 2.4-6.3%, no absolūti sausas masas.

Veicot biomasas (piem., koksnes un augu stiebru) apstrādi ar piesātinātu tvaiku slēgtā reaktorā pie augstām temperatūrām (T >160°C) un spiediena (p 20 – 40 bar), notiek autohidrolīze. Izbeidzot reakciju ar reaktora atvēršanu, notiek tvaika sprādziens, kā rezultātā tiek izjaukta materiāla uzbūves struktūra, to sašķiedrojot dažādās frakcijās. Tvaika sprādzienā šķiedru masā pārveidotam izejmateriālam tilpummasa samazinās apmēram divas reizes (pēc veiktiem mērījumiem, vidēji, kaņepju spaļiem – no 100 līdz 40–60 kg/m^3; bērza lēveriem – no 200 līdz 95–110 kg/m^3; baltalkšņa šķeldām – no 165 līdz 85–95 kg/m^3), bet tā siltuma vadītspēja uzlabojas līdz pat 20% (pēc veiktiem mērījumiem, vidēji, kaņepju spaļiem – no 0,051 līdz 0,043–0,045 W/(m×K); bērza lēveriem – no 0,062 līdz 0,057 W/(m×K); baltalkšņa šķeldām – no 0,062 līdz 0,051–0,054 W/(m×K)). Uzlabotie materiāla radītāji (tilpummasa un siltumvadītspēja) padara to konkurētspējīgu ar jau tirgū esošajiem siltumizolācijas materiāliem. Piedāvātais paņēmiens beramā lignocelulozes siltumizolācijas materiāla iegūšanai ir energoefektīvs, jo, neskatoties uz augstām temperatūrām (200 – 235°C), tvaika apstrādes ilgums (t) ir tikai līdz 5 min un materiālam nav vajadzīga pēcapstrāde, izņemot žāvēšana līdz transportēšanas mitrumam (W=15%). Šādi iegūto materiālu nav nepieciešamības veidot plāksnēs vai paklājā, kas sadārdzinātu gala produktu un radītu atlikumus, bet beramā veidā to var viegli iestrādāt ēkas konstrukcijās, tai nodrošinot nepieciešamo siltumizolāciju.

Attēls 4. Kaņepju spaļi un baltalkšņa šķeldas pirms un pēc apstrādes ar TS metodi

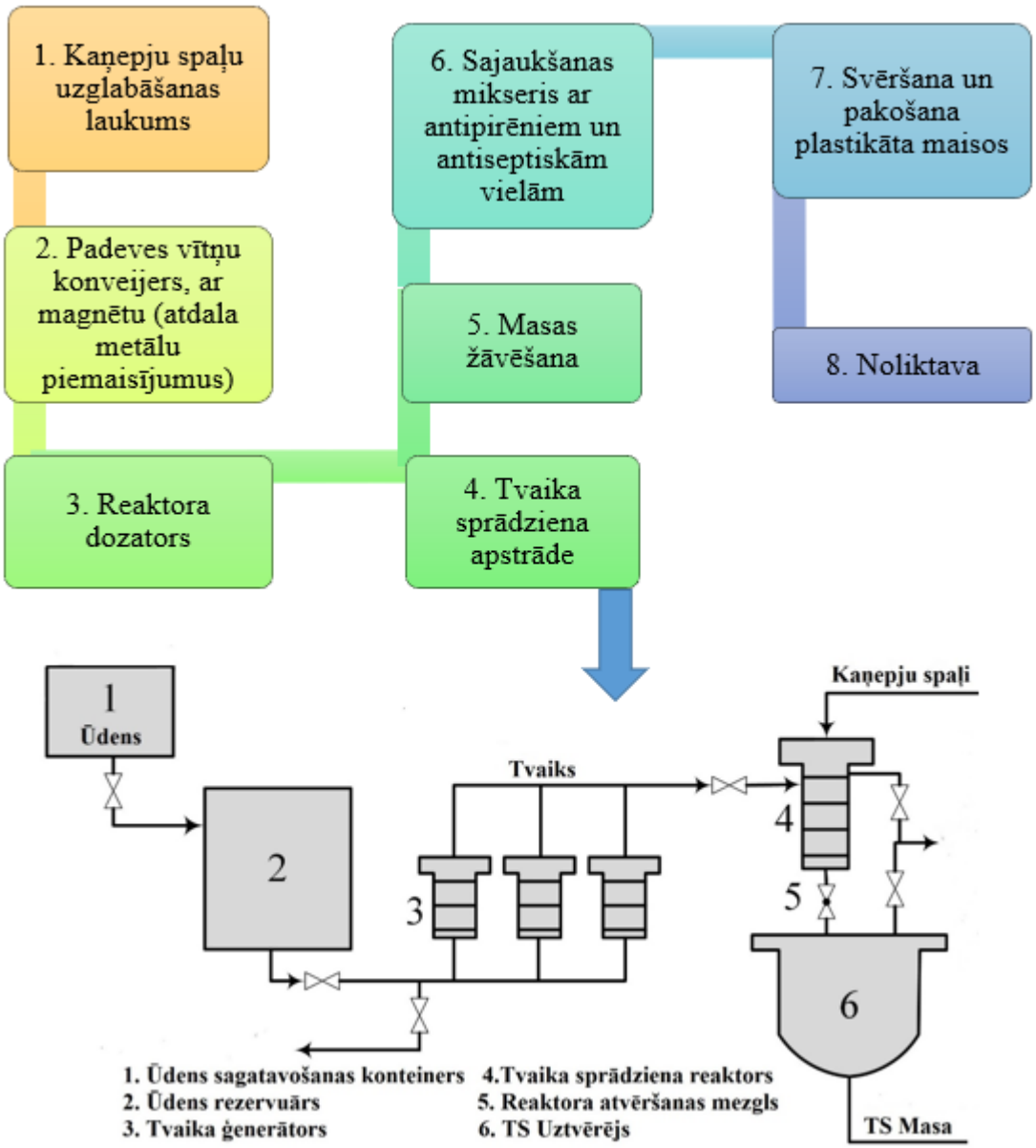


Pēc TS apstrādes masa ir karsta, mitruma un mainījusi krāsu no gaišas uz viegli brūnu. Lai panāktu, ka materiāls ir birstošs, to žāvē līdz materiāls sasniedz 7-8% mitrumu.

Lai nodrošinātu aizsardzību pret grauzējiem un ugunsgrēka gadījumā aizkavētu uguns izplatību, TS apstrādātais materiāls tiek sajaukts kopā ar bora (*boric acid* angļu val.) un tetraborāta (*borax* angļu. val.) sāļiem.

Izgatavoto beramo siltumizolācijas materiālu iepako maisos un novieto noliktavā.

Attēls 5. Tvaika sprādziena kaņepju spaļu izolācijas materiāla ražošanas tehnoloģiskā shēma



Mūsu piedāvātā paņēmiena apstrādei nepieciešamās enerģijas daudzums pie reaktora darba temperatūrām līdz 230°C nepārsniedz 10% no biomasas siltumspējas, bet piesātināta tvaika patēriņš – vienu kg uz kilogramu sausā biomasas satura pie 50% enerģijas izmantošanas efektivitātes[10]. Tehnoloģijas piedāvātais labums ir vienkāršība, priekšrocība izmantot biomasas atlikumus, salīdzinoši

[10] J. Abolins and J. Gravitis, "Energy from Biomass for Conversion of Biomass," *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 46, no. 5, pp. 16–23, 2009

zema energoietilpība un ūdens patēriņš ražošanas procesā, iegūstot – dabisku bezatlikumu siltumizolācijas materiālu.

Tehnoloģijas priekšrocības:

1) Relatīvi lēta tehnoloģija, maz nepieciešamo izejvielu, neliels elektroenerģijas patēriņš un relatīvi mazs ūdens patēriņš, salīdzinot ar alternatīvu produktu ražošanu;
2) Tehnoloģija ir vienkārša, nav nepieciešams liels skaits augsti kvalificētu speciālistu;
3) Tehnoloģijā izmantojamās iekārtas ir standartiekārtas, kas jau ir brīvi nopērkamas tirgū;
4) Tehnoloģijas iekārtas ir piemērotas dažādu lignocelulozes materiālu apstrādei, piemēram, kaņepju spaļiem, baltalkšņa šķeldām, bērzu lēveriem, utt., un tās nav jāpielāgo atsevišķi katram lignocelulozes materiāla veidam;
5) LVKĶI jau ir notestējis šīs tehnoloģijas piemērotību lignocelulozes beramo siltumizolācijas materiālu ražošanā.

1.4. Produkta pielietojums

Lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls var tikt pielietots visa veida dzīvojamo un nedzīvojamo ēku siltināšanā. Ņemot vērā to, ka LVKĶI piedāvātā tehnoloģija ļauj izstrādāt dabisku produktu no atjaunojamām izejvielām, produkta efektīvākais pielietojums ir koka karkasa mājas, eko mājas un pasīvās mājas, kurās jauno materiālu būtu iespējams iestrādāt pūšamā veidā grīdu, sienu, pārsegumu un pat jumta konstrukcijās, līdzīgi kā ekovati.

Attēls 6. Alternatīvs beramais siltumizolācijas materiāls no celulozes šķiedrām (ekovate)[11].

LVKĶI izstrādātais lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls izceļas ar augstiem energoefektivitātes rādītājiem (skat. Attēlā 7). Gan no baltalkšņa šķeldām, gan kaņepju spaļiem iegūtā siltumizolācijas materiāla priekšrocības ir tā plastiskums un piemērotība neregulāras formas telpu siltināšanai, kā arī siltināšanai grūti aizsniedzamās vietās, kur plākšņu vai putu siltumizolācijas materiālu iestrāde ir apgrūtināta vai pat tehnoloģiski neiespējama.

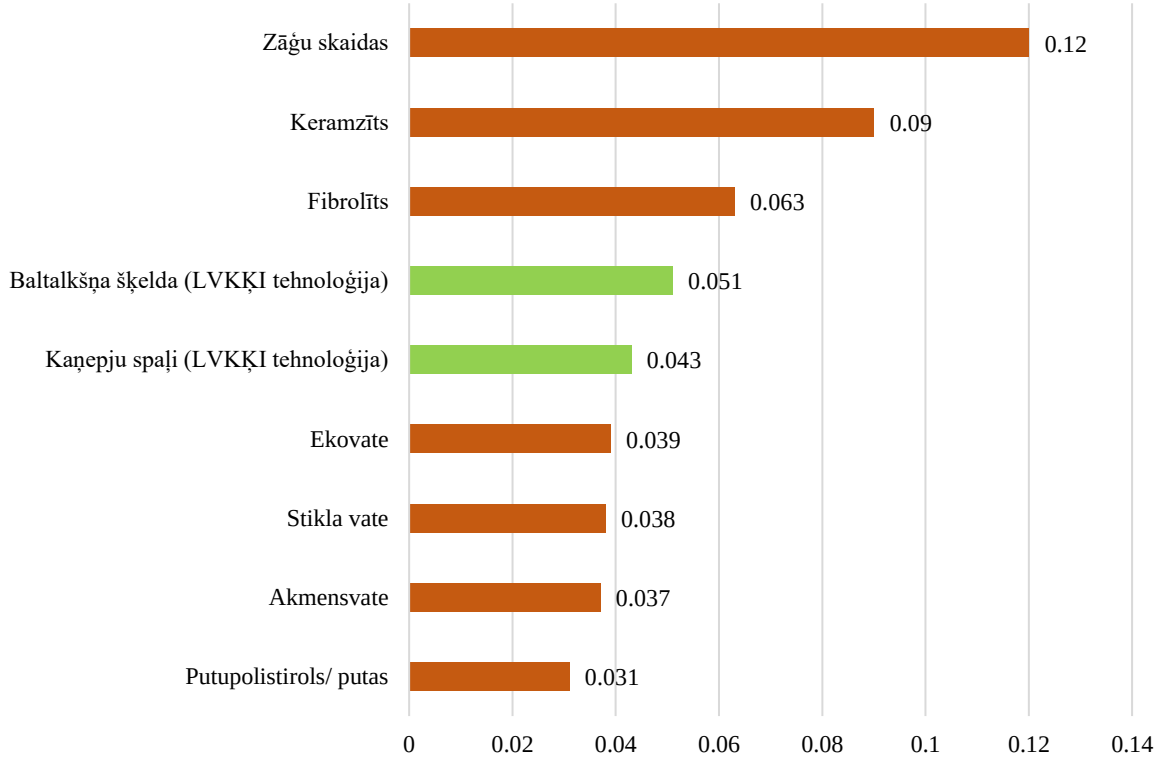
[11] Siltumeksperts.lv

1.5. Produkta analogi un aizvietotāji

Šobrīd tirgū pieejamos izolācijas materiālus iespējams klasificēt pēc dažādām pazīmēm: 1) beramie siltumizolācijas materiāli vai plāksnes, 2) dabiskie un ķīmiskie siltumizolācijas materiāli.

Attēlā 7 zemāk redzams dažādu siltumizolācijas materiālu siltumvadītspējas salīdzinājums.

*Attēls 7. Siltumizolācijas materiālu siltumvadītspējas (*W/(m×K)*) salīdzinājums*[12]



Pēc LVKĶI veiktiem mērījumiem, siltumvadītspēja jaunajam beramajam lignocelulozes siltumizolācijas materiālam no kaņepju spaļiem ir no 0,051 līdz 0,043–0,045 W/(m×K); bet baltalkšņa šķeldām – no 0,062 līdz 0,051–0,054 W/(m×K).

Lielākoties tirgū esošie beramie siltumizolācijas materiāli tiek ražoti no minerālām (akmens un stikla) un celulozes (papīrmasa no koksnes) šķiedrām. LVKĶI izstrādātais lignolcelulozes beramais siltumizolācijas materiāls arī sastāv no šķiedru masas, taču atšķiras ar iegūšanas paņēmienu (tvaika sprādziens), kas ir salīdzinoši vienkāršs un lēts. TS šķiedru masa tiek iegūta no lignocelulozes izejvielām, kuras var būt kā koksnes un ne koksnes dažādas atliekas: meža izstrādes, koksnes pārstrādes, lauksaimniecības kultūrām (spaļi, salmi). Celulozes šķiedru iegūšanas procesā koksnes izejvielai pirms šķeldu ieguves obligāti veic nomizošanu, kas rada papildus operāciju un blakus produktu. LVKĶI izstrādātās tehnoloģijas gadījumā ir nepieciešama izejvielas smalcināšana (šķeldu iegūšana), bet nomizošana nav vajadzīga. Produkta galvenā inovācija ir tā, ka šķiedru masa tiek iegūta vienā posmā TS iekārtā, kas ir vienkārši un ātri. TS tehnoloģija ir ieviesta pasaules tirgū, taču tiek pielietota citu produktu ražošanai, kas nav saistīts ar siltumizolācijas materiālu iegūšanu.

Tabulā 1 ir sniegts LVKĶI izstrādātā lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla salīdzinājums ar alternatīviem siltumizolācijas materiāliem.

[12] www.ductus.lv, LVKĶI veiktie mērījumi.

Tabula 1. Siltumizolācijas materiālu īpašību salīdzinājums[13]

Priekšrocība	Beramie siltumizolācijas materiāli		
	Lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls, izmantojot TS tehnoloģiju	**Celulozes šķiedras iegūtas defibrējot un rafinējot / reciklēts papīrs**	**Akmens/stikla vate**
Izejmateriāli un piedevas	Organisks (koksnes un augu atliekas), neorganiskie antipirēni	Organisks (koksne - papīrmalka), neorganiskie antipirēni	Neorganisks (akmens, stikls), organiskās saistvielas
Siltumvadītspēja, W/(m×K)	0,043 – 0,057	0,046 – 0,054	0,030 – 0,040
Ietekme uz veselību	Kairinošie putekļi montāžas laikā	Kairinošie putekļi montāžas laikā	Kairinošie putekļi montāžas laikā
Ražošanas izmaksas	Zemas	Augstas/vidējas	Augstas
Ietekme uz vidi	Neitrāla	Neitrāla/negatīva	Negatīva
Ugunspretestība	Vāja (bez antipirēniem) Ļoti laba (ar antipirēniem)	Vāja (bez antipirēniem) Ļoti laba (ar antipirēniem)	Izcila/ļoti laba
Mitruma uzsūcamība	Vāja	Laba	Laba

Kā redzams Tabulā 1, LVKĶI izstrādātais beramais siltumizolācijas materiāls ir līdzvērtīgs tirgū esošajiem ar paredzamām zemākām ražošanas izmaksām. Mitruma uzsūcamība ir svarīgs parametrs ekspluatācijas laikā, jo izolācijas materiāla mitruma paaugstināšanās samazina tā siltumvadītspēju. LVKĶI materiālam mitruma uzsūcamība ir zema TS apstrādes dēļ, kuras procesā samazinās hemiceluložu daudzums, kas augu materiālos uzsūc/piesaista mitrumu.

Tā kā lignoceluloze ir organisks pašatjaunojošs dabisks materiāls, tajā ir sekvestrēts ogleklis, kas samazina CO_2 emisijas, kas potenciāli rastos, to sadedzinot. Eiropā ir apstiprināta bioekonomikas stratēģija, kas balsta jaunu materiālu ieviešanu un ražošanu no atjaunojamiem resursiem. Projekta laikā izstrādātā jauna lignocelulozes produkta ieviešana nodrošinās bioekonomikas stratēģijas mērķu sasniegšanu.

