

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte
Meža un vides zinātņu fakultāte

Būvniecības un kokapstrādes institūts



Mg.sc.ing. Mārtiņš Andžs

**TVAIKA SPRĀDZIENĀ NO KAŅEPJU SPAĻIEM IEGŪTI
BERAMIE SILTUMIZOLĀCIJAS MATERIĀLI**

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

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
zinātnes doktora grāda (*Ph.D.*) iegūšanai inženierzinātnēs un
tehnoloģijās

SUMMARY

Of the Doctoral thesis for the Doctoral degree of Science (*PhD*) in
Engineering Science and Technology

JELGAVA 2024

Darba zinātniskie vadītāji/ *Academic supervisors:*
Doc., Dr. sc. ing. **Inesei Fiļipova** LBTU
Dr. habil. chem. **Jānis Grāvītis** LVKĶI/LSIWC

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūta Biorafinēšanas laboratorijā. Pētījumi veikti laika posmā no 2011. līdz 2024. gadam.

The doctoral thesis was developed in the Biorefining Laboratory of the Latvian State Institute of Wood Chemistry. The studies are carried out in the period from 2011 to 2024

Oficiālie recenzenti/ *Official reviewers:*

Asoc.prof., Dr.sc.ing. **Uldis Spulle** LBTU

Asoc.prof., Dr.sc.ing. **Sigītas VĒJELIS** VILNIUS TECH

PhD **Miķelis Kirpluks** LVKĶI

Promocijas darba izstrāde veikta ar ES 7IP Wood Wisdom “ProLignin” (2012-2014), VPP “ResProd” (2014-2017), ERAF 1.2.1.2/16/I/001/ KC-PI-2020/13 “Lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģijas komercializācija” (2020-2022) un FLPP Izp-2021/1-0599 “Ekoloģiski draudzīgu siltumizolācijas materiālu izpēte no ilgtspējīgu atjaunojošos rūpniecisko kultūru atliekām” (2022-2024) atbalstu.

The elaborations of the Doctoral thesis is carried out by support of EU 7FP Wood Wisdom “ProLignin” (2012-2014), NRP “ResProd” (2014-2017), ERDF 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 FARP Izp-2021/1-0599 “Investigation of eco-friendly thermal insulation materials from sustainable and renewable industrial crops residuals” project (2022–2024).

Promocijas darba aizstāvēšana notiks LBTU Materiālzinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē 2024. gada 12. decembrī plkst. 10:00 Meža un vides zinātņu fakultātē, Jelgavā, Dobeles ielā 41, Prof. (Emeritus), Dr.habil.sc.ing. Henn TUHERM auditorijā.

The defending of the Doctoral thesis will take place at the public sitting of the Promotion Council of Material Science on December 12, 2024 at 10:00 am, LBTU in Auditorium of Prof. (Emeritus), Dr.habil.sc.ing. Henn TUHERM, Jelgava, Dobeles street 41.

Atsauksmes sūtīt: Promocijas padomes sekretārei Inesei Rudzātei, LBTU Akadēmijas iela 11, Jelgava LV 3001 vai inese.rudzate@lbtu.lv.

Feedback to be sent to: Secretary of the Promotion Council Inese Rudzate, LBTU, 11 Akadēmijas Street, Jelgava LV 3001 or inese.rudzate@lbtu.lv.

SATURS

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA.....	4
APPROBATION OF THE RESEARCH WORK.....	4
PATEICĪBA	7
GRATITUDE	8
1. ZINĀTNISKĀ DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	9
2. SITUĀCIJAS ANALĪZES KOPSAVILKUMS.....	13
3. MATERIĀLI UN METODES	14
2.1. Pētījuma metodoloģiskais pamats.....	14
2.2 Materiāli un reaģenti.....	15
2.3. Izolācijas materiāla iegūšana ar TS metodi.....	15
3. REZULTĀTI	16
3.1. Materiālu iegūšana ar TS metodi	17
3.2. Kaņepju spaļu kā siltumizolācijas materiāla fizikālo izmaiņu pētījumi pirms un pēc TS.....	18
3.2.1. Masas zudumi.....	18
3.2.2. Beramtilpums un berambļivums	19
3.2.3. SEM	21
3.3. Siltumvadītspēja	23
3.4. Siltuma inerce	25
3.5. Ugunsreakcijas pārbaude ar Koniskā kalorimetra metodi	26
4. EKONOMISKĀ IZVĒRTĒJUMA KOPSAVILKUMS	30
SECINĀJUMI	32
REKOMENDĀCIJAS	33
1. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE SCIENTIFIC WORK	34
2. SUMMARY OF SITUATION ANALYSIS	38
3. MATERIALS AND METHODS	39
2.1. Methodological basis of the study	39
2.2. Materials and reagents	40
2.3. Obtaining insulation material by SE method.....	40
3. RESULTS.....	41
3.1. Obtaining materials by the SE method	42
3.2. Research on the physical changes of hemp shives as a thermal insulation material before and after SE	43
3.2.1. Mass loss	44
3.2.2. Bulk volume and bulk density.....	44
3.2.3. SEM	46
3.3. Thermal conductivity.....	48
3.4. Thermal inertia.....	50
3.5. Fire reaction test using the Cone Calorimeter test	52
4. SUMMARY OF THE ECONOMIC EVALUATION.....	56
CONCLUSIONS	58
RECOMMENDATIONS.....	59

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA

APPROBATION OF THE RESEARCH WORK

Publikācijas par promocijas darba tēmu:

Publications on the topic of the Thesis:

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 conversion 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:

Publications related to the topic of the Thesis:

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. Vol. 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:

Patent certificates:

1. Tupčiauskas, R., Andžs, M., Grāvītis, J., Pavlovičs, G., Bērziņš, A. (iesniegts 21.03.2022). Paņēmiens lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanai. PCT/LV2022/050004
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*

Dalība zinātniskajās konferencēs par promocijas darba tēmu:

Participation in scientific conferences on the subject of the Thesis:

1. **Andžs M.**, Tupčiauskas 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. **Andžs M.** 2017 The influence of Steam Explosion severity factor on 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 NOZĀRES ATTĪSTĪBAI. LLU Meža fakultāte 15.-17. Marts. Jelgava, **Latvija**.
4. **Andžs M.**, Tupčiauskas 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. **Andžs M.** 2015 Frakcijas, mitruma un tvaika sprādziena ietekme uz koksnes sašķīdēšanas. Starptautiskā zinātniski praktiskā konference ZINĀTNE UN PRAKSE NOZĀRES ATTĪSTĪBAI. LLU Meža fakultāte, Kokapstrādes katedra 16.-19. Marts. Jelgava, **Latvija**.
6. **Andžs 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 “Jūrmala 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.

Other activities related to the Doctoral Thesis

1. *Finalist of RTU contest for Masters and Doctoral students “ResearchSlam”, 2013/2014. On the topic “Hemp and steam explosion – for home warmth”.*
2. *Doctoral courses “Wood Chemistry, Biocomposites and Building Materials” (7.5 ECTS), Prof. Dr Roger Rowell, 3–11 April 2012. The KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.*
3. *Doctoral courses: “NOVA”, “Wood structure, properties, biological degradation process and wood impregnation” (3ECTS), 23–28 May 2011.*

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 neaizmirs 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, Zigaretai un Aivaram Viķeļiem, 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!

GRATITUDE

The author of the Thesis expresses special gratitude to the supervisors – LBTU, Doc., Dr. sc. ing. Inese Fiļipova and Dr. habil. chem. Jānis Grāvītis.

Thanks to everyone who remembered to ask me regularly and over the years: “When will it be ready, how are things going, how far is the Thesis progressing?”

Gratitude is expressed to the Latvian State Institute of Wood Chemistry, especially to the colleagues of the Biorefinery Laboratory for the implementation of joint projects, as well as for practical and theoretical support during the creation of my Doctoral Thesis.

Thanks to the colleague Dr. sc. ing. Ramūnas Tupčiauskas for his faith, for heated scientific discussions, and for joint small and large works. To the colleague Dr. sc. ing. Gunārs Pavlovičs and Mg. sc. ing. Andris Bērziņš.

Gratitude is expressed to Prof. José C. del Rfo, Instituto de recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, Spain, for the KMR work.

LSIWC director Mg. oec. Karīna Orlova for the work put into creating economic estimates.

Special thanks to my parents – Sarma Andže and Miervaldis Andžs – for their love, support and faith. To my sister Liene Andže-Jansone and her family for being together in joys and sorrows.

Thanks to my wife’s parents, Zigeta and Aivars Vīķelis, for looking after the children while I was writing my thesis and believing that everything would work out.

To my children – Regnārs and Lība (a team of scientists and archaeologists) for the jokes and the big question: “Dad, have you finished your Thesis yet? Can we finally go on a date?”

Thank you to my wife, Dr. chem. Laura Andže, who, with her persistence and efforts to keep me in the direction of the goal, at least aiming in this direction, allowed me to reach the finish with a smile. You are my support and strength!

1. ZINĀTNISKĀ DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Promocijas darba tēmas izvēles pamatojums un aktualitāte

Eiropas Savienības regulas un globālās labās prakses tendences klimata pārmaiņu ierobežošanai Latvijai ir likušas īstenot darbības siltuma enerģijas racionālai patēriņai 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, 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 (Eiropas Savienība) fondu atbalstu, energo-inefektīvu 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 siltumtehnikajām prasībām. Lai taupītu apkurei nepieciešamo enerģiju un izmaksas un pildītu ES regulu prasības par ēku siltumefektivitāti, ēkas nepieciešams siltināt atbilstīgi valsts minimālajām. Par atbilstošām, šobrīd spēkā esošajām siltumtehnikajām prasībām, var uzskatīt tikai tās ēkas, kas uzbūvētas pēc 2015. gada. Šo iemeslu dēļ šobrīd notiek un arī turpmāk gaidāma intensīva ēku fonda energoefektivitātes uzlabošana, respektīvi – ēku siltināšana.

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 *padarītas stingrākas* un radīts arvien pieaugošs pieprasījums pēc siltumizolācijas materiāliem. Sākotnēji komerciālie siltumizolācijas materiāli ražoti no neilgtspējīgiem sintētiskiem un minerālas izcelsmes materiāliem. Tomēr gan ES regulu, gan sabiedrības uz ilgtspēju un ekoloģiskiem aspektiem orientēto vēlmiņu 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 kokšķiedras, 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. 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 CO₂, kas ir līdzvērtīgi jaunam mežam, taču laika ziņā patērē piecus mēnešus, kas padara kaņepju augu pievilcīgu daudzveidīgai izmantošanai dažādu jaunu produktu radīšanā. Gan Eiropā, gan Latvijā pieaug kaņepju audzēšanas apjomi.