Celulozes šķiedru siltumizolācijas materiāli, kas ir analogs LVKĶI piedāvātam beramajam lignocelulozes siltumizolācijas materiālam, tiek iegūti defibrēšanas un rafinēšanas ceļā, līdzīgi kā papīrrūpniecībā, galvenokārt, pārstrādājot izmantoto papīru jeb makulatūru, kas prasa lielus enerģijas un ūdens apjomus.[14] LVKĶI piedāvātā paņēmiena apstrādei nepieciešamās enerģijas daudzums pie reaktora darba temperatūrām līdz 230°C nepārsniedz 10% no biomasas siltumspējas, bet piesātināta tvaika patēriņš – vienu kg uz kilogramu sausā biomasas satura pie 50% enerģijas izmantošanas efektivitātes[15]. Tehnoloģijas piedāvātais labums ir vienkāršība, priekšrocība izmantot biomasas atlikumus, salīdzinoši zema energoietilpība un ūdens patēriņš ražošanas procesā, iegūstot – dabisku bezatlikumu siltumizolācijas materiālu.

Ieviešot tvaika sprādziena tehnoloģiju kokrūpniecības nozarē Latvijā, būtu iespējams ne tikai ražot beramos lignocelulozes izolācijas materiālus, bet arī citus vērtīgus produktus ar pievienoto vērtību ķīmijas un biotehnoloģiju nozarēs.

[13] M. S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Build. Environ.*, vol. 40, no. 3, pp. 353–366, 2005.
[14] J. Kosny, D. W. Yarbrough, K. Wilkes, D. Leuthold, and A. Syad, "PCM-Enhanced Cellulose Insulation - Thermal Mass in Lightweight Natural Fibres," in *2006 ECOSTOCK Conference IEA, DOE, Richard Stockton College of New Jersey, June 2006*, 2006, pp. 1–8
[15] J. Abolins and J. Gravitis, "Energy from Biomass for Conversion of Biomass," *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 46, no. 5, pp. 16–23, 2009

PIELIKUMS

Analogu materiālu cenu salīdzinājums

LVKĶI ir veicis tirgus priekšizpēti par analogu **beramo siltumizolācijas materiālu** cenām, izmantojot publiski pieejamos avotus (Tabula 2). Jāņem vērā, ka ražotāju cenas vairumā gadījumu ir komercnoslēpums, tāpēc aplūkotas ir mazumtirdzniecības cenas. Ir izdarīts pieņēmums, ka būvmateriālu mazumtirdzniecības uzcenojums ir ne lielāks par 10%.

Tabula 2. Analogu beramo siltumizolācijas materiālu cenu salīdzinājums[16]

Nr.p.k.	Materiāls	Siltumvadītspēja, λD (W/mK)	Mazumtirdzniecības cena, EUR/kg ar PVN	Mazumtirdzniecības cena, EUR/kg bez PVN	Indikatīva ražotāja cena, EUR/kg bez PVN
Minerālvate					
1.	ISOVER KV 041	0,041	0,80	0,67	0,61
2.	ROCKWOOL Granrock Super	0,042	0,65	0,54	0,49
3.	PAROC BLT 3	0,041	0,60	0,50	0,46
4.	PAROC BLT 9	0,041	0,46	0,38	0,35
5.	ISOVER InsulSafe	0,041	1,57	1,30	1,19
6.	KNAUF INSULATION Supafil Loft *bez sintētiskajiem sveķiem un saistvielām	0,045	1,75	1,45	1,32
7.	KNAUF INSULATION Supafil Timber Frame *ekoloģiska minerālvate bez sintētiskajiem sveķiem un saistvielām	0,034	1,89	1,57	1,43
Ekovate					
8.	EKOWOOL Economy (Celulozes)	0,040	0,67	0,56	0,51
9.	EKOWOOL Premium (CE sertifikāts) (Celulozes)	0,039	0,74	0,62	0,57
10.	BALTICFLOC	0,039	0,74	0,62	0,57
11.	Ekovate Climatizer Plus	0,039	0,81	0,67	0,61

Dažādu minerālo siltumizolācijas materiālu indikatīvās ražotāju cenas svārstās no 0,35 EUR/kg līdz 1,43 EUR/kg, bet ekovates cenas – no 0,51 EUR/kg līdz 0,61 EUR/kg. Savukārt siltumvadītspējas rādītāji ekovatei pat pārspēj minerālvates siltumvadītspējas rādītājus, vienlaikus uzrādot zemāku cenu.

[16] https://prof.lv/lv/buvmateriali/buvmateriali/siltumizolacijas-materiali/berama-vate

1.6. SVID analīze

Tabula 3. Lignocelulozes siltumizolācijas materiāla ieviešanas ražošanā SVID analīze

Stiprās puses	**Vājās puses**
• Vienkārša tehnoloģija, nav nepieciešami apjomīgi kapitālieguldījumi. • Labi produkta tehniskie rādītāji, kuri spēj konkurēt ar alternatīviem produktiem. • Projekta autoriem pieder īpašumtiesības uz Latvijas patentu LV 15328 (20.07.2019.) "Lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls un tā iegūšanas paņēmiens". • Plašas produkta pielietošanas iespējas nozīmīgās Latvijas un Eiropas tautsaimniecības nozarēs – koka māju un ekomāju būvniecībā un siltināšanā. • Produkts ar augstu novitātes līmeni: nekur pasaulē šobrīd vēl netiek masveidā ražoti siltumizolācijas materiāli, pielietojot tvaika sprādziena tehnoloģiju. • Zema produkta pašizmaksa, kas nodrošina cenu konkurētspēju ne vien nišas, bet arī plašpatēriņa būvmateriālu segmentā. • Plaši pieejamas izejvielas produkta ražošanai. • Augoši noieta tirgi visā pasaulē.	• Jauns produkts, kura iegūšanas tehnoloģija pagaidām nav validēta reālos ražošanas apstākļos. TS tehnoloģija ir validēta citu produktu ražošanai. • Tehnoloģiju nepieciešams attīstīt un pilnveidot, lai mērogotu uz liela apjoma rūpniecisko ražošanu. • Produkts un izejmateriāli nav paredzēti transportēšanai lielos attālumos, jo transporta izmaksas būtiski sadārdzina gala produkta cenu; lokāli ražojams un lietojams produkts. • Daļēji sezonāla ražošana – siltumizolācijas materiāla ražošana no kaņepju spaļiem iespējama rudenī (pēc ražas novākšanas), pretējā gadījumā kā papildus izmaksas jāņem vērā arī noliktavu nomas izmaksas. • Nepieciešami nozīmīgi finansiālie ieguldījumi tehnoloģijas komercializēšanai. • IĪT nav nostiprinātas ar Eiropas patentu.
Iespējas	**Draudi**
• Tehnoloģijas ieviešana veicinās saimnieciskās darbības laikā radušos pārpalikumu pārstrādi produktā ar augstu pievienoto vērtību mežistrādes un kaņepju audzēšanas (lauksaimniecības) sektoros, tādējādi veicinot pārpalikumu efektīvu izlietošanu. • Tehnoloģijas ieviešana ļaus attīstīt papildus saimnieciskās darbības virzienus mežizstrādes uzņēmumiem un kaņepju audzētājiem. • Iespēja ieviest tirgū jaunus, dabiskus materiālus, eko dzīvesveida pieaugošās popularitātes dēļ. • Iekļūšana dabisko materiālu un oglekļa mazietilpīgo produktu tirgus attīstības rezultātā radītajās jauno produktu nišās.	• Iespējams zems pieprasījums pēc dabiskiem būvmateriāliem ekonomiskās krīzes ietekmē. • Iespējams siltumizolācijas materiālu cenu kritums inovāciju ieviešanas rezultātā. • Iespējamas grūtības komercializēt produktu un tehnoloģiju Covid-19 pandēmijas radīto seku dēļ, piemēram, atceltas zinātniskās konferences, tirdzniecības misijas, u.c. klātienes pasākumi. • Alternatīvu, neekoloģisku izejmateriālu zemās cenas. • Pastāv iespēja, ka kāds ārzemju ražotājs ieviesīs lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražošanas tehnoloģiju, izmantojot tvaika sprādziena metodi, pirms LVKĶI to paspēs komercializēt un nostiprināt ITT, iesniedzot Eiropas patenta pieteikumu.

PROJEKTS

1.7. Risku analīze

Tabula 4. Ar lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla komercializāciju saistīto risku analīze

Nr. p.k.	Risks	Riska ietekme	Riska iestāšanās varbūtība	Riska minimizēšanas vai novēršanas plāns
1)	Zinātniskie riski	Augsta	Zema	Riski saistīti ar tālāku pētījumu attīstības neizdošanās, zināšanu un pieredzes trūkumu produkta tālākai attīstībai. Risks vērtējams kā zems, jo projekta komandas dalībniekiem Dr.sc.ing. Ramūnas Tupčiauskas ir 14 gadu pieredze un Mg.sc.ing. Mārtiņam Andžam ir 8 gadu pieredze LVKĶI rūpniecisko pētījumu un eksperimentālo izstrāžu veikšanā, kā arī pētniecības rezultātu komercializācijā. Pētījumi par siltumizolācijas materiālu iegūšanu no lignocelulozes, izmantojot TS metodi, LVKĶI ilgst jau vairāk nekā 8 gadus, un līdzšinējo pētījumu rezultāti pierādījuši, ka šīs tehnoloģijas komercializācijas potenciāls ir augsts.
2)	Tehnoloģiskie riski	Vidēja	Zema	Riski saistīti ar telpu, iekārtu nepieejamību gan LVKĶI, gan ražotājiem. Veiktā tirgus izpēte pierādījusi to, ka lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražošanas izmaksas, izmantojot TS paņēmienu, ir zemas. Ražošanai nav nepieciešamas īpaši pielāgotas telpas, bet jaunu iekārtu komplekts, kas sastāv no 8 tirgū jau esošām standartiekārtām, izmaksā nepilnus 600 tūkstošu euro. Ir iespējama arī telpu noma. Ar šādu iekārtu komplektu iespējams saražot ap 2600 tonnas jeb 43 200 kubikmetrus beramā siltumizolācijas materiāla gadā. Iekārtas ir brīvi pieejamas tirgū kā standartiekārtas. Iekārtas var piegādāt, piemēram, tādi vietējie iekārtu ražotāji kā AISIS, Nextonsteel. Ražošanas process ir tehnoloģiski vienkāršs un negatīvu ietekmi uz vidi nerada. Līdz ar to tehnoloģiskie riski nav identificēti. Plānotā TRL6 sasniegšana ir ļoti iespējama.
3)	Finanšu riski	Augsta	Vidēja	Riski saistīti ar finansējuma trūkumu produkta attīstīšanai līdz TRL6. Risku plānots minimizēt, piesaistot ERAF līdzekļus projekta komercializēšanai. Bez ERAF atbalsta lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla komercializēšanai pastāv augsti projekta neizdošanās riski, jo tādā gadījumā būtu jāmeklē privāts investors. Privāto investīciju piesaiste ir ne tikai sarežģīta un laikietilpīga, bet var izrādīties arī neizdevīga no finanšu ieguvumu aspekta, jo tādā gadījumā projekts tiks īstenots kā saimniecisks projekts, intelektuālā īpašuma tiesības piederēs investoram. Tāpēc LVKĶI visizdevīgākais projekta finansēšanas veids ir ERAF līdzfinansējuma piesaiste un tam sekojoša projekta rezultātu komercializācija.
4)	Pieprasījuma riski	Augsta	Zema	Riski saistīti ar patērētāju nevēlēšanos iegādāties produktu, pircēju izvēli par labu lētākam produktam. Lai gan riska ietekme ir augsta, gan LVKĶI zinātnieku, gan ražotāju pienākums būs informēt interesentus par jaunā produkta konkurētspēju un atšķirībām ar tā analogiem. LVKĶI jau to dara, prezentējot pētījumu

PIELIKUMS

Nr. p.k.	Risks	Riska ietekme	Riska iestāšanās varbūtība	Riska minimizēšanas vai novēršanas plāns
				rezultātus zinātniskajās konferencēs, tādējādi veicinot industrijas informētību par produktu. Nākotnē ir veicami informatīvi pasākumi nozīmīgākajiem industrijas spēlētājiem – būvmateriālu ražotājiem, būvniecības uzņēmumiem, kokapstrādes uzņēmumiem, arhitektiem. Pasākumi ietver informācijas izvietošanu mājaslapā, dalību konferencēs, tirdzniecības misijās, izstādēs.
5)	Juridiskie riski	Vidēja	Vidēja	Riski saistīti ar intelektuālā īpašuma tiesību nostiprināšanu, neizdevīgu līgumu slēgšanu. Lai izvairītos no juridisko risku iestāšanās, LVKĶI papildus jau esošajam patentam plāno nostiprināt ES patentu, tādējādi pasargājot savas IIT. Plānots nostiprināt ES patentu lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražošanas procesam. Lai izvairītos no neizdevīgu līgumu slēgšanas riskiem, LVKĶI rūpīgi izvēlēsies IIT pārneses stratēģiju, piemēram, rīkos izsoli licences iegādei un/vai uzrunās ražotājus *B2B*.
6)	Sociālie riski	Zema	Vidēja	Riski saistīti ar patērētāju neinformētību par produktu, un darbaspēka nepieejamību produkta ieviešanai ražošanā. Riska potenciālā iestāšanās gadījumā ir iespēja, ka lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražotāji nespēs atrast noietu savai produkcijai, kas saražota, izmantojot TS metodi. Riska ietekme vērtējama kā zema, šobrīd pasaulē valdošās tendences vērstas uz vides saudzēšanu un saglabāšanu, kā arī oglekļa mazietilpīgas ekonomikas radīšanu. Lai minimizētu šo risku, LVKĶI plāno uzrunāt arhitektus un koka karkasa māju ražotājus, stāstot par produkta priekšrocībām, tādējādi nododot informāciju par produktu gala patērētājiem. Darbaspēka nepieejamība produkta ieviešanai ražošanā vērtējama kā zema. LVKĶI pašlaik ir 138 darbinieki, no tiem 74 – zinātnieki. LVKĶI ir plaša pieredze gan produktu komercializēšanā (pašlaik veiksmīgi notiek ekoloģiskas saistvielas no bērza tāss komercializācija TRL6 līmenī), gan rūpniecisko pētījumu un eksperimentālo izstrādņu veikšanā, attīstot produktus līdz TRL6-TRL6 līmenim. Saskaņā ar LVKĶI Stratēģiju 2015.-2020. gadam, plānots arī būtiski palielināt nodarbināto skaitu. Savukārt ražotnēs šāda riska iestāšanās varbūtība ir zema, jo tehnoloģiskais process ir vienkāršs un apgūstams ražotnē.

PIELIKUMS

2. Tirgus analīze

2.1. Tirgus izmērs

Siltumizolācijas materiālu tirgus

Globālais siltumizolācijas materiālu tirgus lielums 2018. gadā bija lēšams ap 52,18 miljardiem ASV dolāru, un paredzams, ka līdz 2025. gadam tas palielināsies par 5,7%. Tiek lēsts, ka tirgus izaugsmi veicinās pieaugoša patērētāju informētība par enerģijas taupīšanu un pieprasījuma pieaugums pēc dzīvojamajām mājām. Tādi faktori kā strauja industrializācija un urbanizācija tādās jaunattīstības valstīs kā Ķīna, Indija, Filipīnas, Malaizija un Indonēzija veicina pieprasījumu pēc labākas, kvalitatīvākas infrastruktūras.

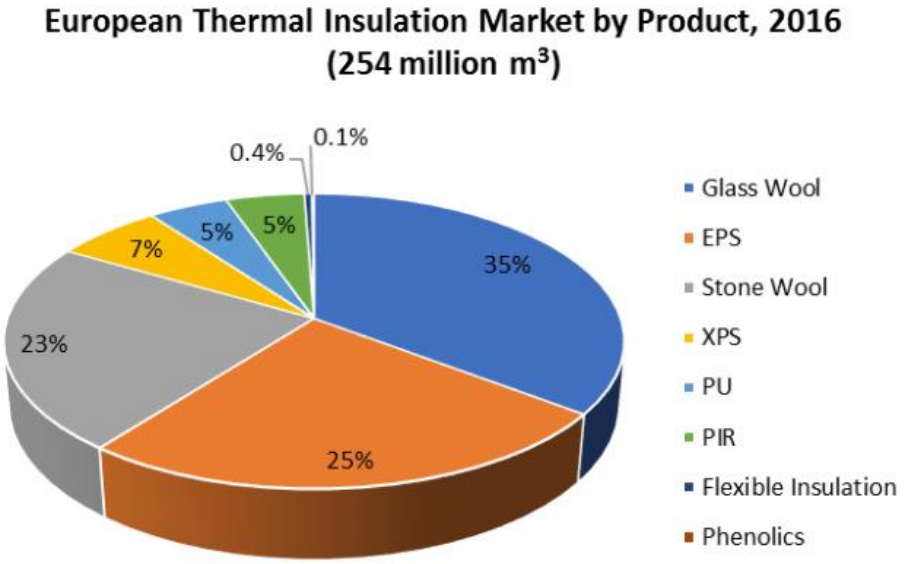
Pasaulē pieprasītākais siltumizolācijas materiāls ir minerālvate (stikla vate un akmens vate), galvenokārt tā zemās cenas un zemās siltumvadītspējas dēļ, proti, produktam ir laba cenas un energoefektivitātes attiecība. Otrs pieprasītākais siltumizolācijas materiāls bija putu polistirols tā vienkāršā pielietojuma dēļ. Aptuveni puse no pasaulē pieprasītā siltumizolācijas materiāla tika pielietota industriālām vajadzībām, bet puse – mājsaimniecībās.