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 institūtā (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 – aizstāvamā 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 Bialobrzieskie (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 sašķīdota, 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 CO₂ 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

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir pakārtots pētījumu uzdevumiem un sastāv no 6 nodaļām:

1. Literatūras apkārte veikta pašreizējās situācijas analīze par regulējumiem un klimata mērķiem energoefektivitātes jautājumos. Apkopota informācija par siltumizolācijas materiāliem, to veidiem un galvenajām īpašībām. Iekļautas aktualitātes par biorafinēšanu un apskatīta TS tehnoloģija. Nodaļā analizēta literatūra par industriālo kaņepju resursiem, audzēšanu, pārstrādi un pielietošanu.
2. Pētījumā izmantoto materiālu un metožu raksturojums.
3. Pētījumu rezultāti un to izvērtējums. Apakšnodaļās izklāstīti rezultāti un to skaidrojums par kaņepju spaļu materiālu ķīmiskajām un fizikālajām īpašībām pirms un pēc TS. Tālākajās apakšnodaļās izvērtēta iegūto paraugu siltumvadītspēja, siltuminerce, ūdens tvaika pārvade, ugunsreakcija un skaņas izolācijas spēja. Iegūtie rezultāti salīdzināti ar tirgū esošiem siltumizolācijas materiālu analogiem, un izskaidroti izmantojot iepriekšējās apakšnodaļās iegūtos ķīmisko un fizikālo īpašību raksturojumus.
4. Ekonomiskā izvērtējuma kopsavilkums.
5. Secinājumi.
6. Rekomendācijas.

Kopumā promocijas darbā ir 111 lpp., tekstā ir iekļautas 10 tabulas, 60 attēli, 21 formulas un 225 norādes uz izmantotajiem literatūras avotiem.

2. SITUĀCIJAS ANALĪZES KOPSAVILKUMS

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 aktivitātēs, 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.

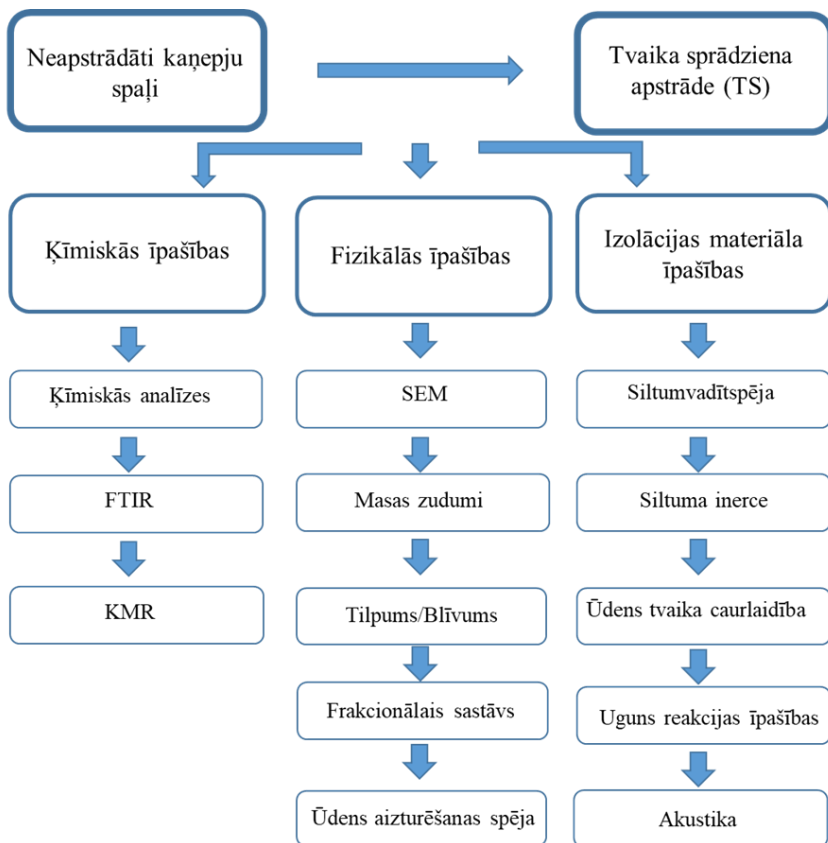
Apvienojot klimata politikas mērķu radīto pieprasījumu pēc ilgtspējīgiem siltumizolācijas materiāliem un aprites ekonomikas nosacījumus izejmateriālam, kā arī zināšanu trūkumu par priekšapstrādātu kaņepju spaļu beramo siltumizolācijas materiālu, ir radīts politisks, zinātniski – teorētisks un praktisks 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.

3. MATERIĀLI UN METODEDES

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.).



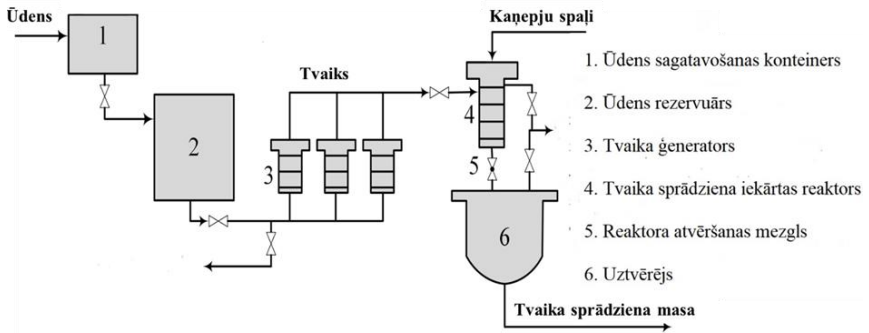
2.1. att. Pētījuma darba uzdevumu shēma

2.2 Materiāli un reaģenti

Darba izstrādāšanai izmantotais izejas materiāls ir kaņepes (*Cannabis sativa* L.), šķirne *Bialobrzieskie* (Polija, kods 893), precīzāk kaņepju 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. *Biolabrzieskie* šķirnes kaņepes ir šķiedru kaņepes, kuru garums var sasniegt 4,5 metrus. Paraugi izgatavoti no “SIA ZALERS” Krāslavas novadā audzētām 2012. un 2018. gadā vāktām ražas kaņepēm.

2.3. Izolācijas materiāla iegūšana ar TS metodi

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



3. REZULTĀTI

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		235	32	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 – kokšķiedra (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

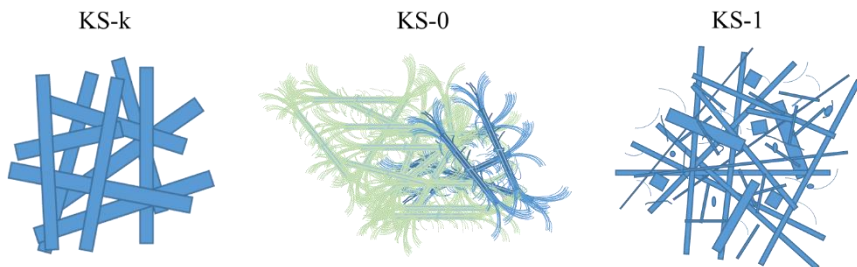
TS izmantots kā kaņepju spaļu apstrādes metode, lai iegūtu sašķiedrotāku materiālu ar lielāku beramtilpumu. TS procesu var iedalīt divās fāzēs. **TS pirmā fāze** ir biomasas apstrāde ar augstas temperatūras tvaiku paaugstinātā spiedienā. Pirmā fāze būtībā darbojas kā termokīmiska reakcija. Termokīmiskajā reakcijā no biomasas hemicelulozēm tiek atdalītas acetilgrupas, un veidojas etišķskābe. No hemicelulozēm nelielā daudzumā veidojas arī uronskābe. Polisaharīdu noārdīšanās procesā veidojas skudrskābe un levulīnskābe. Tālāk, izveidojušos skābju iedarbībā, notiek hemiceluložu hidrolīze. Pie lielāka barguma faktora (augstākas temperatūras un laika) notiek celulozes amorfās daļas hidrolīze, kā arī lignīna saišu, galvenokārt $\beta - O - 4$, destrukcija. **TS otrā fāze** ir adiabatīss process, kura laikā siltumenerģija pārvēršas mehāniskajā enerģijā, kā rezultātā rodas sprādzienvēda spiediena tvaika izlāde. Pirmās fāzes laikā tiek mīkstināts materiāls, bet otrajā fāzē pie izlādes notiek mehāniska sašķiešana. 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 tiek sašķiedroti jeb fibrillēti. Veidojas šķiedru kūļi, kas daļēji tiek 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 sašķiešana – 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 sašķiežas. 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 tiek sarauti

smalkākos fragmentos, un šķiedru mikrofibrillas tiek 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 pielietojanas veids kaņepju spaļu pamatapstrādē.

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

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

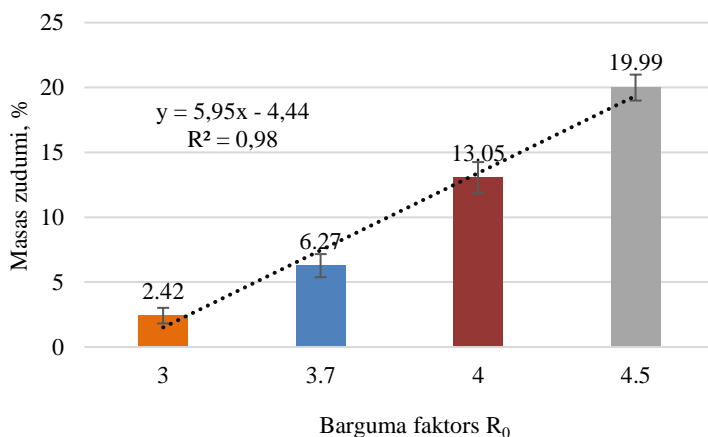
Kaņepju spaļu kā siltumizolācijas materiāla izmaiņas pirms un pēc TS raksturoja, nosakot masas zudumus, frakcionālo sastāvu, beramblīvumu un beramtilpumu, kas būtiski ietekmē siltumizolācijas materiāla īpašības.

3.2.1. 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 3.3. 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 termokīmiskā fāze un maksimāli maz notikusi parauga ķīmiskā destrukcija. Masas zudumi notikuši uz neorganisko vielu sāļu izšķīšanas un daļējas hemiceluložu hidrolīzes rēķina.



3.3. att. Masas zudumi ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem

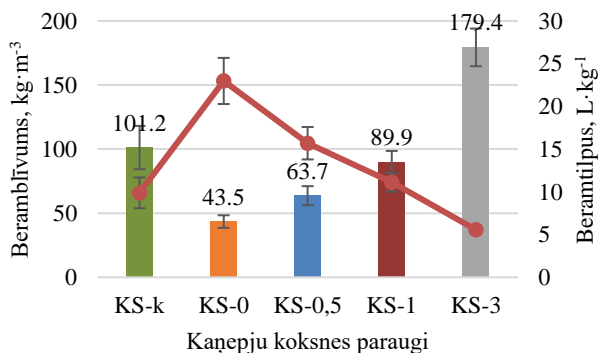
3.2.2. Beramtilpums un beramblīvums

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 3.4. 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, 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 3.4. 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), vai pareizāk varētu teikt, ka, 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 notiek celulozes kristālisko fragmentu atdalīšanās no celulozes amorfās daļas. Paralēli notiek lignīna, galvenokārt β – O – 4 saišu destrukcija.

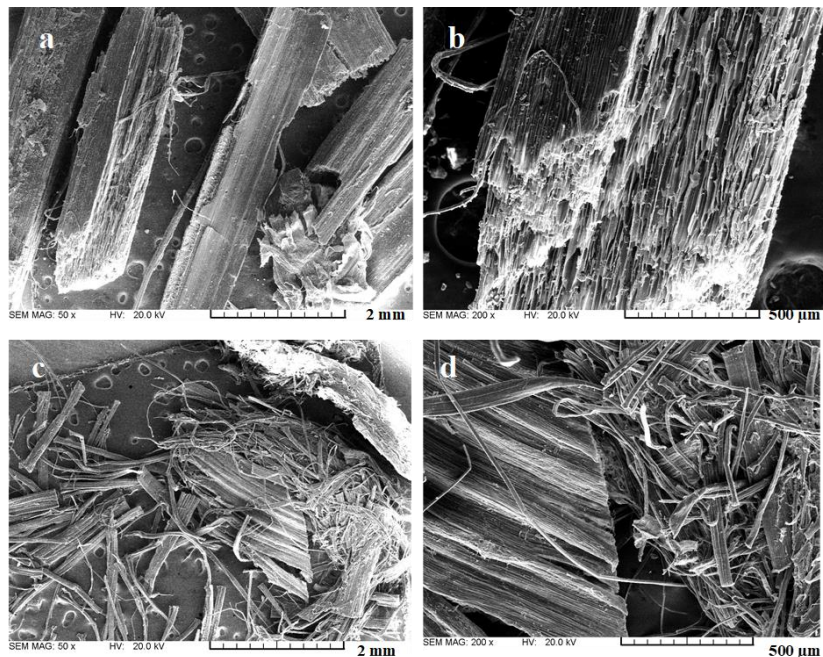


3.4. att. Beramtilpums (līnija) un beramblīvums (stabiņi) neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem

Palielinot apstrādes laiku līdz 3 minūtēm (paraugs KS-3; atbilstošais barguma faktors 4,5), sākas parauga destrukcija. Gandrīz pilnībā notikusi hemiceluložu hidrolīze, turpinās lignīna β – 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 gandrīz 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.

3.2.3. SEM

Kaņepju spaļu paraugu morfoloģiju pētīja ar skenējošo elektronu mikroskopiju pirms un pēc TS apstrādes, lai novērotu paraugu fizikalās izmaiņas izmēros.

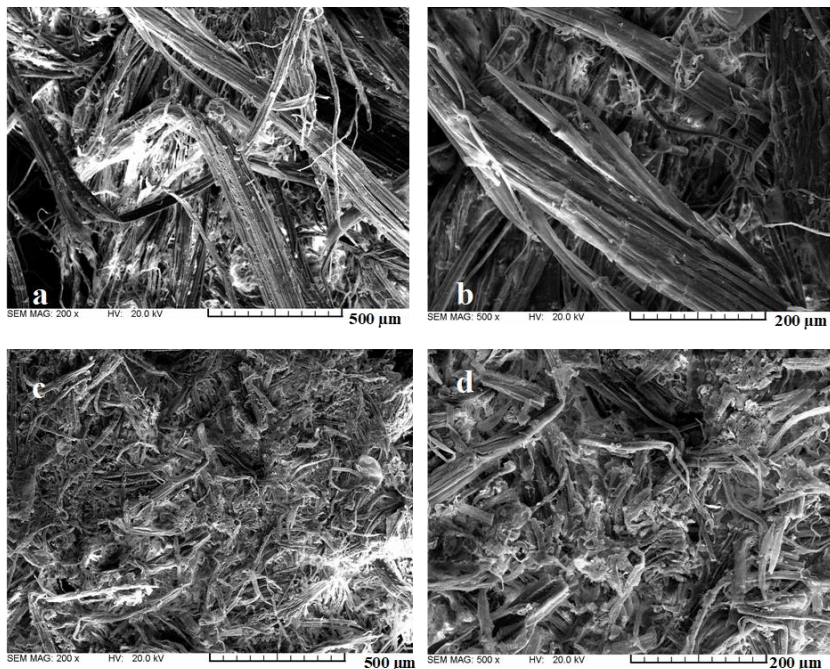


3.5.att. Kaņepju spaļu SEM attēli pirms (KS-k – a un b) un pēc TS (KS-0 – c un d) ar 50x palielinājumu (a; c) un 200x palielinājumu (b; d)

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) divos dažādos palielinājumos apkopoti 3.5. 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) kaņepju spaļi ir sadalījušies sīkākos gabalos, šķiedru kūļos un atsevišķās šķiedrās. Novērojama paraugu sašķiedrošanās jeb fibrillēšanās. Kā redzams 3.5. attēlā (c) 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.

SEM attēli pēc 30 sekunžu KS-0,5 (a un b) un 1 minūtes KS-1 (c un d) TS apstrādes 2 dažādos palielinājumos apkopoti 3.6. 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.



3.6. 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

3.6. 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 degradācija – 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).

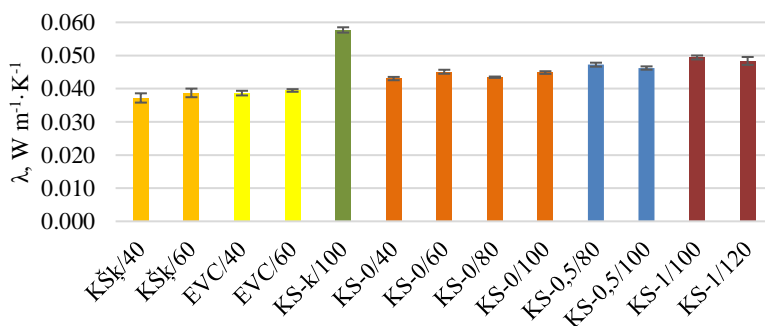
3.2. apakšnodaļas kopsavilkums: KS-0 paraugam TS apstrādē beramlīvums samazinās vairāk kā 2 reizes, ir vismazākie masas zudumi un vismazāk pieaug smalkās frakcijas daudzums. Tie ir būtiski rādītāji, izvēloties siltumizolācijas materiālu no tehniski ekonomiskā viedokļa. Pie lielākas TS apstrādes beramlīvums 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 ūdens aizturēšanas spēja samazinās. Tas skaidrojams ar hidrofobā pseidolignīna veidošanos un izdalīšanos uz šķiedru virsmas, tādējādi atgrūžot ūdeni. Analizējot fizikālo īpašību izmaiņas, var secināt, ka siltumizolācijas materiālam atbilstošākais ir paraugs TS-0.

3.3. 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 $0^{\circ}C$ līdz $+30^{\circ}C$, taču 3.7. att. tiek norādīts iegūto rezultātu kopsavilkums saskaņā ar standartu LVS ISO 8301:2001, pie $+10^{\circ}C$. 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 lielākā mērā apstrādātajiem paraugiem, redzams (3.7. att.), ka TS apstrāde ir būtiski uzlabojusi (pazeminājusi) siltumvadītspējas koeficientu λ .



3.7. att. Siltumvadītspēja neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju saļu paraugiem salīdzinājumā ar industriālajiem siltumizolācijas materiāliem

Lai izvērtētu, cik liels ir lamdas samazinājums, izrēķināts 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 paraugiem, kam veikta TS apstrāde 0 min., jo, palielinot apstrādes laiku līdz 0,5 min., piemēram, KS-0,5/80, būtiski pieaug siltumvadītspējas koeficients, sasniedzot $0,047 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tas ir statistiski būtiski augstāks nekā paraugam KS-0/100, kuram rādītājs ir $0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ($p=0,046$). Optimālais blīvums beramiem kaņepju spaļu siltumizolācijas materiāliem variē starp 40 un 80 kg 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. Brīvās gaisa poras tiešā veidā ietekmē materiāla blīvumu. Dabiskās izelsmes šķiedru izolācijas materiālos gaiss ir ne tikai starpšķiedru telpā, bet arī pašas šķiedras lumenā, kur gaiss ir gandrīz nekustīgs. No dabiskās izelsmes materiāliem vislabākie rādītāji ir tādiem materiāliem kā koks, salmi, kaņepju spaļi, kam struktūra ir nevienbārīga. To sauc par anizotropiju.

Analizējot izstrādāto šķiedru materiālu paraugu siltumvadītspēju, labākos rādītājus uzrādīja paraugi ar TS apstrādes laiku 0 min. Tas ir skaidrojams ar vislielāko šķiedru fibrillāciju un vienlaicīgi vismazāko parauga destrukciju, kas nodrošina parauga uzirdināšanos. Šķiedru fibrillizācija ir apskatīta 3.1. attēlā, kur redzama fotovizualizācija izstrādātajiem paraugiem un pamatota ar 3.5. SEM attēliem. Šī parādība shematiski attēlota 3.2. attēlā. Parauga uzirdināšanās nodrošina arī vismazāko beramblīvumu (3.4. 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.

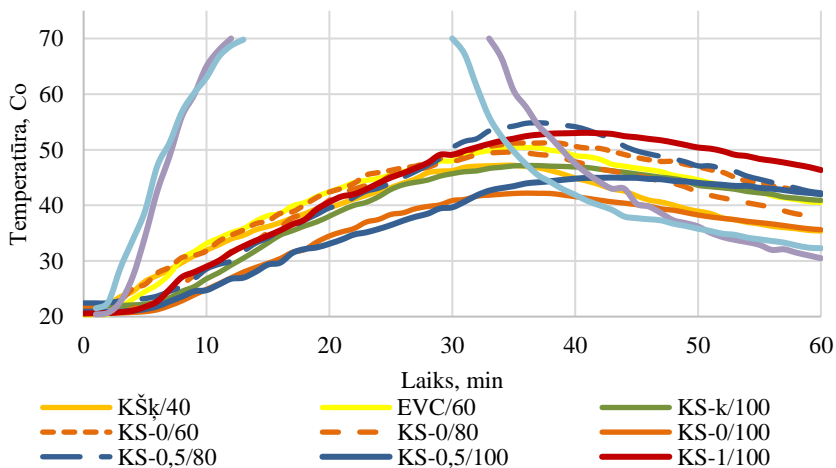
Pētījumā izstrādātie materiāli ir konvektīvie porainas struktūras materiāli ar atvērtām porām, labi vada mitrumu un gaisu. Lai šādi materiāli funkcionētu pareizi un λ koeficients saglabātos nemainīgs, konstrukcijās tie ir jāiestrādā ar vēja aizsargbarjerām, aizsargājot no mitruma iedarbības, kā arī no ūdens tvaiku iedarbības, kas nāk no telpas iekšpuses. Siltumvadītspēju tiešā veidā ietekmē materiāla mitruma saturs, blīvums un vides temperatūra.