Eiropā un Ziemeļamerikā galvenie tirgus izaugsmes virzītāji ir stingri valdības noteikumi par siltumnīcefekta gāzu emisijas samazināšanu un energoefektivitātes uzlabošanu. Starp pasaules lielākajiem ēku siltumizolācijas materiālu ražotājiem minami Owens Corning, Kingspan Group, Saint-Gobain, Rockwool un BASF. [17]

Kopējais siltumizolācijas materiālu tirgus Eiropā 2017. gadā bija lēšams 259 miljonu m^3 apmērā. Rietumeiropa veidoja 58% no Eiropas siltumizolācijas patēriņa, bet visstraujāk augošais siltumizolācijas materiālu tirgus Eiropā ir Austrumeiropas valstis.

Lai arī būvniecības nozare vēl nav līdz galam atkopusies no 2008. gada krīzes, nepieciešamība paaugstināt ēku energoefektivitāti un augošās energoresursu cenas ir palielinājušas pieprasījumu pēc siltumizolācijas materiāliem Eiropā. 86% no siltumizolācijas materiālu tirgus pieprasījuma veidoja ēku siltināšana, bet 14% - siltumizolācijas materiālu pieprasījums industriālai izmantošanai.[18]

Attēls 8. Siltumizolācijas materiālu pieprasījums Eiropā 2016.gadā pēc materiāla veida[19].



[17] Insulation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (EPS, XPS, Glass Wool, Mineral Wool), By Application (Infrastructure, Industrial, HVAC & OEM), By Region, And Segment Forecasts, 2019 - 2025
[18] http://rialteam.mozello.com/news/waterproofing-and-thermal-insulation/params/post/1805404/
[19] Insulation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (EPS, XPS, Glass Wool, Mineral Wool), By Application (Infrastructure, Industrial, HVAC & OEM), By Region, And Segment Forecasts, 2019 - 2025

Vispieprasītākie siltumizolācijas materiāli Eiropā ir stiklavate (35%) un putu polistirols (25%), trešais pieprasītākais siltumizolācijas materiāls ir akmensvate (23%).

Dabisko siltumizolācijas materiālu tirgus

Tiek prognozēts, ka globālais zaļo būvmateriālu tirgus līdz 2022. gadam sasniegs 377 miljardus ASV dolāru (salīdzinājumam – 2015. gadā tas bija tikai 171,48 miljardu ASV dolāru vērts). Tirgus izaugsmes temps ir 11,9% gadā. Zaļos būvmateriālus būvniecībā izmanto, lai risinātu dažādas vides problēmas, tostarp anomālās klimata izmaiņas, dabas resursu noplicināšanos, atmosfēras piesārņojumu, saldūdens resursu piesārņošanu un bioloģiskās daudzveidības samazināšanos. Zaļo būvmateriālu videi draudzīgās īpašības, izturība un energoefektivitāte padara tos piemērotus izmantošanai dzīvojamo un nedzīvojamo ēku projektēšanā.

Šobrīd tirgū pieejami dabiskie siltumizolācijas materiāli kā kaņepju betons (kaņepju spaļu un kaļķu sajaukums) un ekovate (beramais siltumizolācijas materiāls, kas iegūts no celulozes šķiedrām). Ēku siltumizolācijai iespējams izmantot arī zāģu skaidas, kas ir 100% dabisks produkts, taču tās ir nekonkurētspējīgas to labās siltumvadītspējas dēļ – šādā veidā siltinātām ēkām ir zemi energoefektivitātes rādītāji.

Dabiskie un ekoloģiskie siltumizolācijas materiāli tiek plaši pielietoti eko māju un pasīvo māju būvniecībā, tāpēc ekoloģisko siltumizolācijas materiālu tirgus ir cieši saistīts ar eko māju tirgus tendencēm. Ekomājas un pasīvās mājas ir populāras Skandināvijas valstīs jau vairākus gadu desmitus, bet līdz ar energoresursu cenu pieaugumu un iedzīvotāju informētības līmeņa celšanos ar vides aspektiem saistītos jautājumos, pieprasījums pēc ekomājām un pasīvajām mājām strauji aug visā Eiropā un Ziemeļamerikā[20].

Tirgus spēlētāji

Lielākie siltumizolācijas materiālu ražotāji pasaulē ir:

BASF

BASF ražo plastmasas, ķīmiskas vielas, augu aizsardzības līdzekļus, kā arī eļļu un gāzi. Uzņēmums apkalpo dažādas nozares, piemēram, automobiļu, papīra, mēbeļu un citas nozares, un tai ir klienti 80 valstīs. Uzņēmums ražo dažāda veida siltumizolācijas materiālus ar zīmoliem Styrodur un Neopor jumtu un sienu siltināšanai. .

Knauf

Knauf Insulation ražo un pārdod termiskās un akustiskās izolācijas materiālus no stiklavates dzīvojamām, nedzīvojamām, komerciālām, jūras un rūpnieciskām ēkām jumtu, sienu un grīdus segumiem.

Owens Corning

Owens Corning ražo un pārdod stikla šķiedras pastiprinājumus un citus materiālus dzīvojamo un komerciālo ēku celtniecībai visā pasaulē. Uzņēmums piedāvā arī dažādu veidu siltumizolācijas putas dažādiem pielietojumiem, piemēram, jumtos un sienās.

Paroc grupa

Paroc grupa ir viens no vadošajiem energoefektīvo dzīvojamo un komerciālo ēku izolācijas risinājumu ražotājiem visā pasaulē. Tas nodrošina ēku izolāciju, jūras un piekrastes izolāciju, tehnisko izolāciju, sendvičpaneļus un akustiskos produktus. Uzņēmums piedāvā cita veida izolācijas materiālus atkarībā no pielietojuma veida, piemēram, jumtam, sienām vai grīdām.

ROCKWOOL International

[20] Green Building Materials Market by Product Type (Exterior Products, Interior Products, Building Systems, Solar Products and Others), Application (Residential Buildings and Non-residential Buildings) - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2014-2022

PIELIKUMS

ROCKWOOL International ražo un tirgo akmensvates izolācijas izstrādājumus visā pasaulē. Siltumizolācijas segmentā uzņēmums piedāvā jumta siltumizolācijas izstrādājumus dzīvojamām un komerciālām vajadzībām, kā arī rūpnieciskās un tehniskās izolācijas izstrādājumus.

Lielākie siltumizolācijas materiālu ražotāji Latvijā ir SIA Knauf, SIA Tenapors, SIA Tenax Panel. LVKĶI komercializācijas projekta 2.posmā plāno uzrunāt ekoloģisko un dabisko siltumizolācijas materiālu ražotājus.

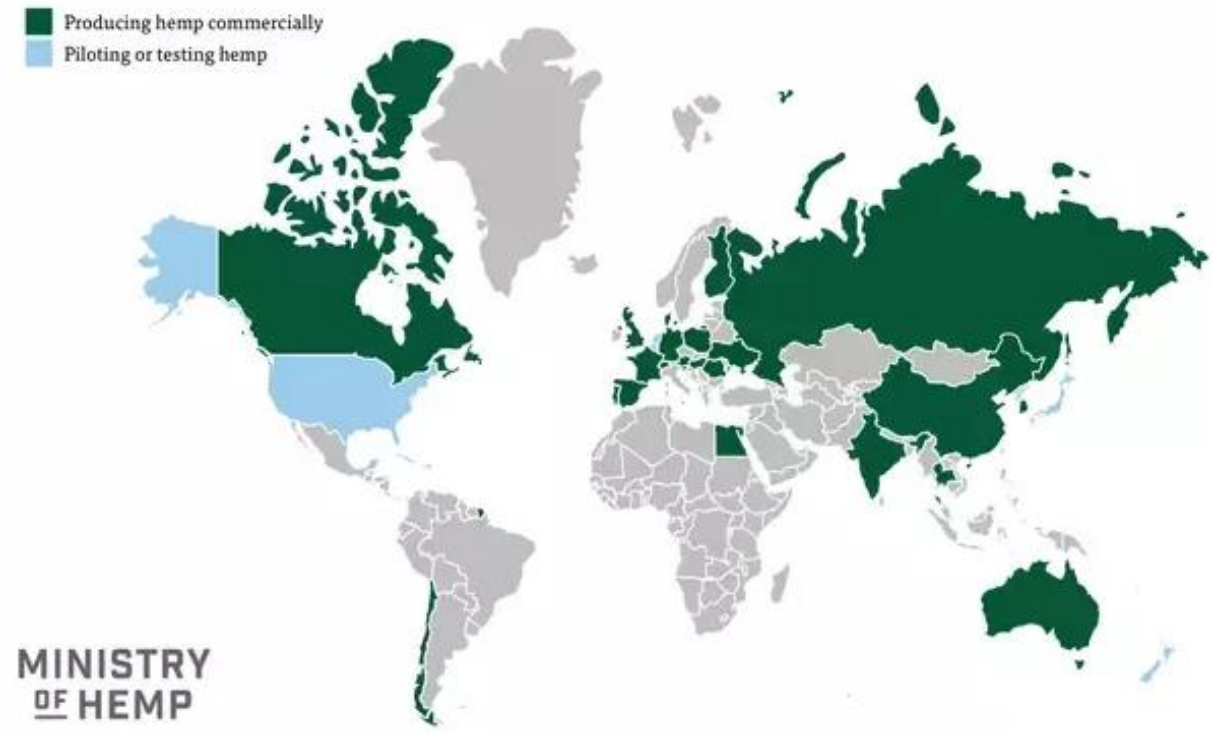
2.2. Izejmateriālu pieejamība

2.2.1. Izejmateriālu tirgus

Industriālā kaņepe

Industriālā kaņepe (*canabis sativa*) ir rūpnieciska kultūra, ar augstvērtīgu dabisko šķiedru, koksni (spaļiem) un sēklām. Industriālās kaņepes sēklas satur eļļu, ko izmanto medicīnā, kosmētikā, pārtikā, bet tā nesatur halucihēnās vielas, kas raksturīgas marihuanai. Konkrēti, psihi iespaidojošās vielas – tetrahidrokanabinola (turpmāk – THB) līmenis industriālajā kaņepē ir zem 0,3% THB, kāmēr marihuanā tas ir līdz 25% THB no ekstrakta sausnas. Tāda kaņepe tikpat ir narkotiķis, kā rūgušpiens ir alkoholisks dzēriens, jo arī satur ap 0,25% spirta. Industriālās kaņepes audzēšana ir atļauta un tiek veicināta ar likumdošanu gandrīz visās ES valstīs, Kanādā, Āfrikā, Austrālijā, Ķīnā u.c[21]. Industriālās kaņepes tiek plaši audzētas tādās valstīs kā Kanāda, Krievija, Austrālija, Ķīna, Čīle, Ēģipte un lielākā daļa Eiropas.

Attēls 9. Industriālo kaņepju audzēšana pasaulē[22]

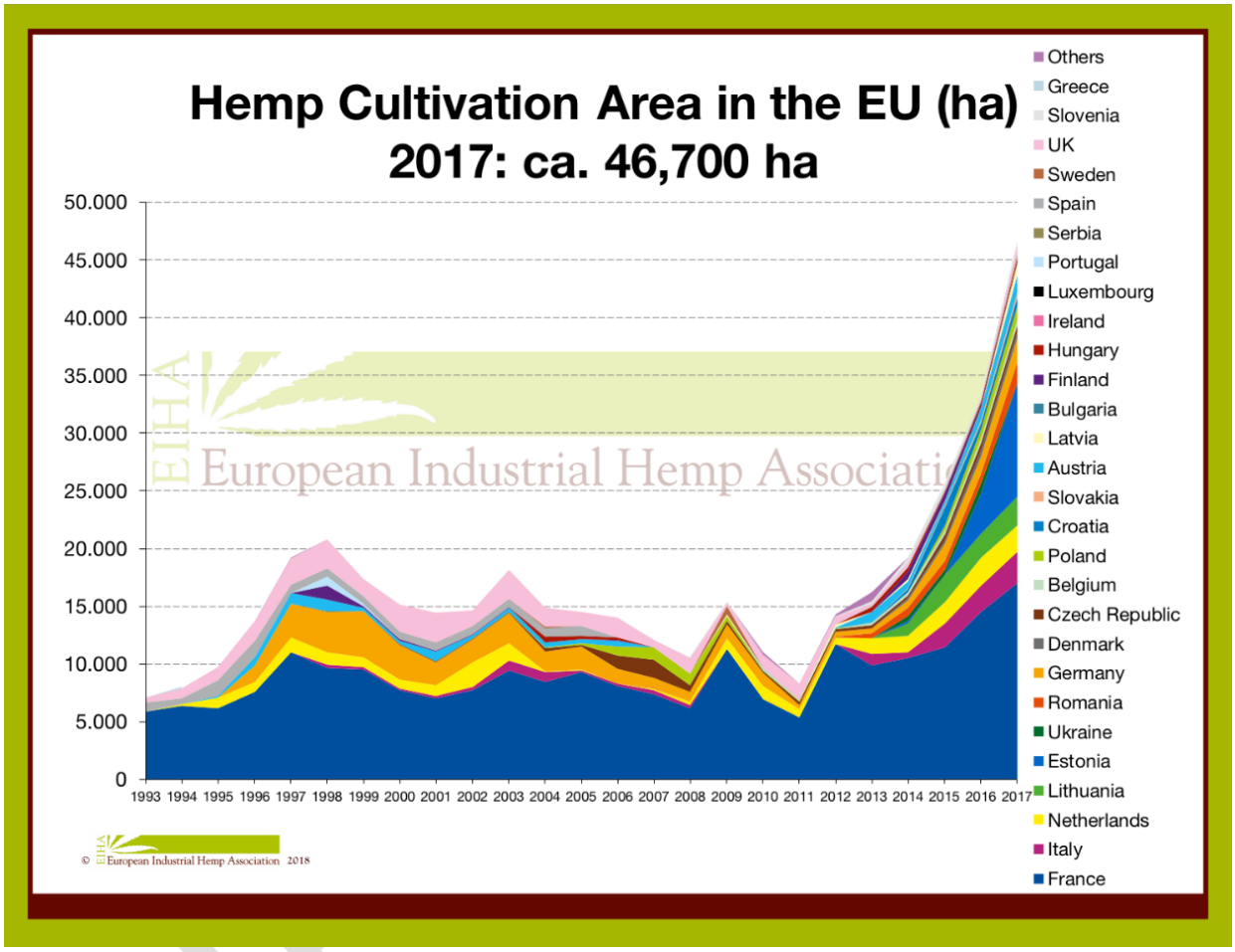


2017. gadā Eiropā tika audzēti 46 700ha industriālās kaņepes. Eiropā lielākā kaņepju audzētājvalsts ir Francija, kurā ar kaņepēm tiek apsēti ap 18 000ha. Pēdējo 3 gadu laikā kaņepju audzēšana straujāk attīstījusies Igaunijā, Lietuvā un Nīderlandē. Attēls 10 parāda, ka kopš 2012. gada kaņepju sējumi

[21] www.lathemp.lv
[22] https://thegoodearth.global/hemp-industry-france/

Eiropā ir palielinājušies trīs reizes. Šobrīd lielākā industrijas problēma ir nevis zemnieku nevēlēšanās audzēt kaņepes vai pieprasījuma trūkums pēc augstvērtīgiem kaņepju produktiem, bet gan efektīva blakusproduktu apsaimniekošana.