3.3. 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 $0,058 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Samazinājums robežās ir no 21,8% – 25,5%, atkarībā no blīvuma. Piemērotākais siltumizolācijas materiāls, analizējot TS apstrādes laiku, ir KS-0 ar blīvumu $40\text{--}80 \text{ kg m}^{-3}$, kur siltumvadītspējas vērtība nav statistiski būtiski atšķirīga. Parauga iestrādes blīvums jāizvēlas atbilstoši konstrukcijai, iestrādes iespējām, un ņemot vērā parauga sasēšanos. Materiāls ir līdzvērtīgs citiem dabiskās izcelsmes šķiedru siltumizolācijas materiāliem.

3.4. Siltuma inerce

Materiālu siltuminerces atkarība no materiāla veida redzama 3.8. att. Izmantojot autora izstrādāto siltuminerces simulācijas iekārtu iegūts grafiks, kurā attēlota temperatūra, kas izgājusi cauri izolācijas materiālam noteiktā laika sprīdī (siltuma difūzija).

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 pānesi 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.



3.8. att. Siltuminerce neapstrādātajiem un ar TS metodi apstrādātajiem kaņepju spaļu paraugiem salīdzinājumā ar industriālajiem siltumizolācijas materiāliem

Rezultāti parāda dabiskās izcelsmes materiālu būtisku priekšrocību pret 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 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 vieglāk, 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 ar kontroles paraugu KS-k/100 ($p=0,13$), un, turpinot TS, parauga KS-1/100 siltuminerces vērtības ir statistiski būtiski augstākas (sliktākas) kā kontroles paraugam KS-k/100 ($p=0,33$).

3.4. apakšnodalās 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 simulatori. Termiskās difūzijas koeficients izstrādātajam materiālam ir $2,4 - 4,2 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot 10^{-1}$, salīdzinot ar organiskās izcelsmes siltumizolācijas materiāliem $14,8 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot 10^{-1}$. TS apstrāde ar maksimāli īstu termoķīmisko fāzi paaugstina materiāla siltumietilpību un palēnina siltuma inerci.

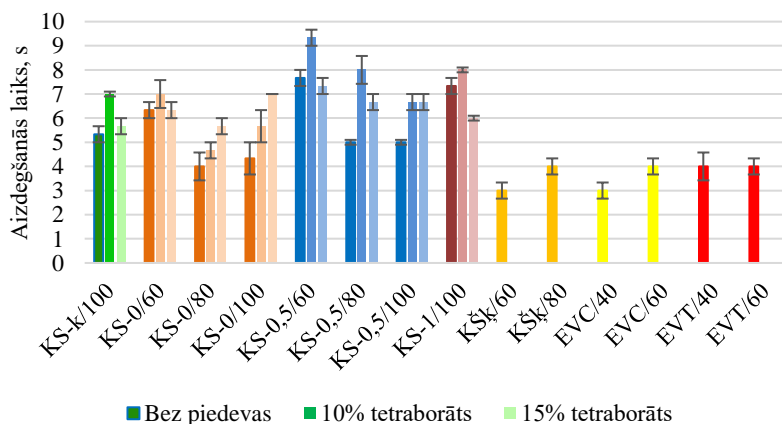
3.5. Ugunsreakcijas pārbaude ar Koniskā kalorimetra metodi

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.

Promocijas darba pētījumā autors izstrādāto materiālu salīdzina ar kokšķiedras 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 kokšķiedras izolācijas materiāliem (3.9. att.). Pievienojot antipirēnus, statistiski būtiskā atšķirība pieaug ($p=0,00015-0,047$). Pētījuma autors ievēroja, ka celulozes un kokšķiedras paraugu aizdegšanās ar liesmu ilga 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.

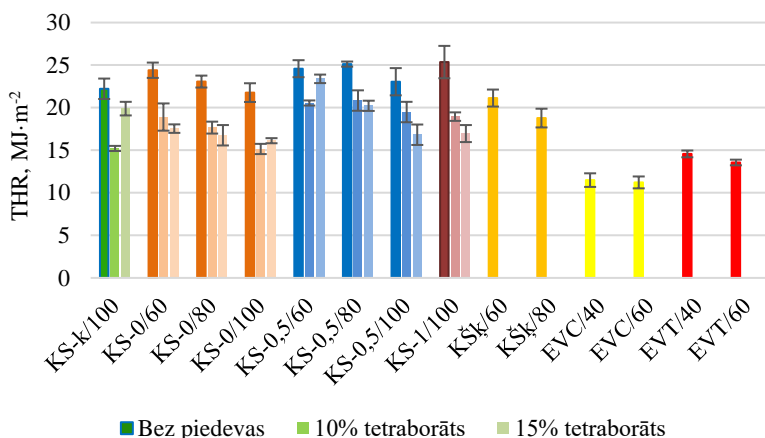
Celulozes izolācija ir būtiski atšķirīga no autora izveidotā materiāla, jo tā ir viena veida šķiedra, homogēna, iegūta āmurdzirnāvās; tas pats attiecas uz kokšķiedras izolācijas paraugu, kas iegūts šķiedrotājā ar noteiktiem šķiedras garuma un platuma parametriem. Autora izveidotais materiāls sastāv no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



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

Aplūkojot iegūtos rezultātus 3.10. 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. 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 atstājot ķīmisko īpašību ietekmei

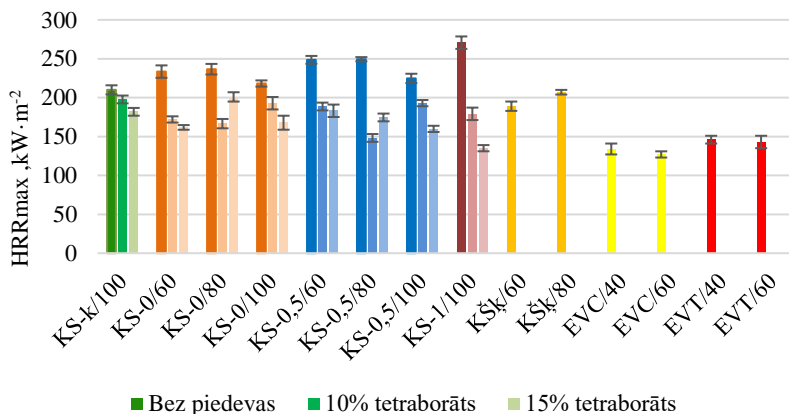
uz uguns reakciju. Tomēr, balstoties uz aprēķiniem, blīvuma pieaugumam nav statistiski būtiskas ietekmes ($p=0,2-0,79$). Antipirēna piedevas apjoma palielināšana no 10% uz 15% nerada būtisku efektu ($p>0,05$) uz paraugu kopējo siltuma izdalīšanās daudzumu THR. Pievienojot antipirēnus izstrādātajiem siltumizolācijas materiāliem vismaz 10% apmērā, kopējā izdalītā siltuma daudzums visās datu kopās statistiski būtiski neatšķiras no komerciāli lietotās kokšķiedras 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).



3.10. 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%**

Paraugiem pievienotā antipirēna piedeva degšanas jaudu ietekmē ļoti dažādi (skat. 3.11. 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. Salīdzinot apstrādātu un nepastrādātu kaņepju spaļu materiālus ar rūpnieciski ražotajiem paraugiem, ugunsreakcijas īpašības ir zemākas (izņemot kokšķiedras 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 kokšķiedras paraugiem, bet kopējā siltuma izdalīšanās ir vismazākā. Rezultātā 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. Uz rezultātiem ietekmi atstāja problēma, 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.



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

3.5. Apakšnodaļas kopsavilkums: Aplūkojot izstrādāto materiālu bez antipirēnu piedevām, aizdegšanās laikiem skaidru sakarību nevar redzēt, kā arī nav saskatāma sakarība starp blīvumu un aizdegšanās laiku. THR rezultāti neuzrāda TS ietekmi uz siltuma izdalīšanos. Pieaugot blīvumam, THR vērtība samazinājās. HRR vērtību neietekmē TS apstrāde, tā samazinās, palielinot paraugu blīvumu. Vienīgais atšķirīgais paraugs ir KS-1/100, kura atšķirīgās ugunsreakcijas īpašības skaidrojamas ar būtiskām ķīmiskā sastāva izmaiņām.

Izstrādātajam materiālam, pievienojot antipirēnus 10% apmērā, novērojama būtiska pozitīva ietekme uz ugunsreakcijas īpašībām, taču aizdegšanās laikam kopsakarība netika novērota. 10% antipirēnu piedeva samazina THR par 4–7 MJ·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 siltumizolācijas materiālu. Visiem pārbaudītajiem paraugiem ir 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 sarēžģīts 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 būtiski var ietekmēt vienmērīgu vielas uzklāšanu uz šķiedru virsmas. Iestrādājot beramo materiālu testēšanas ietvarā, ir grūti 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 gadījumā 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.

4. EKONOMISKĀ IZVĒRTĒJUMA KOPSAVILKUMS

Pilns tehnoloģiski ekonomiskās priekšizpētes dokuments apskatāms promocijas darba pielikumā. Ekonomiskais izvērtējums izstrādāts rēķinot uz pilna izmēra ražotni.

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 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 (lignocelulozes beramais siltumizolācijas materiāls) un potenciāli jaunā tehnoloģija (lignocelulozes beramā siltumizolācijas materiāla iegūšanas tehnoloģija ar TS 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.

Produkts 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 – lignocelulozes 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 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 **ir 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, tādēļ tam ir īpaši augsts investīciju piesaistes potenciāls**.

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 $T=235^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{max}}=32\text{ Bar}$, ar atbrīvošanu uzreiz pēc spiediena un temperatūras maksimuma sasniegšanas, t.i. izturēšanas laiks $\tau=0\text{ min}$ (paraugs KS-0)
3. Izstrādātajā TS metodes tehnoloģijā kaņepju spaļu apstrādē būtiskākais ir adiabatiskais process (otrā fāze – sprādziens), kas veic spaļu sašķiedrošanu, maksimāli saīsinot termokīmisko procesu (pirmā fāze).
4. Optimālajos TS apstrādes apstākļos iegūtajam kaņepju spaļu beramam siltumizolācijas materiāla paraugam KS-0:
 - ✓ berambļivums samazinās 2,3 reizes (salīdzinot ar kontroles paraugu – neapstrādātiem kaņepju spaļiem) līdz 43,5,
 - ✓ masas zudumi - 2,4%,
 - ✓ mazākais smalkās frakcijas apjoms (10%),
 - ✓ termiskā difūcija ($2,4\text{--}4,2\text{ }\alpha\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot 10^{-1}$)
 - ✓ siltumvadītspēja $0,043\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (par 25% mazāka, salīdzinot ar, salīdzinot ar kontroles paraugu - neapstrādātiem kaņepju spaļiem)
5. Ar TS apstrāde iegūtā kaņepju spaļu beramā materiāla ar iestrādes blīvumu no 40 līdz 80 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 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 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) būtiski pasliktina tā siltuminerces un ugunsreakcijas rezultātus.
8. Optimālajos TS apstrādes apstākļos iegūtā kaņepju spaļu beramā siltumizolācijas materiāla blīvumam robežās no 40 līdz 100 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nav būtiskas ietekmes uz siltumvadītspēju un 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 (aizstāvējamā tēze) – 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 apstiprinājies.

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 siltumnerces rādītājus, materiālu veiksmīgi var izmantot jumta un ārsienu konstrukcijās karstā klimatā.
3. Izstrādāto siltumizolācijas materiālu izmantojot aukstā klimatā, ieteicams lietot tvaika difūzijas membrānas un ventilējamās 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 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

1. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE SCIENTIFIC WORK

Justification and relevance of the topic of the Thesis

European Union regulations and the best global trends in limiting climate change have forced Latvia to take measures to ensure the rational consumption and saving of thermal energy. This aspect of energy has become especially important after the Russian invasion and aggression in Ukraine, since energy prices have increased several times over the past two years, making the aspect of energy saving not only a political and environmental but also economically important issue. In 2023, the Ministry of Climate and Energy was introduced in Latvia, whose main tasks are to coordinate climate and energy policies in Latvia and generally take care of the country's progress towards the sustainability of the energy cycle.

Although in recent years, with the support of EU funds, an energy efficiency programme for apartment buildings has been implemented, the number of non-energy-efficient buildings in Latvia is still very large, but the most pronounced problem can be observed in multi-storey buildings constructed during the Soviet occupation. As follows from the study of the quality and thermal resistance of buildings in the EU, Latvia has the lowest housing quality; the buildings have relatively low thermal resistance since ~15% of buildings were built before 1940, when brick, stone masonry and wooden constructions were mostly used in construction. On the other hand, 65% of the population live in buildings built before the nineties of the 20th century, when they used materials that did not meet modern thermal requirements. To save energy and heating costs, as well as to meet EU regulations on the thermal efficiency of buildings, buildings must be insulated in accordance with the national minimums. Only those buildings built after 2015 can be considered to meet the current thermal technical requirements. For these reasons, intensive improvements in the energy efficiency of the building stock are currently underway and expected in the future, i.e., building insulation.

In the context of energy saving, the first regulations in the field of energy efficiency of housing appeared in Europe in the seventies of the 20th century and have since become an integral part of the design and construction process. Gradually, the minimum energy efficiency requirements for housing have been made stricter and an ever-increasing demand for thermal insulation materials has been created. Initially, commercial thermal insulation materials were made from sustainable synthetic and mineral materials. However, influenced by both EU regulations and public desires focused on sustainability and environmental aspects, the market is demanding alternative thermal insulation materials – sustainable, health and environment-friendly products with a positive impact on the indoor climate and at the same time with minimal impact on the environment and climate change. Insulation materials derived from biomass meet these

conditions but are more expensive than those produced from non-renewable resources.

On the global market, about 80% of alternative insulation materials are made from wood pulp and wood fibre, but overall the market for alternative insulation materials is quite broad and versatile. There are over 60 different insulation materials available from cellulose, cork, hemp, sheep's wool, reeds and other natural materials, each of them with their own advantages and disadvantages. Nowadays, not only are thermal insulation properties important to consumers but also the chemical composition of the product and the environmental impact, so there is still a strong demand for insulation materials made from biomass that have low production costs and minimal environmental impact.

By replacing the more commonly used fibre raw material, wood, with other lignocellulosic resources, such as residues or by-products of annual crops, investment is made in the efficient and sustainable use of biomass resources. For example, one hectare of hemp captures 9 to 15 tonnes of CO₂, being equivalent to a new forest, but takes five months in terms of time, making the hemp plant attractive for repeated use in the creation of various new products. Both in Europe and in Latvia, the volume of hemp cultivation is growing.

The aforementioned data and factors create a justified and urgent need for the development of a new thermal insulation material from locally sourced non-wood lignocellulosic biomass. Using the steam explosion (SE) technology developed at the Latvian State Institute of Wood Chemistry, it is necessary to obtain a new loose-fill thermal insulation material with low cost and modern environmental requirements from a widely available by-product of agricultural plants – hemp shives. In order to make the most efficient use of raw materials and create a material that can compete with commercially available insulating materials, detailed and fundamental, but at the same time high-tech research, including the development of pre-treatment techniques, is required for the SE of hemp shives, the study of the properties of the resulting fibrous materials and the evaluation of a sample of loose-fill thermal insulation material.

Thesis hypothesis - thesis to be defended: it is possible to obtain a loose-fill thermal insulation material with equivalent or better thermal insulation properties than similar commercially available thermal insulation materials from the by-products of hemp fibre production, hemp shives, using a SE method.

Aim of the Scientific Work: the development of new loose-fill thermal insulation materials from hemp grown in Latvia, using the SE method.

In order to achieve the aim of the Doctoral Thesis, the following **study tasks** have been set:

1. to develop a method for processing hemp shives using the SE technology;
2. to create samples of loose-fill thermal insulation materials from hemp fibres;
3. to determine the physical and chemical properties of loose-fill thermal insulation materials, as well as the factors influencing them;
4. to determine the thermal insulation properties of loose-fill thermal insulation materials and the factors influencing them;
5. to determine/plan/predict/recommend the possibilities of using thermal insulation materials made from hemp fibres depending on the resulting properties.

In this study, a new insulating material from hemp shives is obtained and investigated using SE treatment. The raw material used is the hemp biomass from Białobrzegie (Poland, code 893) (*Cannabis sativa* L.), which has been tested and grows well in Latvia. For the development of the insulation material, hemp shives are processed by the SE method – with water vapour under high pressure in a sealed environment. After the processing time, the biomass is decompressed to form fibres and fibre bundles. The physical and chemical properties of the resulting material were tested and compared with other materials used in thermal insulation. The material obtained from hemp shives is defined as loose (cohesionless) insulation.

Scientific Significance of the Study

1. An innovative thermal insulation material made from hemp shives using the SE technology has been developed
2. A new application of SE method has been found in the extraction of environmentally friendly thermal insulation material
3. The possibilities of using SE technology for converting hemp shives into loose-fill thermal insulation material have been investigated
4. The influence of variable parameters of SE technology on the structure, properties and possibilities of using the resulting material in heat and sound insulation has been studied
5. New knowledge has been obtained about the use of SE technology in the processing of agricultural residues

Practical Relevance of the Study

1. Latvian general knowledge base on biomass products has been updated
2. High-tech, innovative products with high added value and export potential have been created
3. A significant contribution to achieving Latvia's climate neutrality and CO₂ emission reduction goals in the field of energy efficiency has been made

4. A practically applicable technology has been developed for processing by-products of hemp fibre production – hemp shives into products with high added value
5. The Study contributes to the growing demand for sustainable thermal insulation materials

Structure and Scope of the Thesis

1. The Doctoral Thesis is subject to research tasks and consists of 6 chapters:
2. The Literature review section analyses the current situation regarding regulations and climate goals in matters of energy efficiency. Information about thermal insulation materials, their types and main properties is summarised. Updates on the biorefining process are included and SE technology is discussed. The chapter reviews the literature on the resources, cultivation, processing and use of industrial hemp.
3. Characteristics of the materials and methods used in the study.
4. The study results and their evaluation. The subsections present the results and their interpretation of the chemical and physical properties of hemp material before and after SE. The following subsections evaluate the thermal conductivity, thermal inertia, water vapour transmission, fire reaction and sound insulation ability of the obtained samples. The results obtained are compared with analogues of thermal insulation materials on the market and explained using the characteristics of the chemical and physical properties obtained in the previous subsections.
5. Summary of the economic evaluation.
6. Conclusions
7. Recommendations.

In total, the Thesis has 112 pages; the text includes 10 tables, 60 images, 21 formulas and 225 references to the used literature sources.

2. SUMMARY OF SITUATION ANALYSIS

After reviewing and analysing the global and national climate policy strategy documents and regulations, it was concluded that the regulations and documents created on the basis of the European Green Deal and related to the energy sector set the main goals in terms of reducing greenhouse gas emissions and improving quality of life of people in general, but one of the priorities is the energy efficiency of buildings and its improvement.

In the nearest future, intensification of measures to improve the energy efficiency of buildings, namely the insulation of buildings, is noticeable and planned, since the greatest contribution to improving the energy efficiency of buildings is provided by the thermal insulation of external structures. The expected activities will increase the demand for sustainable thermal insulation materials, since the field of materials creation is also subject to the regulations of the Green Deal and Circular Economy, including the creation of innovative and sustainable materials using the best available technologies and local biomass raw materials. Taking the principles of biorefining into account, the most favourable type of raw materials is locally available biomass raw materials, i.e., residues after use in other industries.

It is concluded that the development of the agricultural sector of seed or industrial hemp is taking place both in Latvia and in Europe. Latvian experts see the potential of the hemp cultivation industry, predict an increase in the area of hemp cultivation and an increase in the production of various products in Latvia, which will also create a greater surplus of cheap hemp shives.

Research into scientific publications and other sources shows that hemp shives have been studied and accepted for use in construction, such as hemp shives in the composition of concrete and in the production of slabs, but no information was found about studies when any pre-treatment technology was used to obtain loose-fill thermal insulation material based on industrial hemp shives. At the same time, it was concluded that LSIWC has access to modern technology – SE hydrolysis.

By combining the demand for sustainable thermal insulation materials created by climate policy goals and the conditions of the circular economy for raw materials, as well as the lack of knowledge about the thermal insulation material made from pre-treated hemp shives, a political, scientific-theoretical and practical rationale for the topic presented in the Doctoral Thesis has been created. In order to make the most efficient use of raw materials and create a material that can compete with commercially available insulating materials, detailed and fundamental, but at the same time high-tech research, including the development of pre-treatment techniques, is required for the SE of hemp shives, the study of the properties of the resulting fibrous materials and evaluation of a sample of loose-fill thermal insulation material.

3. MATERIALS AND METHODS

The chapter contains information about the place where hemp shives are obtained, growing conditions, properties, method of obtaining fibres and their characteristics. Methods for studying structure and properties, methods for assessing changes resulting from fibre processing, as well as methods for assessing the use of materials are described.

2.1. Methodological basis of the study

The proposed study task is reflected in the diagram (Fig. 2.1).