Attēls 10. Industriālo kaņepju audzēšana Eiropā[23]

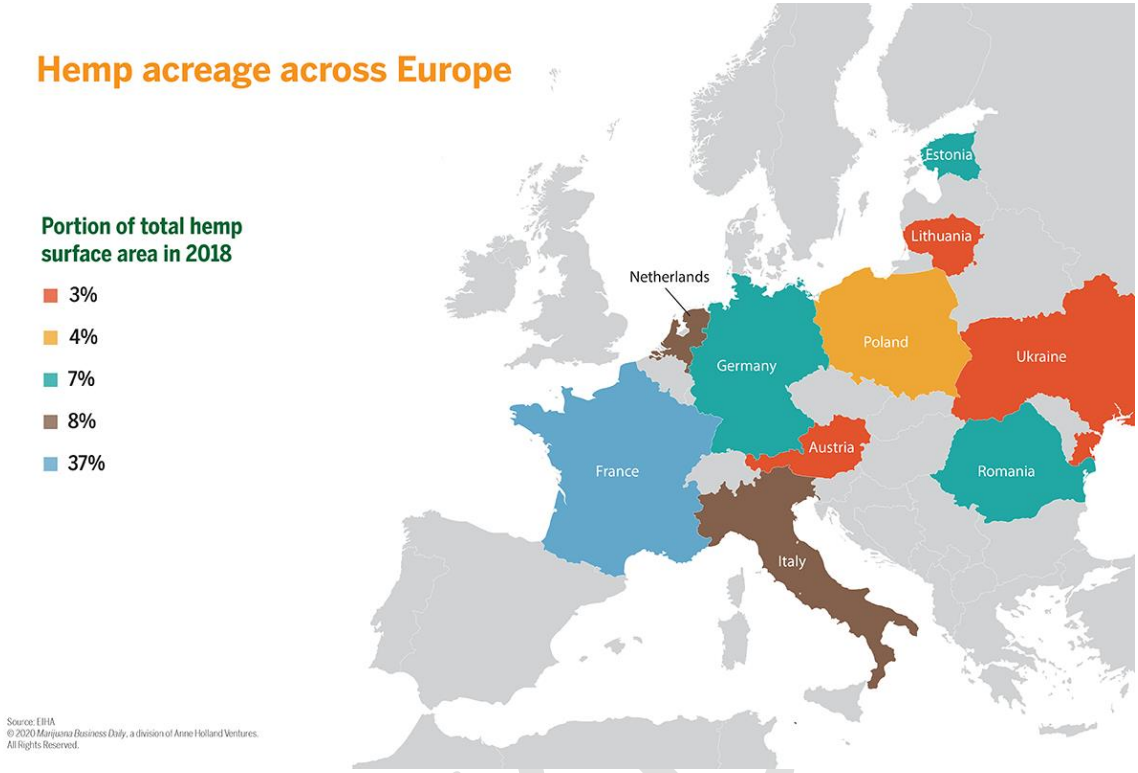


Lielākās ar kaņepēm apsētās platības Eiropā 2017. gadā bija Francijā, Igaunijā, Itālijā, Nīderlandē un Lietuvā. Šajās valstīs pēdējo 5 gadu laikā tika novērtos arī lielākais kaņepju platību pieaugums. Turklāt laika posmā no 2012. līdz 2017. gadam ar kaņepēm apsētās platības Eiropā trīskāršojās no 15 000 ha līdz 45 000 ha.

Attēlā 11 nākamajā lappusē atspoguļotas lielākās kaņepju audzētājvalstis Eiropā.

[23] https://thegoodearth.global/hemp-industry-france/

Attēls 11. Lielākās kaņepju audzētājvalstis Eiropā[24]



37% no visiem kaņepju sējumiem Eiropā atradās tieši Francijā.

Eiropā lielākās kaņepju audzētājvalstis saskaņā ar 2018. gada datiem bija:

1) Francija – 17 900 ha
2) Itālija – 4 000 ha
3) Nīderlande – 3 833 ha
4) Igaunija: 3 538 ha
5) Rumānija – 3 400 ha
6) Vācija – 3 114 ha
7) Polija – 1 708 ha
8) Austrija – 1 583 ha
9) Ukraina – 1 500 ha
10) Lietuva – 1 470 ha[25]

37% no visiem Eiropas kaņepju sējumiem 2018. gadā atradās Francijā, 8% Itālijā, 8% Nīderlandē, bet 7% - Igaunijā, Rumānijā un Vācijā (attiecīgi katrā valstī). Par nozīmīgām kaņepju audzētājvalstīm var uzskatīt arī Poliju (4% no visiem sējumiem) un Lietuvu, Austrij un Ukrainu (attiecīgi 3% no kopējiem sējumiem katrā valstī). Savukārt Latvijā tika audzēts mazāk par 1% no kopējiem kaņepju sējumiem Eiropā. Neskatoties uz to, ka Latvijā ir senas kaņepju audzēšanas tradīcijas, šī lauksaimniecības joma valstī ir praktiski izmirusi.

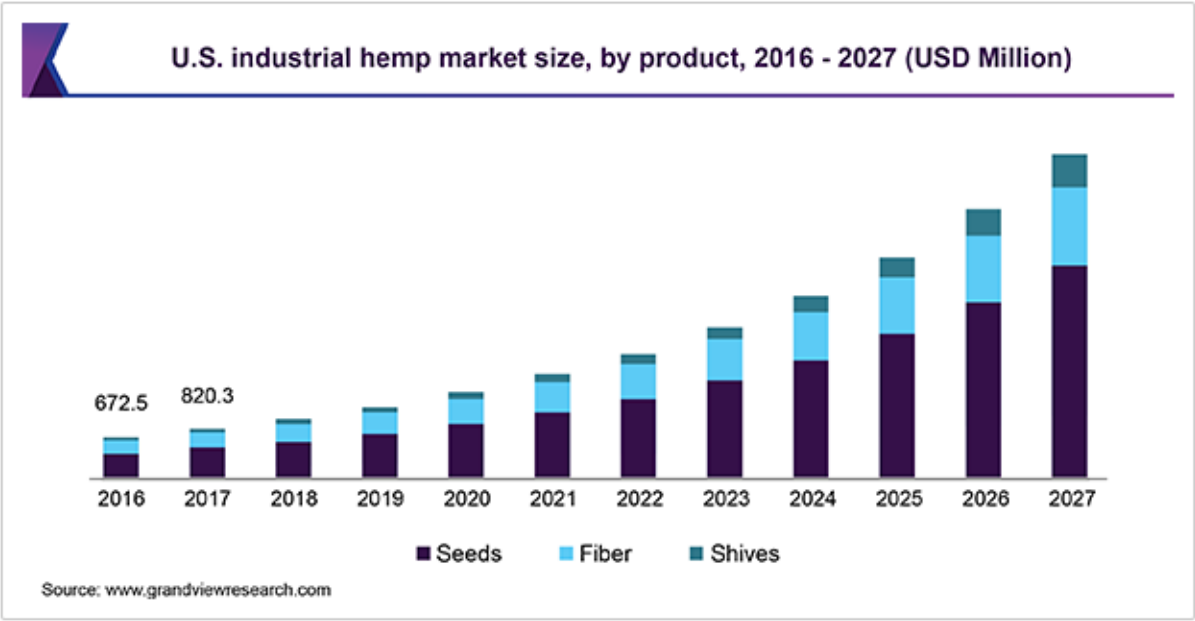
Industriālās kaņepes pielietojuma spektrs ir plašs – no kaņepēm tiek ražoti pārtikas un kosmētikas produkti, tekstila šķiedras, medikamenti un uztura bagātinātāji, lopbarība, pakaiši un būvmateriāli.

[24] https://hempindustrydaily.com/france-italy-netherlands-lead-europe-for-hemp-land-use-industry-group-says/
[25] https://hempindustrydaily.com/france-italy-netherlands-lead-europe-for-hemp-land-use-industry-group-says/

Attēls 12. Industriālās kaņepes pielietojums[26]

Attēlā 13 zemāk ir atspoguļoti gūtie un plānotie ieņēmumi ASV 2016.-2027.g. pēc kaņepju produktu veidiem.

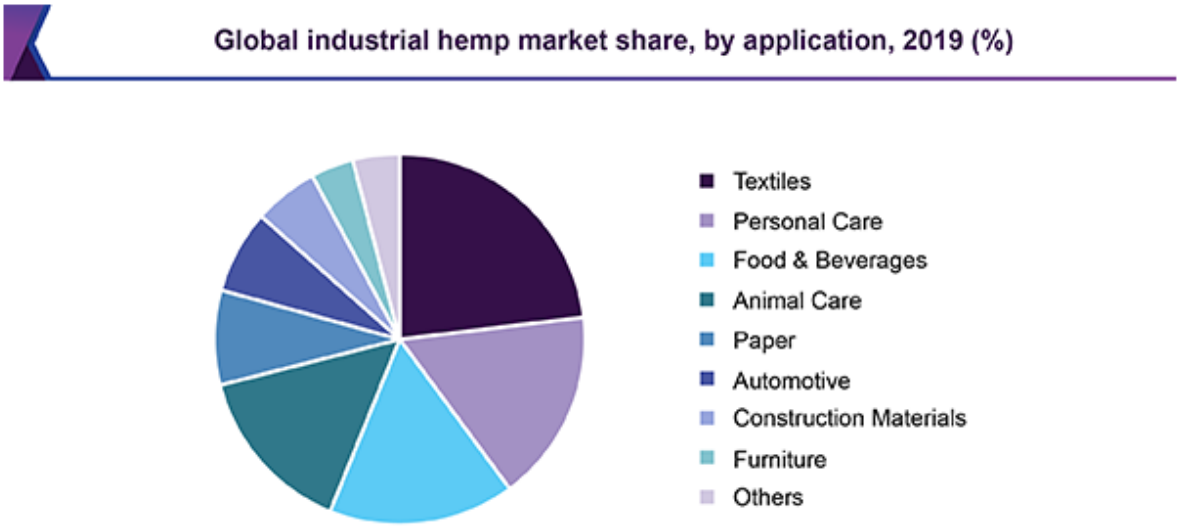
Attēls 13. Gūtie un plānotie ieņēmumi ASV 2016.-2027.g. pēc kaņepju produktu veidiem[27]



[26] www.lathemp.lv
[27] https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-hemp-market

Saskaņā ar pašreizējām aplēsēm, aptuveni 3/4 ieņēmumu no kaņepju pārstrādes tiek gūti no sēklām, lai gan tās sastāda tikai 3 – 5% no izaudzētās kaņepju masas. Vēl aptuveni 20% ieņēmumu tiek gūti no kaņepju šķiedrām, kas veido vien 20-25% no kaņepju masas. Un vismazākā ieņēmumu daļa jeb aptuveni 5% tiek gūti no kaņepju spaļiem, lai gan tie veido 70-75% no izaudzētās kaņepju masas. Kaņepju spaļi šobrīd ir visnevērtīgākais kaņepju produkts, taču LVKĶI, īstenojot komercializācijas projekta 2.posmu, plāno būtiski celt kaņepju spaļu vērtību un komercializēt tehnoloģiju kaņepju spaļu pārstrādei augstas pievienotās vērtības produktā.

Attēls 14. Globālais industriālo kaņepju tirgus pēc pielietojuma veida 2019. gadā[28]



Lielākos kaņepju produktu tirgus veidoja kaņepju tekstila, personīgās higiēnas (kosmētikas) un pārtikas tirgi. Aptuveni 10% veidoja kaņepju būvmateriālu tirgus, taču pēc LVKĶI domām šim tirgum ir augsts attīstības potenciāls, ieviešot tirgū jaunus, konkurētspējīgus produktus.

Baltalksnis

Baltalksnis *(Alnus incana)* ir ātraudzīgs, vasarzaļš, vienmājas koks ar slaidu stumbru. Miza gluda gaiši pelēka. Jaunie dzinumi pūkaini. Lapas apakšpuse pelēkzaļa, pūkaina, mala divkārt zāģzobaina, gals nosmailināts, sāndzīslas 8-12 pāri. Baltalkšņa audzes aizņem 7% no Latvijas mežu kopplatības (privāto īpašnieku mežos ap 18%). Baltalksnis pārsvarā aug mēreni mitrās, trūdainās mālsmilts augsnēs, it sevišķi ar kaļķainu piejaukumu. Koks var sasniegt 25m augstumu un 60 gadu vecumu. Nabadzīgās

[28] https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-hemp-market

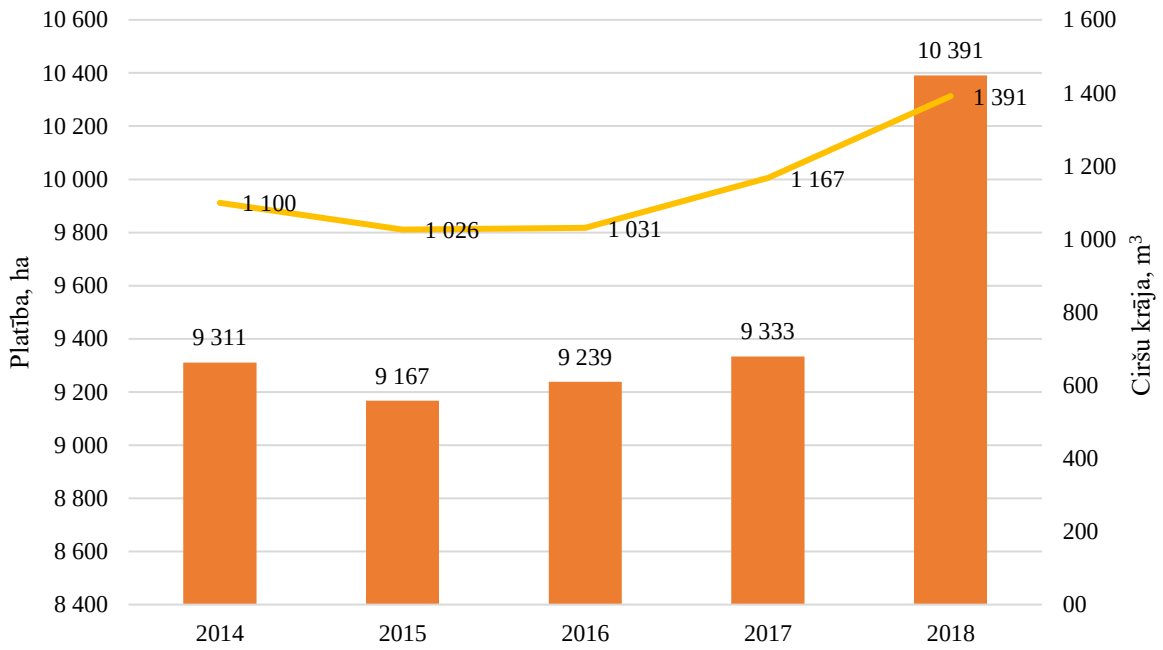
augsnēs, sausās vai pārlieku mitrās vietās izaug tikai sīks kociņš vai krūms. Baltalksnis ir saulmīļu suga. Aug gan tīraudzēs, gan mistrotās audzēs. Baltalksnis ātri ieviešas neapstrādātās lauksaimniecības zemēs un grāvmalās.

Baltalkšņa koksni izmanto taras dēlīšu ražošanai, kā kurināmo malku un kā kurināmo zivju un gaļas kūpinājumu izgatavošanai. Baltalksnim Latvijā nav noteikts ciršanas vecums. Meža īpašnieks galvenajā cirtē baltalksni var cirst pēc saviem ieskatiem.

1947.gadā Latvijas mežos tika atrasti melnalkšņa un baltalkšņa dabiskie krustojumi - hibrīdi (*Alnus hybrida*). Hibrīdiem piemīt gan melnalkšņa, gan baltalkšņa ārējās pazīmes - tie ir ātraudzīgi un labāk piemērojas nelabvēlīgiem augšanas apstākļiem[29].

2018. gadā tika izcirsti 10 931ha baltalkšņa jeb iegūts 1 391 m^3 ciršu krājas. No 2014. līdz 2018. gadam Latvijā palielinājusies baltalkšņu izciršanas apjomi un izcirstā krāja. Sevišķi strauji tā palielinājās 2018. gadā, kad izcirstā baltalkšņu platība palielinājās par 12% salīdzinājumā ar 2014. gadu, bet ciršu krāja – par 27%[30].

Attēls 15. Izcirstās baltalkšņu platības, ha un ciršu krāja, m^3 Latvijā, 2014. - 2018.g[31].



2018. gadā tika atjaunotas baltalkšņa audzes 5 756ha platībā. 14% no visām atjaunotajām mežu platībām veidoja baltalkšņa audzes. Baltalksnis bija vadošā koku suga Latvijas mežos - 7% no kopējās platības, t.sk. 1% valsts mežos un 14% pārējo īpašnieku mežos. 2018. gadā baltalkšņa audzes veidoja 1% no atjaunotajām mežu platībām valsts mežos, bet citu īpašnieku mežos – pat 22%. [32] Lai gan valsts mežos baltalkšņa audzes netiek intensīvi atjaunotas, ņemot vērā to, ka privātajos mežos īpašnieki izvēlas audzēt baltalksni, tuvāko 10-20 gadu perspektīvā nav pamata uzskatīt, ka baltalkšņa platības un kopējā krāja varētu samazināties. Tiek prognozēts, ka šis izejmateriāls būs pieejams siltumizolācijas materiālu ražošanai.

[29] http://www.mezataksacija.lv/koki/baltalksnis/
[30] Centrālā statistikas pārvalde, MEG030. Izcirstās platības un krājas pa valdošajām koku sugām visos mežos, 2020
[31] Centrālā statistikas pārvalde, MEG030. Izcirstās platības un krājas pa valdošajām koku sugām visos mežos, 2020
[32] https://www.zm.gov.lv/public/ck/files/skaitlifakti_LV_19.pdf

2.2.2. Izejmateriālu cenu analīze

LVKĶI ir veicis izpēti par aktuālajām kaņepju spaļu un baltalkšņa šķeldu cenām Latvijā.

Tabula 5. Kaņepju spaļu un baltalkšņa šķeldu cenas Latvijā 2020. gadā

Nr.p.k.	Izejmateriāls	Piegādātājs	Cena, EUR/t
1.	Kaņepju spaļi	SIA "Zalers" (www.hemptime.lv)	397,00
2.	Kaņepju spaļi	SIA NDRA	150,00 – 300,00
3.	Kaņepju spaļi	SIA Atdzelvieši	Netirgo, utilizē atkritumos. Apsvērtu tirdzniecību, ja būtu lielāks pieprasījums.
4.	Kaņepju spaļi	SIA DOLCETTA	Netirgo, utilizē atkritumos. Apsvērtu tirdzniecību, ja būtu lielāks pieprasījums.
5.	Kaņepju spaļi	Hemp Traders (Ķīna)[33]	300,00
6.	Kaņepju spaļi	Alibaba[34]	155,00 – 243,00
7.	Baltalkšņa šķeldas	SIA Vudlande	35,70
8.	Baltalkšņa šķeldas	SIA GreenWood	35,70
9.	Baltalkšņa šķeldas	www.ss.com sludinājumi	Vidēji 25,00

Kaņepju spaļu cena šobrīd ir 155-400 EUR/t robežās, taču telefonsarunā ar SIA Dolcetta tika noskaidrots, ka kaņepju salmu cena ir 140 EUR/t. Baltalkšņa šķeldu cena ir 7 - 10 EUR/m^3, bet vienā tonnā sausu šķeldu ir 3,57 m^3 [35]. Iegūtie dati par izejmateriālu cenām tika izmantoti izmaksu – ieguvumu analīzes veikšanai.

2.3. Mērķa tirgus analīze

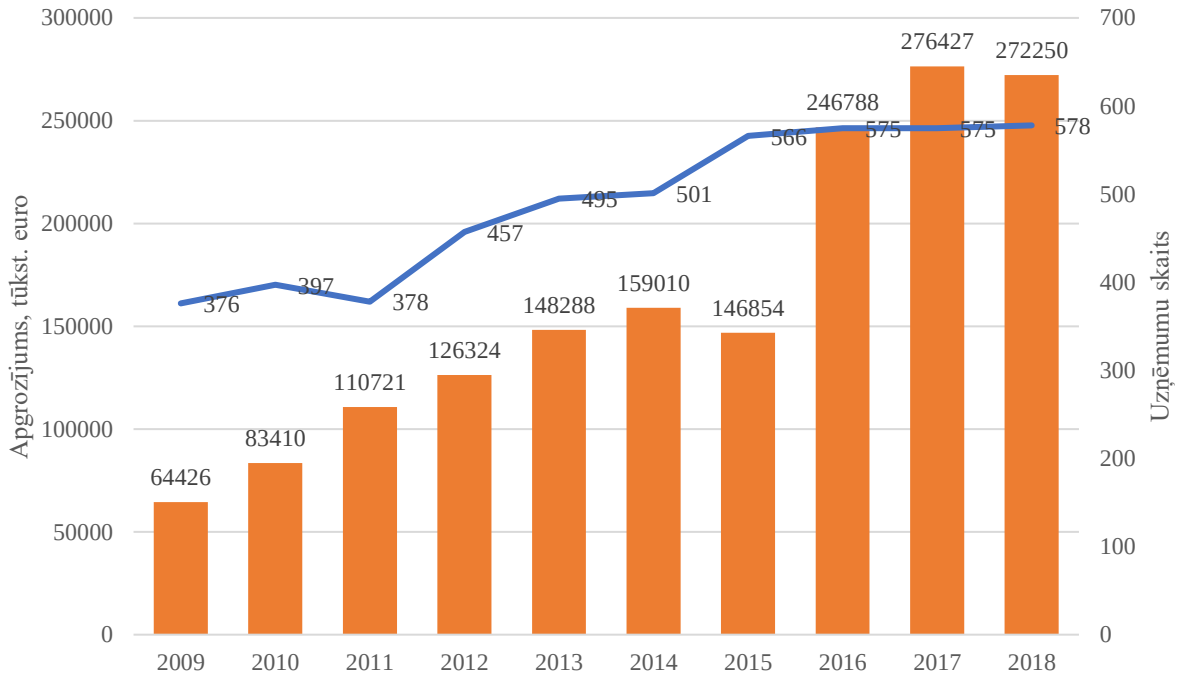
Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla **galvenais mērķa tirgus ir koka karkasa māju ražotāji**, kurās ar jauno materiālu būtu iespējams siltināt grīdu, sienu, pārsegumu un pat jumta konstrukcijas. Tikai Latvijā vien, no 2010.g. līdz 2018.g. jauno dzīvojamo māju būvniecība naudas izteiksmē pieaugusi no 44,8 milj. EUR līdz 180,4 milj. EUR, bet dzīvojamo māju remontdarbi no 23,2 milj. EUR līdz 120,3 milj. EUR[36].

Koka karkasa māju ražošanas apakšnozare saskaņā ar Nace 2.red. klasifikāciju ir C 16.23 "Namdaru un galdniecības izstrādājumu ražošana", jo apakšnozarē ietilpst darbība "saliekamo būvju vai to konstrukciju ražošana, kuru galvenās sastāvdaļas ir koksne, piemēram, saunas; – pārvietojamo māju ražošana".

Nākamajā lappusē atspoguļoti apakšnozari C 16.23 raksturojošie rādītāji.

[33] https://www.hemptrademarket.com/hemp-shives-for-hempcrete
[34] https://www.hemptrademarket.com/hemp-shives-for-hempcrete
[35] http://www.silava.lv/userfiles/file/2017_Erasmus_rokasgramata/2017_Erasmus_manual_LV_39_Koksne_ener%C4%A3%C4%93tikai.pdf
[36] BU021c. Ēku būvniecība pa būvju veidiem, faktiskajās cenās, tūkst. euro, 2019

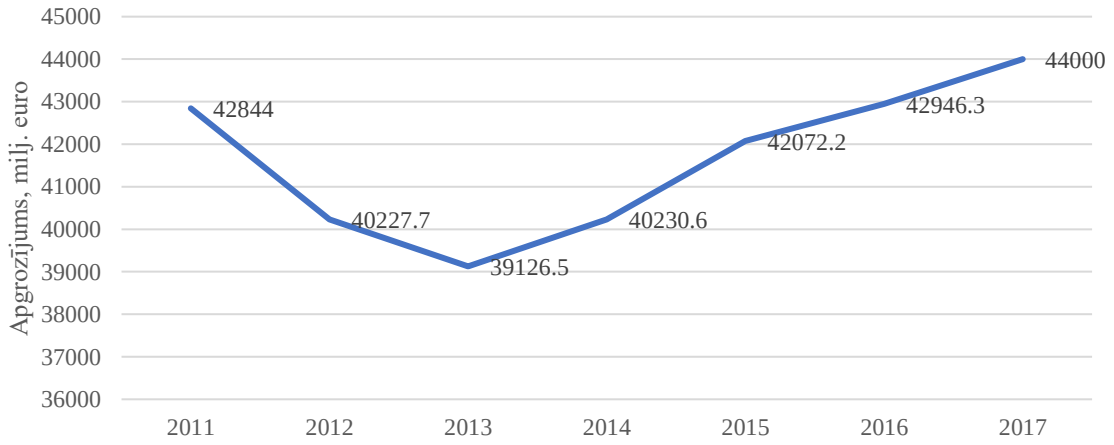
Attēls 16. Apakšnozarē C 16.23 darbojošos uzņēmumu skaits un apgrozījums, tūks. euro Latvijā, 2009.-2018.g.[37]



Pēdējo 10 gadu laikā vērojams straujš apakšnozares C 16.23 apgrozījuma kāpums – no 64,4 miljoniem euro 2009. gadā līdz 272,25 miljoniem euro 2018. gadā. 10 gadu laikā nozares apgrozījums Latvijā četrkāršojās, bet darbojošos uzņēmumu skaits palielinājās no 376 komersantiem 2009. gadā līdz 578 komersantiem 2018. gadā. Var secināt, ka arī koka karkasa māju ražošanas apjomi Latvijā aug straujiem tempiem, veicinot pieprasījuma pieaugumu pēc būvmateriāliem.

Saskaņā ar Eurostat datiem, ES 2018. gadā nozares C 16.23 kopējais apgrozījums bija 533,638 miljardi euro, un visā ES nozarē darbojās 94,5 tūkstoši komersantu. Attēlā zemāk atspoguļota ES apakšnozares C 16.23 apgrozījuma dinamika[38].

Attēls 17. Apakšnozares C 16.23 uzņēmumu apgrozījuma dinamika Eiropas Savienībā 2011.-2017.g., milj. EUR



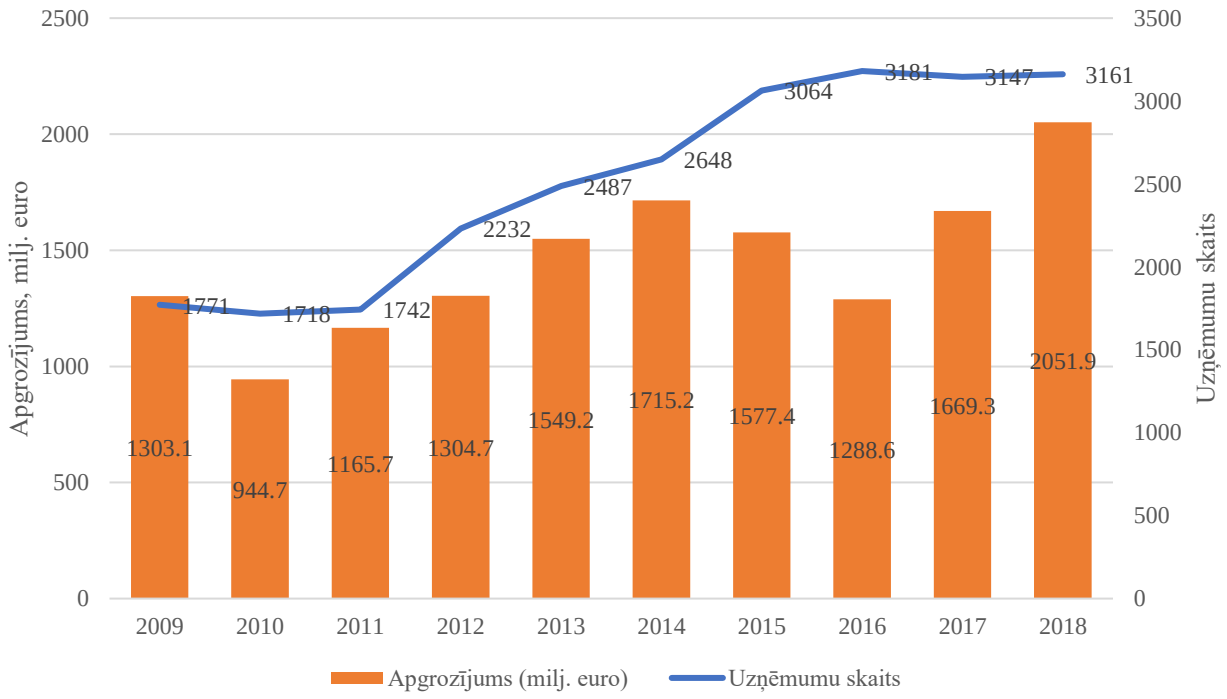
Neskatoties uz kritumu 2012.-2013. gadā, 2017. gadā apakšnozarē reģistrētais apgrozījums 44 miljardu euro apmērā bija lielākais pēdējo 7 gadu laikā.

[37] Centrālā statistikas pārvalde, SBG010. Uzņēmumu galvenie uzņēmējdarbības rādītāji, 2020
[38] Eurostat, Annual detailed enterprise statistics for industry (NACE Rev. 2, B-E)

Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla **sekundārais mērķa tirgus ir būvniecības nozare kopumā**, kas atbilst Nace 2. red. apakšnozarei F 41.20 "Dzīvojamo un nedzīvojamo ēku būvniecība".

Zemāk atspoguļoti apakšnozari F 41.20 raksturojošie rādītāji.

Attēls 18. Apakšnozarē F41.20 darbojošos uzņēmumu skaits un apgrozījums Latvijā, milj. euro, 2009.-2018.g.[39]



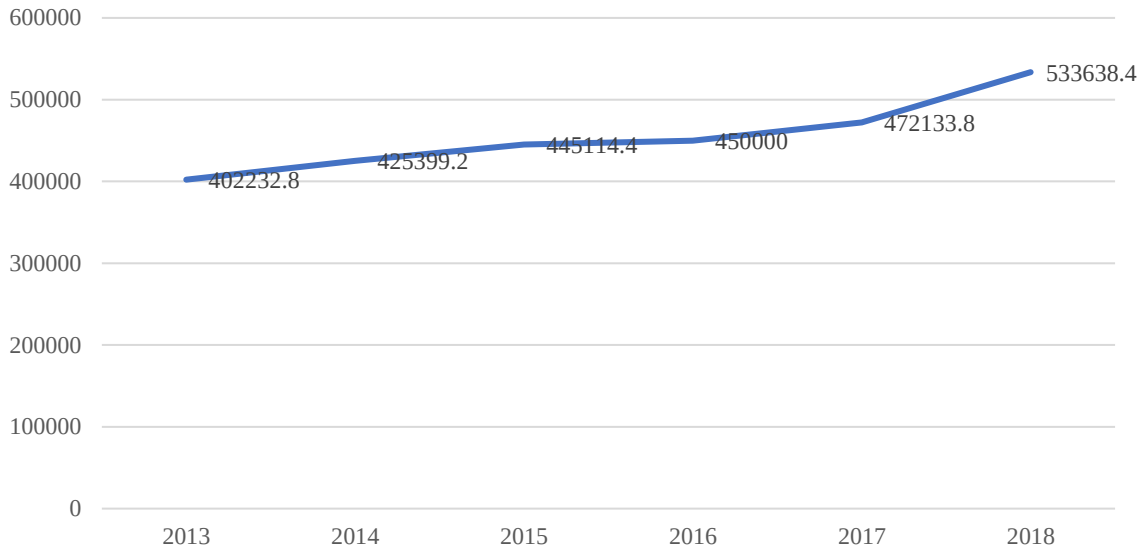
Apakšnozarē F 41.20 ietilpst plašs būvdarbu veicēju loks, kuri nodarbojas ar visa veida ēku būvniecību, tostarp nedzīvojamo ēku, palīgēku, utt., no visdažādākajiem materiāliem. Taču arī šīs apakšnozares nišas uzņēmumi (piemēram, pasīvo māju būvnieki) var rast vēlmi iegādāties dabisku beramo siltumizolācijas materiālu no lignocelulozes, īpaši, ja tā cena būs tirgū konkurētspējīga.

Neskatoties uz nozares apgrozījuma kritumu 2015.-2016. gadā, 2018. gadā apakšnozares apgrozījums bija lielākais pēdējo 10 gadu laikā, sasniedzot 2,05 miljardus euro, jeb par 57% vairāk nekā 2009. gadā. Apakšnozarē bija reģistrēts 3161 uzņēmums, bet kopējais nodarbināto personu skaits 2018. gadā bija 24'444 nodarbinātie. Pārliecinošais būvniecības nozares izaugsmes temps liecina par pieprasījuma pieaugumu arī pēc ilgtspējīgiem, kā arī cenas un kvalitātes ziņā konkurētspējīgiem būvmateriāliem.

Saskaņā ar Eurostat datiem, ES 2018. gadā nozares F 41.20 kopējais apgrozījums bija 533,638 miljardi euro, un visā ES nozarē darbojās 739 tūkstoši komersantu. Turklāt arī ES būvniecības tirgus turpina augt[40].

[39] Centrālā statistikas pārvalde, SBG010. Uzņēmumu galvenie uzņēmējdarbības rādītāji, 2020
[40] Eurostat, Annual detailed enterprise statistics for industry (NACE Rev. 2, F)

Attēls 19. Apakšnozares F 41.20 uzņēmumu apgrozījuma dinamika Eiropas Savienībā 2013.-2018.g., milj. EUR[41]



2018. gadā, salīdzinājumā ar 2013. gadu, ES būvniecības uzņēmumu apgrozījums pieauga par 32%.

Apakšnozaru C 16.23 un F 41.20 izaugsmes tendences Latvijā un ES ir līdzīgas – abas apakšnozares uzrāda stabili augošus uzņēmumu apgrozījuma tempus. Neapšaubāmi, straujš koka karkasa māju un būvniecības nozares izaugsmes temps ir cieši saistīts ar pieprasījuma kāpumu pēc konkurētspējīgiem, ilgtspējīgiem un inovatīviem būvmateriāliem, tostarp lētiem, energoefektīviem un dabiskiem siltumizolācijas materiāliem. Līdz ar to nav pamata uzskatīt, ka pieprasījums pēc siltumizolācijas materiāliem ēku siltināšanai tuvāko 10-20 gadu laikā varētu būtiski samazināties.