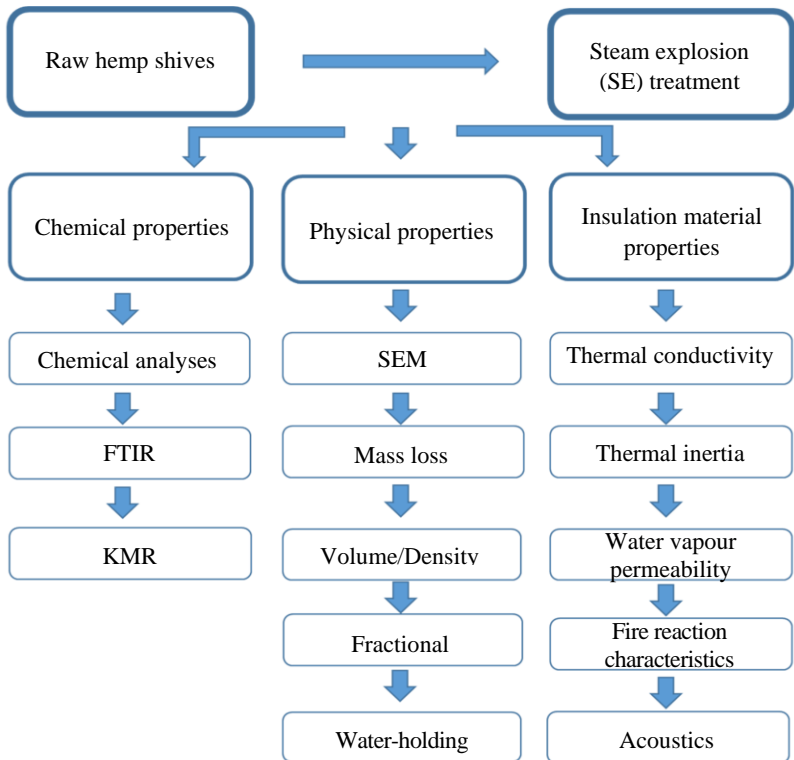


Fig. 2.1. Scheme of the study tasks

2.2. Materials and reagents

The raw material used for the development of the work is hemp (*Cannabis sativa* L.), variety *Bialobrzeskie* (Poland, code 893), more precisely hemp shives, which are obtained as residues after processing hemp shives and extracting long fibres. The variety has been tested and grows well in Latvia. Hemp is an annual plant, and it is possible to obtain 6–9 tonnes of shives from 1 ha of sown area. The *Bialobrzeskie* hemp variety is fibrous hemp that can reach 4.5 metres in length. The samples are made from 2012 and 2018 harvest hemp grown by “SIA ZALERS” in Krāslava region.

2.3. Obtaining insulation material by SE method

To obtain loose-fill fibre insulation material from hemp shives, SE (steam cracking, flash (*rapid*) hydrolysis) or, more correctly, SE autohydrolysis, or treatment with saturated high-temperature steam, is used. The parameters of the method are $T = 235\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 3.2\text{ bar}$, time – 0–3 min., (0 – SE treatment is performed immediately after reaching the target steam pressure; 0.5; 1; 2; 3 min – SE treatment is performed, respectively, after holding for 30, 60, 120, 180 seconds at the target steam pressure), see Fig. 2.2.

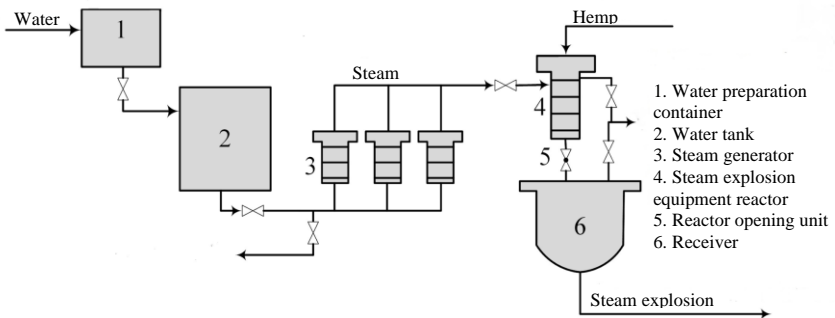


Fig. 2.2. SE equipment

3. RESULTS

The results are described using the symbols and colours presented in Table 3.1.

Table 3.1.

Designations of developed and studied thermal insulation materials

Designation 1		T, Co	p, atm	t, s	ρ , kg m ⁻³	Designation 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		235	32	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 – hemp shives

-k – raw sample

-0; -0.5; -1; -3 – SE treated samples, respectively, immediately after reaching the target pressure, after 30 sec., 60 sec., 180 sec.

/40; /60; /80; /100 – corresponding density of the sample, kg m⁻³

KŠķ – wood fibre (industrial thermal insulation material)

EVC – ecowool Climax (industrial thermal insulation material)

EVT – ecowool TERMEX (industrial thermal insulation material)

-10–10% tetraborate added

-15–15% tetraborate added

3.1. Obtaining materials by the SE method

SE is used as a method of processing hemp shives to produce a more fibrous material with a larger bulk volume. The SE process can be divided into two phases. **The first phase of SE is the treatment of biomass with high-temperature steam at elevated pressure.** The first phase basically works as a thermochemical reaction. In the thermochemical reaction, acetyl groups are removed from the biomass hemicellulose and acetic acid is formed. A small amount of uronic acid is also formed from hemicelluloses. During the degradation of polysaccharides, formic acid and levulinic acid are formed. Next, hemicelluloses are hydrolysed under the action of the resulting acids. At a higher stiffness factor (higher temperature and time), hydrolysis of the amorphous part of cellulose occurs, as well as the destruction of lignin bonds, mainly $\beta - O - 4$, takes place. **The second phase of SE** is an adiabatic process in which thermal energy is converted into mechanical energy, resulting in an explosive discharge of steam under pressure. During the first phase, the material is softened, while during the second phase, the product, mechanically broken into fibres, is received at discharge. SE not only changes the chemical composition of the fibre but also the supramolecular and ultrastructure down to the cellular level. The appearance of hemp shive samples before and after SE is shown in Fig. 3.1.



Fig. 3.1. Hemp shive sample before and after SE

According to Fig. 3.1, it can be seen that, under the influence of SE treatment, under conditions of a lower stiffness factor (shorter processing time), hemp shives are defibred or fibrillated. Bundles of fibres are formed that are partially detached from the hemp shives. This process most likely occurs because in the first phase of SE, the sample softens under the influence of water, temperature and pressure, and inter-fibre hydrogen bonds are broken. First, these bonds are broken, and then chemical reactions follow. In the case of a KS-0 sample, the first phase is immediately followed by the second phase of SE treatment – mechanically defibred material is obtained (immediately after T and pressure application, the reactor opens in tenths of a second, and the mass of the reactor is “fired” into the receiver). With a short SE treatment time, chemical reactions occur minimally, but under the influence of water, temperature and pressure, the softened material with broken inter-fibre hydrogen bonds is easily defibred. The

resulting sample is “puffed up” by the microfibrils of the fibres that remain partially attached to the hemp shives. As can be seen in Fig. 3.1, as the stiffness factor (SE treatment time) increases, the destruction of hemp shives begins under the influence of chemical reactions. Hemp shives are mechanically torn into finer fragments, and microfibrils of fibres are torn from fragments of hemp shives. Compacted samples of hemp shives. Schematic representation of hemp shive samples before and after SE treatment is shown in Fig. 3.2.

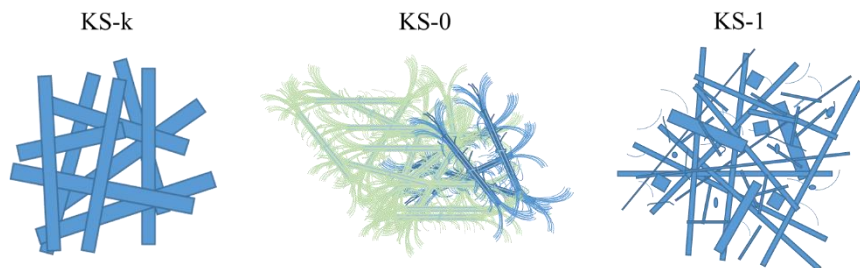


Fig. 3.2. **Schematic representation of hemp shive samples before and after SE**

Classically, the SE method is used as a pre-treatment and the main focus is on the thermochemical phase. The Thesis has discovered a new way of applying the SE method in the basic processing of hemp shives.

Summary of subsection 3.1: SE processing takes place in 2 phases. The first one is thermochemical softening of the sample; the second one is an adiabatic process in which mechanical defibering occurs. In the case of shorter SE treatment, chemical processes take place less intensively. Under the influence of steam and temperature, the material is softened and hydrogen bonds are broken. Defibering occurs primarily thanks to the steam discharge, when the shives are defibred mechanically. As the SE treatment time increases, the duration of the thermochemical phase increases – autohydrolysis occurs faster, and chemical reactions begin to significantly affect the decomposition of the sample. The Thesis has discovered a new way of applying SE in the basic processing of hemp shives.

3.2. Research on the physical changes of hemp shives as a thermal insulation material before and after SE

Changes in hemp shives as a thermal insulation material before and after SE were characterised by determining the loss of mass, fractional composition, bulkiness and bulk volume, which significantly affect the properties of the thermal insulation material.

3.2.1. Mass loss

Mass losses were observed after SE treatment. This should be taken into account when choosing the most suitable processing conditions for the insulating material so that it is economically justified.

As can be seen in Fig. 3.3, the mass loss within the error limits increases linearly in proportion to the stiffness factor. Mass loss can be explained by: (i) evaporation of volatile substances, (ii) transition of water-soluble extractives into solution with a lower stiffness factor, (iii) transition of partial sugars into volatile products and (iv) hydrolysis of hemicelluloses with an increase in stiffness factor and (v) disordered cellulose (hydrolysis of the amorphous) part at a higher stiffness factor. These processes are discussed in section 3.2 on changes in the chemical composition of hemp shives. Mass loss increases from 2.5% to 20%. The least mass loss is observed in sample KS-0, since it has the shortest thermochemical phase during processing and the least amount of chemical destruction of the sample has occurred. The mass loss occurred due to the dissolution of salts of inorganic substances and partial hydrolysis of hemicelluloses.

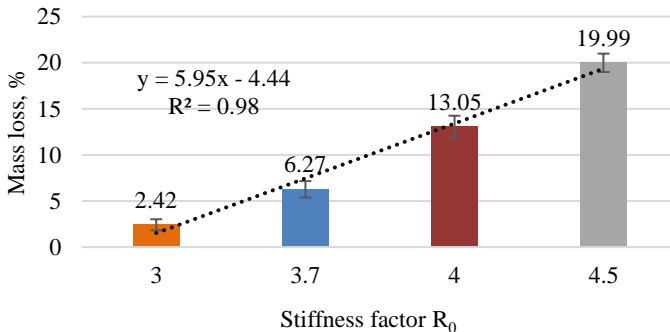


Fig. 3.3. Mass loss of hemp shive samples treated by the SE method

3.2.2. Bulk volume and bulk density

Bulk density and its inverse bulk volume represent important parameters for insulation materials. It indicates how much loose-fill insulation material will need to be used for the same thickness of thermal insulation layer. Bulk density is a physical quantity that determines how much 1 m³ of a sample weighs. The inverse of bulk density, bulk volume, describes how much volume is occupied by 1 kg of sample.