2.4. Pieprasījuma prognoze

Izolācijas materiālu tirgus 2016. gadā bija lēšams 23,89 miljardu ASV dolāru apmērā. Ir sagaidāms, ka izolācijas materiālu tirgus sasniegs 29,62 miljardus ASV dolāru līdz 2022. gadam, un CAGR 3,65% no 2016. līdz 2022. gadam. Ēku siltināšana ir viens no efektīvākajiem klimata pārmaiņu samazināšanas instrumentiem, īpaši klimatā ar plašu temperatūru diapazonu. Ņemot vērā to, ka klimata pārmaiņu ierobežošana ir viena no svarīgākajām Eiropas un visas pasaules prioritātēm, tiek lēsts, ka pasaulē strauji pieaugs pieprasījums pēc siltumizolācijas materiāliem. Vienlaikus jāņem vērā, ka siltumizolācijas materiāli tiek plaši pielietoti arī mašīnbūvē un elektroiekārtu ražošanā. Aizvien augošais pieprasījums pēc mašīnām un iekārtām, pieaugot pasaules iedzīvotāju skaitam un dzīves līmenim, veicinās arī pieprasījuma pieaugumu pēc dažādiem siltumizolācijas materiāliem.

Izolācijas plātņu no koksnes šķiedrām ražošanas apjomi Eiropā svārstās ar pieauguma tendenci no 3,4 mlj.m^3 2014.g. līdz 3,9 mlj.m^3 2018.g.[42], kas ir atkarīgs no pieprasījuma. Siltumizolācijas materiālu pieprasījums ir saistīts ar māju celtniecību, kas, savukārt ir atkarīgs no populācijas un ekonomikas līmeņa augšanas. Bez māju celtniecības vienmēr ir aktuāla arī māju renovācija, kur siltumizolācijas materiāli ieņem būtisku vietu. Siltumizolācijas materiāli ir aktuāli visā pasaulē, jo, piemēram, reģionos, kur ir ziema, tie saglabā siltumu mājas vidū, bet karstajos reģionos tie saglabā mājās zemāku temperatūru.

[41] Eurostat, Annual detailed enterprise statistics for industry (NACE Rev. 2, F)
[42] UNECE/FAO, 2019

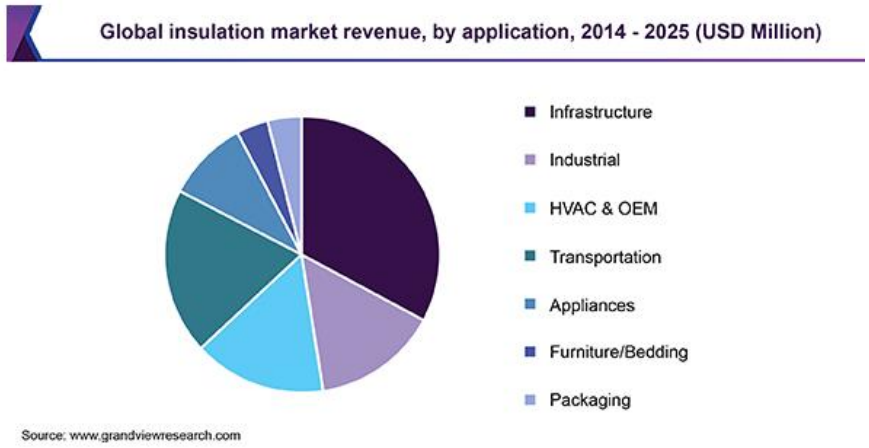
Attēls 20. Siltumizolācijas materiālu ģeogrāfiskais tirgu sadalījums 2022.g. (prognoze)

Prognozes liecina, ka 2022. gadā lielākie siltumizolācijas materiālu tirgi būs Rietumeiropa, Ziemeļamerika un Āzija ar Okeāniju.

Tirgus attīstības tendences pierāda, ka tuvākajās desmitgadēs tirgus pieprasīs "zaļākus" produktus ar zemāku GOS un CO_2 emisiju līmeni, zemāku smaku līmeni, u.c. Pat tad, ja likumdošana nepieprasīs lielāku pārstrādāto izejmateriālu pielietošanu un "zaļāku" izejmateriālu pielietošanu, tuvākajā desmitgadē pieprasījums pēc šādām tehnoloģijām tirgū var dubultoties[43].

Attēlā 21 zemāk atspoguļota pieprasījuma prognoze par ieņēmumiem no siltumizolācijas materiālu pārdošanas pēc siltumizolācijas materiālu pielietojuma jomas.

Attēls 21. Pasaulē pieprasītie siltumizolācijas materiāli pēc pielietojuma jomas, prognoze, 2014-2025.g.



Visvairāk siltumizolācijas materiālu tiek pieprasīts infrastruktūras jomā, tam seko industriālā ražošana, siltums, ventilācija un kondicionēšana (HVAC & OEM), kā arī transports. Beramie siltumizolācijas materiāli tiek izmantoti nozarē, kurā ir vislielākais pieprasījums pēc siltumizolācijas – infrastruktūras jomā (tostarp ēku būvniecībā).

[43] Building Thermal Insulation Market by Material (Glass Wool, Stone Wool, Polystyrene), Application (Flat Roof, Pitched Roof, External Wall, Internal Wall, Cavity Wall, Floor), Building Type (Residential, Non-residential) - Global Forecast to 2022

3. Intelektuālā īpašuma tiesību aizsardzība

Darbs pie lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas izstrādes LVKĶI aizsākās 2012.gadā, kad savu zinātniski eksperimentālo darbību par tematu **"Kaņepju spaļu šķiedru iegūšana ar tvaika sprādziena tehnoloģiju un to pielietošana kā beramo izolācijas materiālu"** uzsāka Latvijas Lauksaimniecības universitātes doktorants Mārtiņš Andžs. Iesāktie pētījumi tika turpināti 2014.–2017.g., kad LVKĶI tika īstenots Valsts pētījumu programmas (VPP) "Meža un zemes dzīļu resursu izpēte, ilgtspējīga izmantošana - jauni produkti un tehnoloģijas (ResProd)" projekts **"Biomateriāli un bioprodukti no meža resursiem ar daudzpusīgu pielietojumu"**, (līguma Nr. 2014.10-4/VPP-6/6). Projekta ietvaros tika veikti pētījumi par tvaika sprādziena tehnoloģijas izmantošanu, iegūstot šķiedrainus materiālus no baltalkšņa šķeldām un bērza lēveriem, un to pielietošanas iespējām kā beramo siltumizolāciju. Projekta kopējās izmaksas, ko veidoja valsts finansējums, bija 840 199 EUR. Projekta ietvaros minētā pētījuma īstenošanai darbojās zinātniskā grupa vadošā pētnieka Dr.habil.chem. Jāņa Grāvīša vadībā: pētnieks Dr.sc.ing. Ramūnas Tupčiauskas (pētījuma metodikas izstrāde, datu apkopošana un analīze), pētnieks Mg.sc. Mārtiņš Andžs (siltumizolācijas materiālu parametru noteikšana), zinātniskais asistents Mg.chem. Andris Vēveris (siltumizolācijas materiālu ieguves eksperimenti). Veikto pētījumu rezultāti tika izmantoti Latvijas patenta LV 15328 (20.07.2019.) **"Lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls un tā iegūšanas paņēmiens"**, (autori Mārtiņš Andžs, Jānis Grāvītis, Ramūnas Tupčiauskas, Andris Vēveris) sagatavošanai un iegūšanai. Šobrīd patents ir spēkā un tiek uzturēts. Skat. patentu Pielikumā nr. 1.

LVKĶI kā vienīgajai institūcijai ir tiesības pētījumu pamatā esošo intelektuālo īpašumu izmantot tālāku pētījumu veikšanai un komercializācijai.

Komercializācijas projekta 2.posmā ir plānots uzrakstīt un iesniegt arī Eiropas patenta pieteikumu, izmantojot PCT procedūru, un patentēt tehnoloģiju Eiropas līmenī.

PIELIKUMS

4. Sadarbība ar citām zinātniskajām institūcijām un komersantiem

Sadarbība izejmateriālu iegādes jomā

LVKĶI projekta ietvaros plāno sadarboties ar virkni uzņēmumu izejmateriālu iegādes jomā:

Kaņepju spaļi. Kaņepju spaļus plānots iegādāties no SIA NDRA, kas šobrīd piedāvā zemāko cenu kaņepju spaļiem Latvijā – no 100 līdz 300 EUR tonnā, atkarībā no kaņepju spaļu kvalitātes. Kā tika noskaidrots intervijā ar SIA NDRA vadītāju Ingu Niedru, zemākās kvalitātes spaļi ar cenu 100-150 EUR/t satur daudz piemaisījumu un ir piemēroti dzīvnieku pakaišu ražošanai. Taču viens no komercializācijas projekta 2.posma mērķiem ir samazināt produkta pašizmaksu, veicot eksperimentu ar zemākas kvalitātes izejmateriāliem. Šobrīd LVKĶI ir noslēdzis nodomu protokolu ar SIA NDRA par kaņepju spaļu piegādi projekta vajadzībām.

Ķimikālijas. Ugunsizturībai nepieciešamos tetraborātu un borskābi LVKĶI plāno iegādāties no SIA Latvijas Ķīmija. Komercializācijas projekta 1.posmā tika noskaidrotas, ka zemāko cenu piedāvā SIA Latvijas Ķīmija, kur tetraborāts maksā 890,00 EUR/t, bet borskābe – 920 EUR/t. Viens no komercializācijas projekta 2.posma mērķiem ir samazināt produkta pašizmaksu, mēģinot aizstāt šīs ķimikālijas ar lētākām alternatīvām, piemēram, citām skābēm un antiseptiķiem. Šim nolūkam var tikt iegādātas arī citas ķimikālijas.

Baltalkšņa šķeldas. Baltalkšņa šķeldas plānots iegādāties no kokmateriālu piegādātājiem, veicot cenu aptauju vai iepirkuma procedūru. Šobrīd ir identificēti tādi potenciālie piegādātāji kā SIA Gaujas Koks, SIA Dižozols, SIA Baltic Forest, SIA Kurekss, SIA Stora Enso Latvia, utt. Gadījumā, ja kokmateriālu piegādātāji nespēs nodrošināt baltalkšņa šķeldošanas pakalpojumus, tie tiks iegādāti ārpakalpojumu veidā, piemēram, no SIA Ekomežs, vai arī tiks iznomāts mobilais koksnes šķeldotājs.

Informācija par piegādātājiem ir indikatīva. LVKĶI veiks iepirkumu procedūras normatīvajos aktos noteiktajā kārtībā ar mērķi izvēlēties saimnieciski izdevīgāko piedāvājumu.

Sadarbība tehnoloģijas mērogošanas jomā

TS tehnoloģijas mērogošana. LVKĶI rīcībā šobrīd ir 0,5l TS iekārta, ar kuru iespējams iegūt nelielus siltumizolācijas materiālu daudzumus – dažus kilogramus materiāla dienā. LVKĶI projekta ietvaros plāno iegūt lielākus siltumizolācijas materiālu apjomus, iegādājoties to kā pētniecības ārpakalpojumu no Itālijas pētniecības centra ENEA, kura rīcībā šobrīd ir 50l TS iekārta. Šobrīd LVKĶI zinātnieki ir sazinājušies ar ENEA un noskaidrojuši aptuvenās šāda pakalpojuma izmaksas (iekļautas projekta 2.posma budžetā), kā arī saņēmuši apstiprinājumu šādu pakalpojumu sniegšanai no ENEA puses.

Siltumizolācijas materiāla ieklāšanas tehnoloģijas mērogošana. Šobrīd LVKĶI ir uzsācis pārrunas ar Lietuvas uzņēmumu UAB Eko Namai par iespējamu siltumizolācijas materiāla izmēģināšanu reālās koka karkasa dzīvojamās mājās ar mērķi izpētīt lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ieklāšanas tehnoloģijas, ar ieklāšanas tehnoloģiju saistītos riskus un iespējamās problēmas, tādējādi pilnveidojot tehnoloģiju vismaz līdz TRL6 līmenim. Tādējādi, komercializējot tehnoloģiju, LVKĶI spēs potenciālajiem klientiem sniegt skaidras instrukcijas ne tikai par lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražošanas tehnoloģiju un īpašībām, bet arī ieklāšanas tehnoloģiju un ekspluatācijas īpašībām, kas ir būtiski gan produkta pārdevējam, gan gala lietotājam. Plānots, ka testus pie UAB Eko Namai LVKĶI veiks komercializācijas projekta 2.posma budžeta ietvaros.

LVKĶI rīcībā šobrīd ir visi pārējie projekta īstenošanai nepieciešamie resursi: aprīkotas laboratorijas telpas ar iekārtām, 0,5l TS iekārta nelielu eksperimentu veikšanai, visas projekta īstenošanai nepieciešamās papildiekārtas, kā arī atjaunota ventilācijas sistēma. LVKĶI ir pieredzējusi zinātnieku komanda komercializācijas projekta 2.posma aktivitāšu īstenošanai.

PROJEKTS

5. Ekonomiskais pamatojums

5.1. Produkta attīstībai nepieciešamie resursi un izmaksas

Komercializācijas projekta 2.posma ietvaros plānots veikt produkta attīstību no esošā TRL4 līdz TRL6 līmenim. Detalizēts komercializācijas pasākumu plāns ir sniegts Komercializācijas stratēģijā. Produkta un tehnoloģijas attīstībai līdz TRL6 līmenim nepieciešamie finanšu resursi ir norādīti Tabulā 6 zemāk.

Tabula 6. Produkta un tehnoloģijas komercializācijai nepieciešamais finansējums komercializācijas projekta 2.posmam

	Izmaksas, EUR ar PVN
Darba algas	171 244,20
Netiešās izmaksas	25 128,23
Komercializācijas piedāvājums (mājaslapa)	12 100,00
Pētniecības un testēšanas ārpakalpojumi	29 040,00
Materiālu un ķimikāliju iegādes izmaksas	23 958,00
Pamatlīdzekļu nomas izmaksas	3 630,00
Patenta pieteikuma sagatavošanas un iesniegšanas izmaksas	12 100,00
Komandējumu izdevumi	15 000,00
Citi ārpakalpojumi (tulkošanas, konsultāciju pakalpojumi, u.c.)	13 310,00
KOPĀ	**305 510,43**
ERAF	**274 959,38**
LVKĶI pašu finansējums	30 551,04

Visas aktivitātes plānots veikt no 01.01.2021. līdz 30.06.2022. jeb 18 mēnešu laikā. Komercializācijas projekta 2.posma naudas plūsmas pārskats pa ceturkšņiem sniegts pielikumā nr. 3.

5.2. Finanšu un ekonomiskie pieņēmumi

Veicot lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla pašizmaksas aprēķinu un projekta izmaksu – ieguvumu analīzi, tika veikti šādi ekonomiskie pieņēmumi:

Tabula 7. Projektā izmantotie ekonomiskie pieņēmumi par materiālu cenām un apjomiem

Nr.p.k.	**Materiāli un ķimikālijas**	**Nepieciešamais apjoms gadā**	**Cena**	**Cenas avots**	**Piezīmes**
1)	Kaņepju spaļi	2 700 tonnas	200,00 EUR/t	SIA NDRA	Vidējas kvalitātes.
2)	Baltalkšņa papīrmalka	6 003 m^3	32,00 EUR/m^3	SIA DRV Impex	1t šķeldu = 6,67 beramie m^3 šķeldu. 18 009m3 šķeldu = 2 700 t šķeldu. No 1m^3 malkas iespējams iegūt 3m^3 šķeldu.
3)	Ūdens	3 510 m^3	0,02 EUR/m^3	Likums "Par dabas resursu nodokli"	Ūdens daudzums aprēķināts ar koeficientu 1,3 no izejmateriāla daudzuma (LVKĶI izstrādātā tehnoloģija). Ūdens atgūšana nav paredzēta.
4)	Elektroenerģija	1 103 130 kWh	0,13 EUR/kWh	AS Latvenergo	Saskaņā ar iekārtu jaudu un darbības

PROJEKTS

					režīma aprēķinu (skat. Tabulu 8).
5)	Borskābe	135 t	920,00 EUR/t	SIA Latvijas Ķīmija	
6)	Tetraborāts	270 t	890,00 EUR/t	SIA Latvijas Ķīmija	
7)	Tara	43 200 gab.	0,05 EUR par 1 gab. (1m^3)	SIA PakMarkas	Polietilēna plēve

Tika izdarīts pieņēmums, ka gada laikā tiks saražotas 2 592 tonnas siltumizolācijas materiāla, kas līdzvērtīgs 43 200 m^3 siltumizolācijas materiāla, pārstrādājot 2 700 tonnas kaņepju spaļu vai 2 700 tonnas baltalkšņa šķeldu.

Visas cenas ir norādītas bez PVN. Kaņepju spaļu cena norādīta par vidējas kvalitātes izejmateriāliem, taču projekta 2.posmā tiks veikti testi ar zemākas kvalitātes spaļiem, kā arī tiks veikts pētījums par borskābes un tetraborāta aizstāšanu ar lētākām ķimikālijām.

Tabulā 8 zemāk sniegti izmantotie ekonomiskie pieņēmumi attiecībā uz iekārtu cenām, nolietojumu, kā arī mašīnstundām. Šie dati izmantoti gan iekārtu nolietojuma, gan elektroenerģijas patēriņa aprēķinos.

Tabula 8. Projektā izmantotie ekonomiskie pieņēmumi par iekārtām

Nr.p.k.	Iekārta	Cena, EUR	Nolietojuma gada likme	Nolietojums gadā, euro	Mašīnstundas gadā	Jauda
1)	Reaktors, 50l	250 000	10%	25 000	7920 h	20 kW
2)	Tvaika ģenerators, 300l	80 000	10%	8 000	7920 h	60 kW
3)	Uztvērējs	50 000	10%	5 000	7920 h	-
4)	Ventilācijas sistēma	15 000	5%	750	7920 h	14 kW
5)	Žāvētājs	35 000	10%	3 500	7920 h	20 kW
6)	Rafinieris	80 000	10%	8 000	3645 h	30 kW
7)	Palīgiekārtas	50 000	10%	5 000	7920 h	10 kW
8)	Šķeldotājs	23 200	10%	2 320	50 h	45 kW
	Kopā:	**583 200**		**57 570**		

Visas Tabulā 8 norādītās iekārtas nodrošina nepārtrauktu un efektīvu ražošanas procesu, izvēloties iekārtas ar atbilstošu jaudu 2 700 t izejmateriāla pārstrādei gadā. Iekārtu iegādi ir iespējams aizstāt arī ar iekārtu nomu, finanšu modelī izdarīts pieņēmums, ka jaunu iekārtu nolietojuma un lietotu iekārtu nomas izmaksas būtu līdzīgas. Izdarīts pieņēmums, ka ražošana notiks 3 maiņās 24h diennaktī 330 dienas gadā, bet 35 dienas gadā ir svētku dienas un iekārtu apkopes. Rafinieris tiks izmantots pusi laika, bet šķeldotājs – 50h gadā (iespējams izmantot kā ārpakalpojumu).

Tabulā 9 zemāk sniegta informācija par citām izmaksām.

Tabula 9. Projektā izmantotie ekonomiskie pieņēmumi par citām izmaksām

Nr.p.k.	Izmaksu veids	Izmaksas, EUR gadā	Pamatojums
1)	Darba algas, bruto	28 800	3 ražošanā nodarbinātie, 12 mēneši, 800 EUR bruto mēnesī.
2)	VSAOI	6 938	24,09% no bruto darba algas
3)	Ražošanas telpu noma	24 000	500m^2 telpas, 4 EUR/m^3. Balstoties uz ss.com un citos sludinājumu portālos atrasto informāciju par attiecīgās platības ražošanas telpu nomas maksu Rīgā un Pierīgā 2020. gada augustā.
4)	Transporta izmaksas	57 471	Izejmateriālu un gatavās produkcijas transportēšana. 10,86 EUR par 1 tonnu Baltijas valstu robežās (vidēji 300km ap Rīgu). Pārvadā 5292 tonnas gadā.

PIELIKUMS

5)	Citas netiešās izmaksas	12 000	Administrācijas, pārdošanas un reklāmas izmaksas, t.sk., piemēram, grāmatvedības ārpaklpojumi, administrācijas transporta izmaksas, mājaslapas uzturēšanas izmaksas, utml. izmaksas. 1000 EUR gadā.
6)	Licences maksa par tehnoloģijas izmantošanu	50 000	Licences maksa būs atkarīga no noslēgtā līgums nosacījumiem starp LVKĶI un licenciātu. Minimālā lincences gada maksa ir projekta kopējās izmaksas 333 000/ 10 gadi = 33 000 EUR.

LVKĶI ir ņēmis vērā visas izmaksas, kuras var rasties ražošanas procesa laikā: gan tiešās, gan netiešās izmaksas, kā arī administrācijas un pārdošanas izmaksas.

5.3. Produkta pašizmaksas aprēķins

Tabulās 10 un 11 sniegts lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla pašizmaksas aprēķins.

Tabula 10. Siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem pašizmaksas aprēķins

Izmaksu veids	**Izmaksas, EUR**
Kaņepju spaļi	540 000
Ūdens	70
Elektroenerģija	143 114
Borskābe (boric acid)	124 200
Tetraborāts (borax)	240 300
Tara	2 160
Iekārtu nolietojums	55 250
Darba algas, bruto	28 800
VSAOI	6 938
Ražošanas telpu noma	24 000
Transporta izmaksas	57 471
Citas netiešās izmaksas	12 000
Licences maksa par tehnoloģijas izmantošanu	50 000
Kopā, izmaksas gadā	**1 284 304**
Iegūtā siltumizolācijas materiāla apjoms, t	2 592,00
Pašizmaksa, EUR/t	**495,49**
Pašizmaksa, EUR/kg	**0,50**
Pašizmaksa, EUR/m^3	**29,72**

Pieņemot, ka kaņepju spaļu izmaksas ir 200 EUR/t, un gadā tiek saražotas 2592 tonnas siltumizolācijas materiāla, produkta pašizmaksa ir 495,49 EUR/t, jeb 0,50 EUR/kg, jeb 29,72 EUR/m^3, pieņemot, ka siltumizolācijas materiāla beramblīvums ir 16,67 m^3/t (saskaņā ar LVKĶI aprēķiniem).

Tabula 11. Siltumizolācijas materiāla no baltalkšņa šķeldām pašizmaksas aprēķins

Izmaksu veids	**Izmaksas, EUR**
Baltalkšņa malka, m^3	192 096
Ūdens	70
Elektroenerģija	143 407
Borskābe (boric acid)	124 200
Tetraborāts (borax)	240 300
Tara	2 160
Iekārtu nolietojums	57 570
Darba algas, bruto	28 800

PILNĪGS

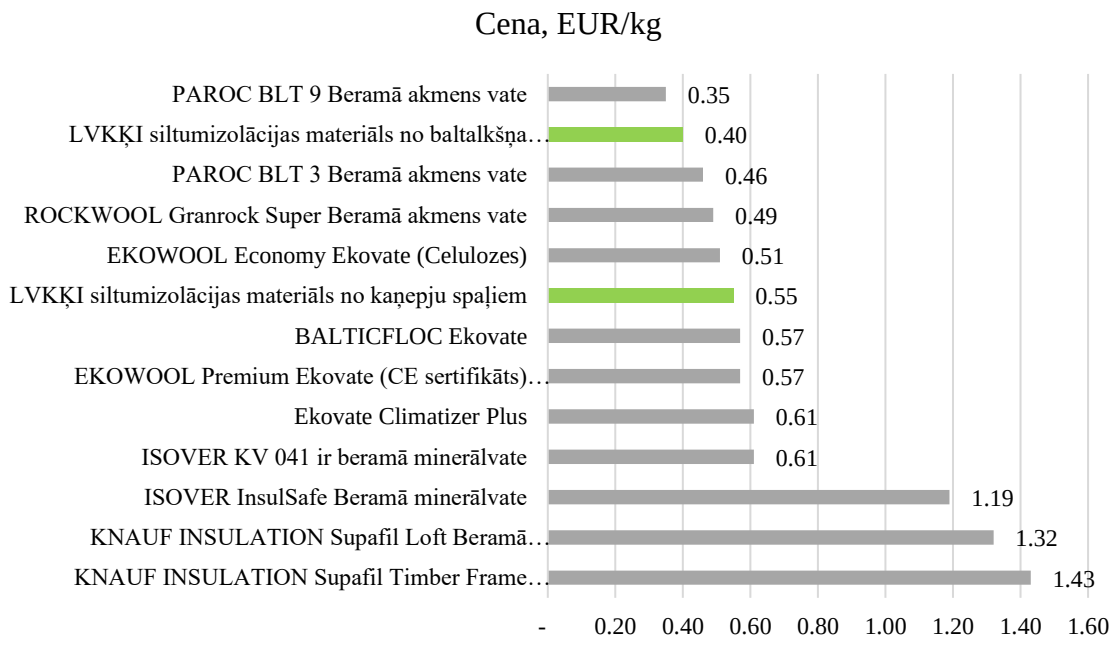
VSAOI	6 938
Ražošanas telpu noma	24 000
Transporta izmaksas	57 471
Citas netiešās izmaksas	12 000
Licences maksa par tehnoloģijas izmantošanu	50 000
Kopā, izmaksas gadā	**939 012**
Iegūtā siltumizolācijas materiāla apjoms, t	2 592,00
Pašizmaksa, EUR/t	**362,27**
Pašizmaksa, EUR/kg	**0,36**
Pašizmaksa, EUR/m^3	**21,73**

Pieņemot, ka gadā tiek saražotas 2592 tonnas siltumizolācijas materiāla no baltalkšņa šķeldām, produkta pašizmaksa ir 362,27 EUR/t, jeb 0,36 EUR/kg, jeb 21,73 EUR/m^3, pieņemot, ka siltumizolācijas materiāla beramblīvums ir 16,67 m^3/t (saskaņā ar LVKĶI aprēķiniem).

5.4. Produkta cena

Produkta cenu ietekmē trīs faktori: produkta pašizmaksa, uzcenojums un konkurentu jeb analogu materiālu cenas. Tika izdarīts pieņēmums, ka beramā siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem cena būs 0,55 EUR/kg jeb 33,00 EUR/m^3 (tādējādi veidojot apmēram 11,00% uzcenojumu jeb peļņu), bet beramā siltumizolācijas materiāla no baltalkšņa šķeldām cena būs 0,40 EUR/kg jeb 24,00 EUR/m^3 (tādējādi veidojot apmēram 40,41% uzcenojumu jeb peļņu). Attēlā 22 ir sniegts cenu salīdzinājums ar citiem tirgū pieejamiem beramajiem siltumizolācijas materiāliem. Cenu avots – Tabula 4.

Attēls 22. LVKĶI lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla cenu salīdzinājums ar tirgū pieejamo produktu cenām



Attēlā 22 redzams, ka, saskaņā ar pašreizējiem aprēķiniem, LVKĶI izstrādātie siltumizolācijas materiāli ir cenas ziņā konkurētspējīgi ar citiem tirgū esošajiem produktiem, tostarp gan minerālvati, gan ekovati. No baltalkšņa šķeldām iegūtais siltumizolācijas materiāls cenas ziņā šobrīd ir lētāks pat par tirgū pieejamo minerālvati. Lētāka ir tikai PAROC BLT 9 Beramā akmens vate, kuras indikatīvā ražotāja cena ir 0,35 EUR/kg. Savukārt no kaņepju spaļiem iegūtais siltumizolācijas materiāls ir 6.lētākais materiāls 13 materiālu izlasē, ieskaitot siltumizolācijas materiālu no baltalkšņa. Turklāt LVKĶI izstrādātie siltumizolācijas materiāli ir lētākie ekovates segmentā. No kaņepju spaļiem iegūtā siltumizolācijas materiāla cena ir zemāka nekā BALTICFLOC celulozes ekovatei – 0,55 EUR/kg.

5.5. Izmaksu – ieguvumu analīze

Tabulās 12 un 13 zemāk sniegts lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražošanas izmaksu – ieguvumu aprēķins. Par 0.gadu uzskatāms 2021. gads, kad tiks īstenots komercializācijas projekta 2.posms. Par veiktajiem ieguldījumiem uzskatāmi komercializācijas projekta 1.un 2.posmā veiktie ieguldījumi. Izmaksu – ieguvumu analīze ir vienlīdz saistoša jebkurai no izvēlētajām komercializācijas stratēģijām, gan LVKĶI *spin-off* uzņēmuma dibināšanai, gan licences pārdošanai. Projekta dzīves cikls – 10 gadi.

Ir izdarīts pieņēmums par to, ka gadā tiks saražoti un pārdoti 43 200 m^3 gatavā siltumizolācijas materiāla, kura vairumtirdzniecības cena būs attiecīgi 33,00 EUR/m^3 siltumizolācijas materiālam no kaņepju spaļiem un 24,00 EUR/m^3 siltumizolācijas materiālam no baltalkšņa šķeldām. Tāpat ir izdarīts pieņēmums par diskonta likmi 8,00% apmērā. Saskaņā ar LR Finanšu ministrijas veiktajām makroekonomisko rādītāju prognozēm, ES struktūrfondu līdzfinansēto projektu ieteicamā reālā finansiālā diskonta likme ir 4,00%[44]. Veikts konservatīvs pieņēmums par 8,00% likmi sakarā ar to, ka šis ir inovāciju projekts, kas saistīts ar jaunas tehnoloģijas un jauna produkta ieviešanu ražošanā, līdz ar to – papildus riskiem.

Tabula 12. LVKĶI lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem izmaksu – ieguvumu aprēķins

Izmaksu-ieguvumu analīze	0.gads	1.gads	2.gads	3.gads	4.gads	5.gads	6.gads	7.gads	8.gads	9.gads	10.gads
Ieņēmumi		1425600	1425600	1425600	1425600	1425600	1425600	1425600	1425600	1425600	1425600
Izmaksas		-1229054	-1229054	-1229054	-1229054	-1229054	-1229054	-1229054	-1229054	-1229054	-1229054
Veiktie ieguldījumi	-560000										
Neto naudas plūsma	-560000	196546	196546	196546	196546	196546	196546	196546	196546	196546	196546
Diskonta likme	8,00%										
NPV	702 632										
IRR	33,08%										

Veikta izmaksu – ieguvumu analīze lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem ražošanai parāda, ka pie diskonta likmes 8,00% un cenas 33,00 EUR/m^3, projekta tagadnes neto vērtība jeb NPV ir pozitīva – 702 635 EUR, bet iekšējā ienesīguma likme IRR – 33,08%, jeb lielāka par diskonta likmi 8,00%. Tādējādi secināms, ka šāda produkta un tehnoloģijas ieviešana ražošanā ir ekonomiski pamatota.

Tabula 13. LVKĶI lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla no baltalkšņa šķeldām izmaksu – ieguvumu aprēķins

Izmaksu-ieguvumu analīze	0.gads	1.gads	2.gads	3.gads	4.gads	5.gads	6.gads	7.gads	8.gads	9.gads	10.gads
Ieņēmumi	0	1036800	1036800	1036800	1036800	1036800	1036800	1036800	1036800	1036800	1036800
Izmaksas	0	-881442	-881442	-881442	-881442	-881442	-881442	-881442	-881442	-881442	-881442
Veiktie ieguldījumi	-583200										

[44] LR Finanšu ministrija, Makroekonomisko pieņēmumu un prognožu skaitliskās vērtības, publicēts 14.07.2020.

PIELIKUMS

Neto naudas plūsma	-583200	155358	155358	155358	155358	155358	155358	155358	155358	155358	155358
Diskonta likme	8%										
NPV	425 244										
IRR	23,38%										

Veikta izmaksu – ieguvumu analīze lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla no baltalkšņa šķeldām ražošanai parāda, ka pie diskonta likmes 8,00% un cenas 24,00 EUR/m^3, projekta tagadnes neto vērtība jeb NPV ir pozitīva – 425 244 EUR, bet iekšējā ienesīguma likme IRR – 23,38%, jeb lielāka par diskonta likmi 8,00%. Tādējādi secināms, ka šāda produkta un tehnoloģijas ieviešana ražošanā ir ekonomiski pamatota.

Izmaksu – ieguvumu analīze lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanai no kaņepju spaļiem un no baltalkšņa šķeldas ir atšķirīgas – materiāls no kaņepju spaļiem ir dārgāks, taču arī ienesīgāks. Var tikt pārdots kā nišas produkts eko māju, pasīvo māju un ekskluzīvo māju būvniecībā. Viens no riskiem siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem ražošanā ir izejmateriālu pieejamība, cenu svārstība, pieejamības sezonalitāte un attālums līdz ražotnei, kas var būtiski ietekmēt transporta izmaksas. Savukārt siltumizolācijas materiāls no baltalkšņa šķeldām ir lētāks, taču arī mazāk ienesīgs. Savukārt uz to neattiecas izejmateriālu nepieejamības vai cenu svārstību riski: baltalksnis ir plaši pieejams kokmateriāls visos Latvijas reģionos.

PIELIKUMS

5.6. Jūtīguma analīze

Tabulās 14 un 15 zemāk sniegta lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ražošanas jūtīguma analīze atkarībā no produkta cenas un izejmateriālu cenu izmaiņām.

Tabula 14. LVKĶI lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem jūtīguma analīze

Ieņēmumu izmaiņas	**NPV, EUR**
+5%	1 145 497
+4%	1 056 924
+3%	968 351
+2%	879 778
+1%	791 205
0	**702 632**
-1%	614 058
-2%	525 485
-3%	436 912
-4%	348 339
-5%	259 766
Izmaksu izmaiņas	**NPV, EUR**
+5%	320 824
+4%	397 185
+3%	473 547
+2%	549 908
+1%	626 270
0	**702 632**
-1%	778 993
-2%	855 355
-3%	931 716
-4%	1 008 078
-5%	1 084 439

Tabula 15. LVKĶI lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla no baltalkšņa šķeldām jūtīguma analīze

Ieņēmumu izmaiņas	NPV, EUR
+5%	747 328
+4%	682 911
+3%	618 495
+2%	554 078
+1%	489 661
0	**425 244**
-1%	360 828
-2%	296 411
-3%	231 994
-4%	167 577
-5%	103 160
Izmaksu izmaiņas	NPV, EUR
+5%	151 423
+4%	206 187
+3%	260 951
+2%	315 716

PIELIKUMS

Ieņēmumu izmaiņas	NPV, EUR
+1%	370 480
0	**425 244**
-1%	480 009
-2%	534 773
-3%	589 537
-4%	644 302
-5%	699 066

Tabulās 14 un 15 redzams, ka lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla no kaņepju spaļiem un no baltalkšņa šķeldām ražošanai ir zemi jūtīguma rādītāji. Izmaksām pieaugot par 5%, bet ieņēmumiem samazinoties par 5%, abu produktu ražošanas gadījumā investīciju projekta NPV būs pozitīvs. Turklāt izmaksu izmaiņu jūtīgums ir zemāks nekā ieņēmumu jūtīgums, proti, NPV mazāk reaģē uz izmaksu izmaiņām nekā uz ieņēmumu izmaiņām. Ja tehnoloģijas pārņēmējs vēlēsies optimizēt peļņu, efektīvākais scenārijs ir izmaksu samazināšana. Līdz ar to secināms, ka šāds investīciju projekts ir saistīts ar zemiem finanšu riskiem.