Figure 3.4 shows the changes in bulk density and bulk volume of hemp insulation materials before and after SE treatment. For sample KS-0, the bulk density value decreased by more than 2 times compared to the initial sample of hemp shives KS-k. The reduction in bulk density is ensured by the scarification of fibres.

The chemical process involved in the SE treatment is complex, but several possible processes are known to cause scarification or compression of the fibres. Primarily, fibre scarification occurs due to the breaking of hydrogen bonds within the fibre, partially releasing the cellulose fibrils. Fibre bundles are opened and bonds between cellulose, lignin and hemicelluloses are partially broken. The process is schematically represented in Fig. 3.2. Thus, the fibre components become more accessible to the action of chemicals. As can be seen in Fig. 3.4, with an increase in processing time to 30 and 60 seconds (samples KS-0.5 and KS-1; corresponding stiffness factors are 3.7 and 4), the bulk density decreases less (compared to the control sample), or more correctly we can say that with increasing processing time, hemp shives begin to compact compared to the KS-0 sample.

This is explained by the fact that as the time of SE treatment increases, acids (mainly acetic acid) are formed from the acetyl groups present in hemp shives. As a result, hemicellulose hydrolysis occurs (the products of hemicellulose hydrolysis go into solution), and the amorphous part of the cellulose is also hydrolysed, since crystalline fragments of cellulose are separated from the amorphous part of the cellulose. In parallel, the destruction of lignin, mainly $\beta - O - 4$ bonds, takes place.

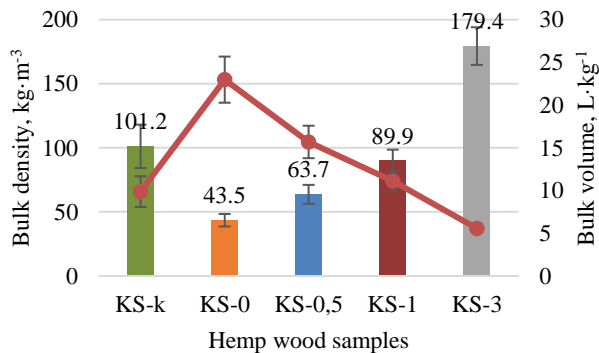


Fig. 3.4. Bulk volume (line) and bulk density (bars) for untreated and steam-explosion treated hemp shive samples

By increasing the treatment time to 3 min (sample KS-3; corresponding stiffness factor 4.5), the destruction of the sample begins. Almost complete hydrolysis of hemicelluloses has occurred, the destruction of $\beta - O - 4$ lignin

bonds continues, and hydrolysis of amorphous sections of cellulose microfibrils takes place. Fragments of the crystalline areas of cellulose, or microcrystalline and nanocrystalline cellulose, are formed. Very short fibre fragments are formed, the sample becomes compacted and the bulk volume increases by almost 2 times compared to the control sample. Since the KS-3 sample has a higher bulk volume than the original hemp shives and is not suitable for thermal insulation materials, it is not considered in further studies.

3.2.3. SEM

The morphology of hemp shive samples was studied using scanning electron microscopy before and after SE treatment to observe physical changes in the size of the samples.

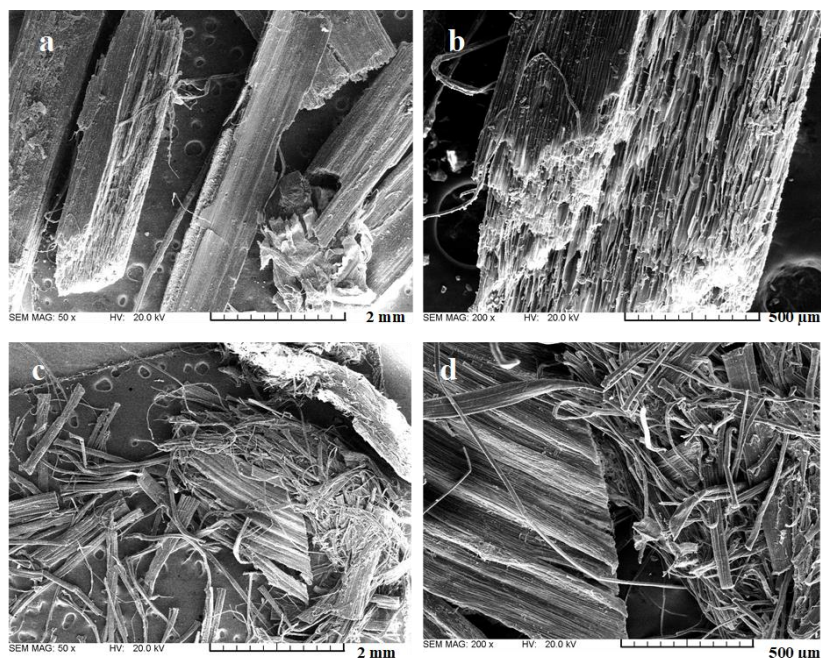


Fig. 3.5. SEM images of hemp shives before (KS-k – a and b) and after SE (KS-0 – c and d) at 50x magnification (a; c) and 200x magnification (b; d)

Figure 3.5 summarises the SEM images of the hemp shive samples before Ks-k (a and b) treatment and after SE treatment immediately after temperature and pressure supply Ks-0 (c and d) at two different magnifications. As can be seen in figures a and b, raw hemp shives consist of pieces about 1–1.5 mm wide

and 5–7 mm long, consisting of parallel bundles of tightly packed fibres. After SE treatment (c, d), hemp shives have broken down into smaller pieces, fibre bundles and individual fibres. Decomposition of the material into fibre or defibering is seen in the samples. As can be seen in Fig. 3.5 (c), the hemp shives are unevenly defibred under the influence of SE treatment, and the sample consists of fractions of different sizes – from a few μm to 1 mm in width and about 2–3 mm in length.

Fig. 3.6 summarises SEM images after 30 seconds of KS-0.5 (a and b) and 1 min of KS-1 (c and d) SE treatment at 2 different magnifications. For the samples treated at a higher stiffness factor, a higher SEM magnification was chosen to observe the defibering of the samples and the precipitation of the repolymerised substances released from the sample – pseudo-lignin on the surface of the samples.

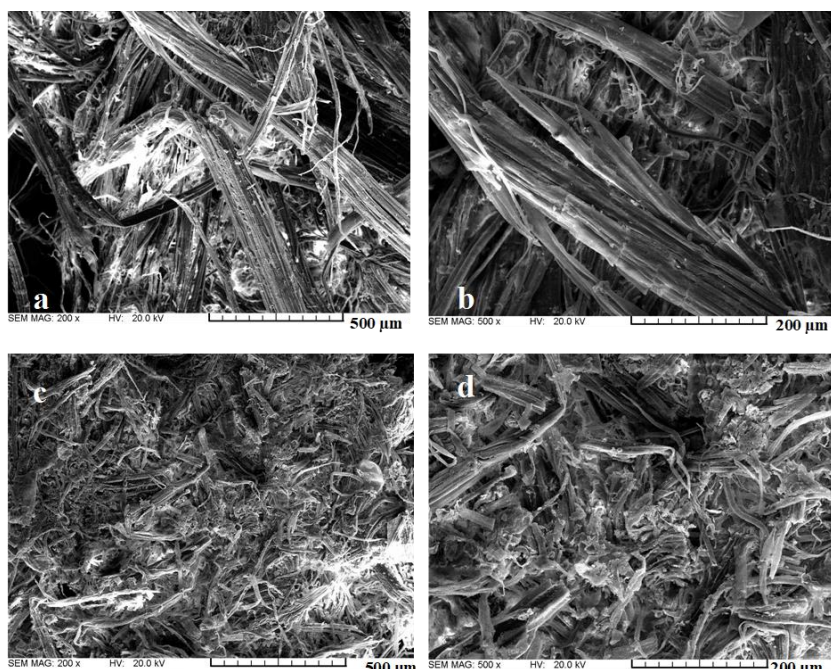


Fig. 3.6 SEM hemp shives images after 30 seconds of (KS-0.5 – a and b) and 1 min of (KS-1 c and d) SE treatment at 200x and 500x magnifications.

Fig. 3.6 (a) shows the defibering of hemp shives after 30 seconds of SE treatment, forming finer fibres. When examining the sample at higher magnification (b), defibering of the fibres is visible – from longer fibres, consisting of parallel bundles of fibres, partially detached microfibrils, this ensures the scarification of fibres. Small crystalline deposits can be observed on

the surface of the fibres (b), which can probably be explained by the release of pseudo-lignin on the surface of the sample. By increasing the SE treatment time (c and d), the degradation of the sample begins – defibering continues, and the fine fibrils are completely detached from the fibres. Due to the broken chemical bonds and the effect of chemical destruction, the fibres are broken into smaller parts. Agglomerates are formed and precipitates are observed on the surface of the sample (d).

Summary of subsection 3.2: For the KS-0 sample, when treated under SE method, the bulk density decreases by more than 2 times, and the smallest mass loss and smallest increase in the amount of fine fraction are observed. These are important indicators when choosing a thermal insulation material from a technical and economic point of view. With higher SE treatment intensity, bulk volume, mass loss and the amount of fine fraction increase, which is explained by the chemical destruction of samples, autohydrolysis, depolymerisation and transition to volatile and water-soluble compounds. In the case of the KS-0 sample, mechanical “swelling” or defibering of the sample occurs predominantly. This provides an increase in sample bulk density. This is also seen in SEM images. During longer SE treatment, fibrils and fibre fragments are detached from the largest fibres of the sample, both under the influence of thermochemical reactions and in a mechanical process, the amount of the small fraction increases and the bulk density increases as well. Although defibering occurs under SE treatment and there are more freely available hydroxyl groups, the water-holding capacity of the fibres decreases. This is explained by the formation and release of hydrophobic pseudo-lignin on the fibre surface, thus repelling water. Analysing the changes in physical properties, it can be concluded that sample TS-0 is the most suitable for the thermal insulation material.

3.3. Thermal conductivity

The thermal conductivity coefficient is the most important characteristic that is usually taken into account when choosing a thermal insulation material. The thermal conductivity coefficient λ , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, of a thermal insulation material is determined in the range from 0°C to $+30^\circ\text{C}$, but Fig. 3.7 provides a summary of the results obtained according to the LVS ISO 8301:2001 standard, at $+10^\circ\text{C}$. It is known that as the measurement temperature increases, the thermal conductivity coefficient also increases, so it worsens, accelerating convection and increasing λ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Based on knowledge about the structure and properties of the material, materials of different densities of the same type of processing were selected, and a search for the optimal density was carried out.