PIELIKUMS

Secinājumi

1. Tehniski ekonomiskās priekšizpētes rezultātā tika secināts, ka lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls ir produkts ar augstu komercializācijas potenciālu. Materiāls ir dabisks, energoefektīvs un nekaitīgs cilvēka veselībai, jo ir izgatavots no atjaunojamiem dabas resursiem un ražošanas blakusproduktiem. Produkta komercializācijai vērā ņemami šķēršļi nepastāv. Komercializējamajam produktam (lignocelulozes beramajam siltumizolācijas materiālam) var būt būtiska nozīme strauji augošu tirgu paplašināšanā, kā dēļ tam ir īpaši augsts investīciju piesaistes potenciāls.

2. Būtiska priekšrocība lignocelulozes beramo siltumizolācijas materiālu no kaņepju spaļiem un no baltalkšņa šķeldām komercializācijai Eiropā ir plaša izejmateriālu pieejamība: Eiropā un arī Latvijā ir liela baltalkšņa krāja un cirtes, bet industriālās kaņepes sējumi Eiropā pēdējo 5 gadu laikā ir trīskāršojušies. Šobrīd lielākā problēma ir ražošanas blakusproduktu ekonomiski pamatota izmantošana, nevis izejmateriālu ieguve.

3. Veiktā izmaksu – ieguvumu analīze parādīja, ka lignocelulozes beramie siltumizolācijas materiāli no kaņepju spaļiem un no baltalkšņa šķeldām ir konkurētspējīgi ne tikai nišas būvmateriālu tirgū, bet arī plaša patēriņa tirgū, ņemot vērā zemas ražošanas pašizmaksas un labu siltumvadītspēju. Cenas un kvalitātes ziņā lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls konkurē pat ar minerālvati, taču, atšķirībā no minerālvates, tas ir dabisks produkts.

4. Būtiska tehnoloģijas priekšrocība ir vienkāršība un nepieciešamība pēc salīdzinoši zemām investīcijām ražošanas infrastruktūrā: tehnoloģijas ieviešanai, nepieciešamas tirgū jau esošas standarta iekārtas. Nav nepieciešamas specifiskas ražošanas telpas. Darbam ar iekārtām nav nepieciešami augsti kvalificēti darbinieki vai liels darbinieku skaits – darbiniekus iespējams apmācīt ražotnē uz vietas, uzsākot darba attiecības. Līdz ar to tehnoloģijai ir salīdzinoši zemas ieviešanas izmaksas.

5. Šobrīd par visperspektīvāko tirgu lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla ieviešanai ražošanā ir Eiropa, plaši pieejamo izejvielu – kaņepju spaļu un baltalkšņa papīrmalkas dēļ. Perspektīvs tirgus tehnoloģijas ieviešanai ir Baltijas valstis - būvmateriālu ražošanas tradīciju dēļ, kā arī Skandināvijas valstis - attīstītā ekomāju un ekobūvmateriālu tirgus dēļ.

6. Veiktā nozares izpēte parādīja to, ka šobrīd neviens cits uzņēmums vai zinātniskā institūcija pētījumus par lignocelulozes apstrādi ar tvaika sprādziena tehnoloģiju būvmateriālu ražošanai neveic. Tas nozīmē, ka ir salīdzinoši maza varbūtība, ka kāds cits izstrādās un komercializēs lignocelulozes beramo siltumizolācijas materiālu pirms LVKĶI. LVKĶI ir ļoti augstas izredzes komercializēt produktu pirmajam.

7. Lignocelulozes beramajam siltumizolācijas materiālam, atšķirībā no analogiem (minerālvates, celulozes ekovates) piemīt virkne objektīvu priekšrocību: siltumizolācijas materiāls ir dabisks, drošs un nekaitīgs cilvēka veselībai, produkta ražošanas process ir videi nekaitīgs, un produktam ir ļoti labi siltumvadītspējas rādītāji. Turklāt produktu ir iespējams piedāvāt par cenu, kas ir zemāka par citu ekoloģisko un dabisko siltumizolācijas materiālu cenu un pat atsevišķu minerālvašu cenu.

8. Komercializējamā produkta – lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla – novešanai līdz komercializējamam TRL6 līmenim ir nepieciešami 305 510,43 eiro, kurus plānots ieguldīt 1,5 gada laikā, projekta komandā sadarbojoties pieciem kompetentiem speciālistiem ar atbilstošu izglītību un pieredzi, kuri šobrīd jau ir LVKĶI darbinieki.

PIELIKUMS

Pielikumi

Pielikums nr. 1

Patents Nr. 15328

LATVIJAS REPUBLIKA

PATENTS

Latvijas Republikas Patentu valde apliecina, ka šajā patentā ietvertais izgudrojums ir iekļauts patentu reģistrā ar

Nr. 15328

Patents ir spēkā Latvijas Republikā 20 gadu no 21.10.2016., *ja šis termiņš Patentu likumā paredzētajā gadījumā nebeidzas agrāk*

LATVIJAS REPUBLIKA PATENTU VALDE

Patents piešķirts
20.07.2019.
Rīga

Patentu valdes direktors
S. Laganovskis

(19) **LATVIJAS REPUBLIKAS**
PATENTU VALDE

(11) **LV 15328**

(51) **Starpt. pat. kl.**
C08H8/00
B27L11/08
E04B1/76

Latvijas patents uz izgudrojumu
2007.g. 15.februāra Latvijas Republikas likums

(12) Īsziņas

(21) **Pieteikuma numurs:** P-16-73

(22) **Pieteikuma datums:** 21.10.2016

Pieteikuma publikācijas datums: 20.05.2018

(45) **Patenta publikācijas datums:** 20.07.2019

(73) **Īpašnieks(i):**

LATVIJAS VALSTS KOKSNES ĶĪMIJAS INSTITŪTS,
Dzērbenes iela 27, Rīga LV-1006, LV

(72) **Izgudrotājs(i):**

Mārtiņš ANDŽS (LV),
Jānis GRĀVĪTIS (LV),
Ramūnas TUPČIAUSKAS (LV),
Andris VĒVERIS (LV)

(54) **Virsraksts:** **LIGNOCELULOZES BERAMAIS SILTUMIZOLĀCIJAS MATERIĀLS UN TĀ IEGŪŠANAS PAŅĒMIENS**

(57) **Kopsavilkums:**

Izgudrojums attiecas uz būvniecības nozari, konkrēti, uz beramajiem siltumizolācijas materiāliem, kas iegūti, pārstrādājot biomasu, tajā skaitā lignocelulozi, un tās atliekas. Tiek piedāvāts siltumizolācijas materiāls, kas iegūts no bērza lēveriem, baltalkšņa šķeldas un kaņepju spaļiem, un tā iegūšanas paņēmiens. Minētais paņēmiens ietver šādus soļus:
1) lignocelulozes materiāla pakļaušanu autohidrolīzei ar piesātinātu tvaiku slēgtā reaktorā pie paaugstināta spiediena un temperatūras;
2) reakcijas pārtraukšanu ar tvaika sprādzienu. Ar minēto paņēmienu tiek iegūts sašķiedrots materiāls ar siltumvadītspējas koeficientu 0,043 W/(m·K). Iegūto materiālu beramā veidā iespējams iestrādāt ēkas konstrukcijās.

Pielikums nr. 2

Projekta iesniedzēja nozīmīgākās zinātniskās publikācijas

1. Brazdausks, P., Rizikovs, J., Puke, M., Tupciauskas, R. **2019** Statistically optimal parameters of aluminium sulphate catalysed hydrolysis for furfural production from birch inner bark in the framework of the biorefinery concept. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*.
2. Puke, M., Brazdausks, P., Rizikovs, J., (...), Andzs, M., Makars, R. **2019** Effect of different aluminum sulfate catalyzed hydrolysis conditions on the content of polysaccharides in the residue after furfural production. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*.
3. Tupciauskas, R., Rizhikovs, J., Grinins, J., Paze, A., Andzs, M,, Brazdausks, P., Puke, M., Plavniece, A. **2019** Investigation of suberinic acids-bonded particleboard. *European Polymer Journal*, 113, 176–182.
4. Andžs, M., Reinerte, S., Tupčiauskas, R., Vēveris, A., Āboliņš, J., & Grāvītis, J. **2018** Use of biorefined wood for obtaining heat insulation and electrospun materials. In B. Andersons et al. (Eds.), *Proceedings* of *National Research Programme "ResProd", 2014-2018,* (132-136). Riga, Latvian State Institute of Wood Chemistry.
5. Rizhikovs, J., Brazdausks, P., Paze, A., Tupciauskas, R., Grinins, J., Puke, M., . . . Makars, R. **2018** Suberinic acids as natural binder in wood bio-based composites. *The BiPoCo 2018, 4th International Conference "Bio-Based Polymers and Composites"*, Balatonfüred, Hungary 02.-06.09.2018, 353-354.
6. Tupčiauskas, R., Rižikovs, J., Grīniņš, J., Pāže, A., Brazdausks, P., Puķe, M., Pļavniece, A. **2018** Processing of lignocellulosic residues from birch plywood manufacture into biocomposites. *Proceedings for posters presentations of 15th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp*, June 26 – 29, Aveiro, Portugal, pp. 283–286.
7. Brazdausks, P., Rižikovs, J., Puķe, M., Tupčiauskas, R., Pāže, A., Grīniņš, J., Pļavniece, A. **2018** Screening of salt catalyzed hydrolysis conditions for further processing opportunities of birch inner bark. *Proceedings for posters presentations of 15th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp*, June 26 – 29, Aveiro, Portugal, pp. 343–346.
8. Paze, A., Rizhikovs, J., Brazdausks, P., Puke, M., Grinins, J., Tupciauskas, R., Plavniece, A. Processing Possibilities of Birch Outer Bark into Green Bio-composites. *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*, Rezekne, Latvija. 2017, III: 249–253.
9. Reinerte, S., Andzs, M., Tupciauskas, R., Veveris, A., Gravitis, J. Steam explosion as a pre-treatment method for bio-refined hybrid aspen lignocellulose. *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*, Rezekne, Latvija. 2017, III: 276–281.
10. Andzs, M., Tupciauskas, R.,Veveris, A., Andze, L., Abolins, J., and Gravitis, J. Biomass conversion into blow-in heat insulation materials by steam explosion. *Holzforschung*, 2017, 71(7-8), 641–644.
11. Tupciauskas, R., Gravitis, J., Abolins, J., Veveris, A., Andzs, M., Liitia, T., Tamminen, T. Utilization of lignin powder for manufacturing self-binding HDF. *Holzforschung*, 2017, 71(7-8), 555–562.
12. Tupciauskas, R., Irbe, I., Janberga, A., Buksans, E. Moisture and decay resistance and reaction to fire properties of self-binding fibreboard made from steam-exploded grey alder wood. *Wood Material Science and Engineering*, 2017, 12 (2), 63–71.
13. Krutov, S. M., Gravitis, J. A., Ipatova, E. V., Akhmadullina, A. R., Andzs, M. M., Tupciauskas, R. R., Pranovich, A. V., Vasiliev, A. V. Экстрактивные вещества технических лигнинов после паро-взрывных обработок [Technical lignins extractive

PIELIKUMS

substances after steam-explosion treatments]. *ВЕСТНИК РФФИ ХИМИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ*, 2016, 1 (89), 20–26.

14. Stapulionienė, R., Tupčiauskas, R., Vaitkus, S., Vėjelis, S. Development and investigation of thermal insulation from hemp-polylactide fibres. *Engineering Structures and Technologies*, 2016, 8 (1), 23–30.

15. Brazdausks P., Paze A., Rizhikovs J., Puke M., Meile K., Vedernikovs N., Tupciauskas R., Andzs M. Effect of aluminium sulphate-catalysed hydrolysis process on furfural yield and cellulose degradation of Cannabis sativa L. Shives. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 89, 98–104.

16. Andzs, M., Tupciauskas, R., Veveris, A., Gravitis, J. Impact of wood fraction, moisture and steam explosion on the development of an innovative insulation material. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Rezekne, Latvija, 2015, I, 11–15.

17. Brazdausks, P., Tupciauskas, R., Andzs, M., Rizhikovs, J, Puke, M., Paze, A., Meile, K., Vedernikovs, N. Preliminary Study of the Biorefinery Concept to Obtain Furfural and Binder-less Panels from Hemp (*Cannabis Sativa* L.) Shives. *Energy Procedia*, 2015, 72, 34–41.

18. Brencis, R., Andzs, M., Tupciauskas, R., Brazdausks, P., Rizhikovs, J., Puke, M., Paze, A., Meile, K., Vedernikovs, N. Acoustic properties of binderless panel made from pretreated hemp (*Cannabis Sativa* L.) shives. Proceedings of the 5th International Scientific Conference *Civil Engineering '15*, Jelgava, Latvia Univesity of Agriculture, 2015, 5, 64–70.

19. Gravitis J., Ozols-Kalnins V., Kokorevics A., Abolins J., Kukle S., Putnina A., Andzs M., Tupciauskas R., Veveris A. Zero Emissions and Bio-refineries for Natural Fibers, Biomaterials and Energy: Genesis of Concepts. Review. In: W.L. Filho, D. Bērziņa, A. Ūbelis (eds.) *Sustainable Development, Knowledge Society and Smart Future Manufacturing Technologies",* World Sustainability Series, Springer International Publishing Switzerland, 2015, 125–147.

20. Tupciauskas R., Gravitis J., Belkova L., Tuherm H. Grey Alder Fibreboard Processed by Modified Steam Explosion Unit. *Proceedings of 16th international conference „Research for rural development"*, 20-22 May, Jelgava, Latvia, 2010, 1, 248–254.

21. *Gravitis J., Abolins J., Tupciauskas R., Veveris A., Alksnis B. Substitution of Phenolic Components by Steam-exploded Lignin in Plywood and Self binding Boards with Account of Energy Necessary for Steam Explosion Treatment.* RTU zinātniskie raksti, Materiālzinātne un lietišķā ķīmija*, RTU, Rīga, 2010, 21, 7–11.*

22. Gravitis J., Abolins J., Tupciauskas R., Veveris A. Lignin from Steam-exploded Wood as Binder in Wood Composites. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Technika, Vilnius, 2010, 18 (2), 75–84.

PIELIKUMS

Pielikums nr. 3

Komercializācijas projekta 2.posma naudas plūsmas pārskats

	I 2021	II 2021	III 2021	IV 2021	I 2022	II 2022	III 2022
Naudas atlikums ceturkšņa sākumā	-	49 018,79	3 622,98	879,17	1 994,97	70 864,04	33 173,09
LVKĶI priekšfinansējums			64 000,00	50 000,00			
LVKĶI līdzfinansējums	3 664,58	5 043,98	7 415,98	5 431,58	4 792,88	4 187,88	
Darba algas	-27 920,25	-27 920,25	-27 920,25	-27 920,25	-29 781,60	-29 781,60	
Netiešās izmaksas	-4 188,04	-4 188,04	-4 188,04	-4 188,04	-4 467,24	-4 467,24	
Komercializācijas piedāvājumu sagatavošana	-3 025,00	-3 025,00	-3 025,00	-3 025,00	-	-	
Pētniecības un testēšanas ārpakalpojumi	-	-	-14 520,00	-14 520,00	-	-	
Materiālu un ķimikāliju iegādes izmaksas	-	-11 979,00	-11 979,00	-	-	-	
Pamatlīdzekļu nomas izmaksas	-	-1 815,00	-1 815,00	-	-	-	
Patenta pieteikuma sagatavošanas un iesniegšanas izmaksas	-	-	-6 050,00	-	-6 050,00	-	
Komandējumu izdevumi	-	-	-3 150,00	-3 150,00	-4 000,00	-4 000,00	
Citi ārpakalpojumi (tulkošanas, konsultāciju pakalpojumi, u.c.)	-1 512,50	-1 512,50	-1 512,50	-1 512,50	-3 630,00	-3 630,00	
No LIAA saņemtais avanss	82 000,00						
No LIAA saņemtais starpposma/ noslēguma maksājums					112 005,04		80 826,91
Naudas atlikums ceturkšņa beigās	49 018,79	3 622,98	879,17	1 994,97	70 864,04	33 173,09	114 000,00
LVKĶI priekšfinansējuma atgriešana							114 000,00

PIELIKUMS