Comparing the thermal conductivity results of the control sample KS-k/100 with the SE-treated samples to a greater extent, it is clearly seen (Fig. 3.7) that

SE treatment has significantly improved (decreased) the thermal conductivity coefficient λ .

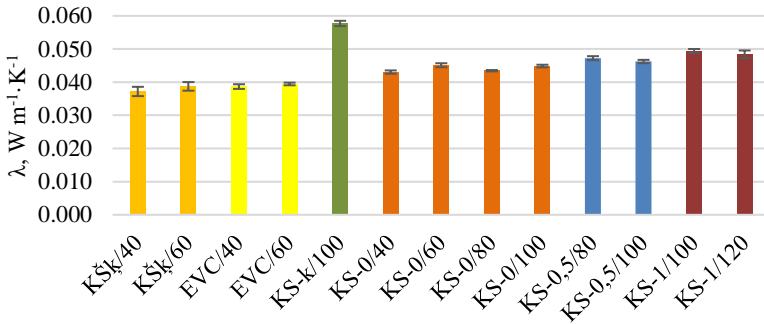


Fig. 3.7. Thermal conductivity of raw and steam-exploded hemp shive samples compared to industrial thermal insulation materials

In order to assess how great the reduction in lambda was, its reduction was calculated compared to the control sample and expressed as a percentage. KS-0/40 – 25.4%, KS-0/60 – 21.8%, KS-0/80 – 25.5%, KS-100 – 22.3%, which also clearly shows that the processing mode at zero time is more efficient compared to 0.5-min or 1-min cycles, respectively KS-0.5/80 – 18.1%, KS-0.5/100 – 19.9.% and KS-1/100 – 4.4%.

It can be seen that the optimal density of the material can be found among the samples subjected to SE treatment for 0 min., since when the treatment time is increased to 0.5 min., for example, KS-0.5/80, the thermal conductivity coefficient increases significantly, reaching $0.047 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. It is statistically significantly higher than the sample KS-0/100, which has a value of $0.045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ($p=0.046$). The optimal density for loose-fill hemp thermal insulation materials ranges from 40 to 80 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, since within these limits the results are very similar – there is no statistically significant difference between them ($p=0.226$ and $p=0.135$). Comparing the hemp material KS-0/40 with wood fibre or eco-wool thermal insulation materials on the market with a similar density, it can be concluded that the differences in their thermal conductivity coefficient do not exceed 10%, so they can be considered similar materials both in terms of properties and structure.

It is common knowledge that the best insulator is still air, but it must be at rest. The amount of air in the insulation material is of fundamental importance. If the material has too large pores, the amount of air increases and the air begins to move faster inside, worsening the thermal insulation properties. Each material has its optimal density when it has the lowest thermal conductivity and the highest thermal resistance. Free air pores directly affect the density of the material. In natural fibrous insulation materials, air is found not only in the space

between the fibres but also in the lumen of the fibre itself, where the air is practically motionless. Among materials of natural origin, the best performance is achieved by materials such as wood, straw and hemp shives, which have a heterogeneous structure. This property is called anisotropy.

When analysing the thermal conductivity of the developed samples of fibrous material, the best performance was shown by samples with an SE treatment time of 0 min. This is explained by the greatest defibering of samples and at the same time the least destruction of them, ensuring the samples' scarification. Fibre fibrillation is presented in Fig. 3.1, showing a photo-visualisation of the developed samples. However, the justification is seen in 3.5 SEM images. This phenomenon is schematically represented in Fig. 3.2. The scarification of the sample also provides the least bulk density (Fig. 3.4).

Primarily, fibre scarification occurs due to the breaking of hydrogen bonds within the fibre, partially releasing the cellulose fibrils. Fibre bundles are opened and bonds between cellulose, lignin and hemicelluloses are partially broken.

The materials developed in the study are materials with a convective porous structure with open pores and conduct moisture and air well. In order for such materials to function properly and for the λ coefficient to remain unchanged, they must be incorporated into structures with windproof barriers, protecting them from the effects of moisture, as well as from the effects of water vapour coming from inside the room. Thermal conductivity is directly affected by the humidity, density and ambient temperature of the material.

Summary of subsection 3.3: The KS-0 mode of SE treatment statistically significantly ($p=0.0001$ and $p=0.0002$) reduces (improves) the thermal conductivity coefficient compared to the coefficient of the control sample KS-k/100 by $0.058 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. The reduction ranges from 21.8% to 25.5% depending on the density. The most suitable thermal insulation material, when analysing the SE treatment, is KS-0 with a density of $40\text{--}80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, when the thermal conductivity value is not statistically significantly different. The incorporation density of the sample should be chosen according to the design, incorporation possibilities, and taking into account the settlement of the sample. The material is equivalent to other fibre thermal insulation materials of natural origin.

3.4. Thermal inertia

The dependence of the thermal inertia of materials on the type of material can be seen in Fig. 3.8. Using thermal inertia simulation equipment developed by the author, a graph was obtained that shows the temperature passed through the insulating material over a certain period of time (heat diffusion).

For mineral wool and glass wool samples, heating occurred for 12–13 min, i.e., the temperature gauge placed on the other side of the material reached $70 \text{ }^\circ\text{C}$

within 12–13 min. The mentioned temperature of 70 °C is the maximum of the measuring devices of the particular equipment. After turning off the radiation, the mineral and glass wool materials continued to transfer heat for an average of 20 and 19 min, respectively, until they cooled down again to 70 °C. After that, the temperature dropped quite rapidly (30–60 min after the measurement) from 70 °C to 31 °C and 32 °C.

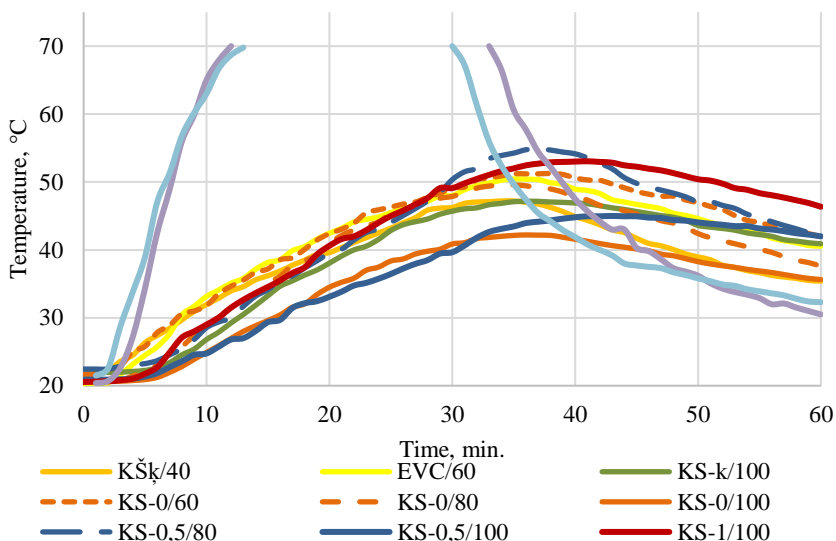


Fig. 3.8. Thermal inertia of raw and steam-exploded hemp shive samples as compared to industrial thermal insulation materials

The results show a significant advantage of materials of natural origin over stone and mineral wool insulation materials. This can be explained by the different properties and structure of the material. Natural materials consist of intercellular space, cellular cavities or gaps filled with air and water, and in insulation materials made of stone and mineral wool, the fibre is like a monolithic thread.

When measuring materials made from biological raw materials, the maximum temperature of 70 °C on the other side of the material was not reached during the experiment. To achieve slower thermal diffusion, it is important to directly increase the density of the material. The direct effect of material density on thermal inertia was observed through measurements using equipment developed by the author. A significant effect of SE regimes on thermal inertia was observed for the materials of hemp shives in the solar radiation simulator. For example, KS-1/100, which has been destroyed the most during SE treatment, has a higher thermal inertia than materials of the same density that have been

processed more lightly, such as KS-0/100 and KS-0.5/100, which do not differ significantly in thermal inertia compared to each other. The thermal inertia curve of the KS-k/100 sample, which serves as the baseline for raw hemp material, lies approximately in the middle between KS-0/100, KS-0.5/100 and KS-1/100. The SE treatment statistically significantly reduces the thermal inertia of KS-0/100 sample compared to the control sample ($p=0.004$). Further SE processing adversely affects the thermal inertia values, as the sample KS-0.5/100 no longer has a statistically significant difference with the control sample KS-k/100 ($p=0.13$), and with the continuation of SE, the thermal inertia values of the sample KS-1/100 are statistically significantly higher (worse) than for the control sample KS-k/100 ($p=0.33$).

Summary of subsection 3.4: Materials with a similar density and heat capacity index C_p show similar thermal inertia values. By increasing the density of the material, thermal inertia can be reduced. Materials of natural origin have significantly slower heat transfer, which is also shown by the solar radiation exposure simulator. The thermal diffusion coefficient for the developed material is $2.4\text{--}4.2\text{ m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot 10^{-1}$, compared to $14.8\text{ m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot 10^{-1}$ for thermal insulation materials of organic origin. SE treatment with the most realistic thermochemical phase increases the heat capacity of the material and slows down the thermal inertia.

3.5. Fire reaction test using the Cone Calorimeter test

The author's intention was to establish the fact of combustion and create an overview of the combustion development of the developed hemp material by analysing the maximum combustion power HRR_{max} , heat release THR and ignition time TI and comparing them with the loose-fill insulation materials already used in practice. Although all SE-treated materials have a similar composition, the evaluation involved searching for and analysing the chemical properties and differences of each material.

During his research within the framework of the Thesis, the author compares the developed material with wood fibre and cellulose thermal insulation material, in which the embedded tetraborate acts as a fire retardant that does not propagate combustion. The ignition time of all (except KS-0/80 and KS-0/100) developed hemp heat insulation samples without fire retardants is statistically significantly higher ($p=0.00058\text{--}0.013$) than that of commercially available cellulose and wood fibre insulation (Fig. 3.9). When fire retardants are added, the statistically significant difference increases ($p=0.00015\text{--}0.047$). The author of the study observed that the ignition of cellulose and wood fibre samples lasted for 2–3 seconds, after which the fire went out. The action of high temperature and the addition of fire retardants create an environment in which cellulose fibre does not ignite, but chars at a temperature of 90–95 °C, without emitting toxic gases

(wooden elements ignite at 200 °C, and metal ones begin to lose their properties at 300 °C). The carbon layer has excellent heat-insulating properties and protects against overheating.

Cellulose insulation differs significantly from the material created by the author, since it is one type of fibre, homogeneous, and produced in a hammer mill; the same applies to a sample of wood fibre insulation obtained in a fiberiser with certain parameters of fibre length and width. The material created by the author consists of heterogeneous fibres and bundles of fibres, and therefore differs significantly from a similar material in both chemical and physical properties.

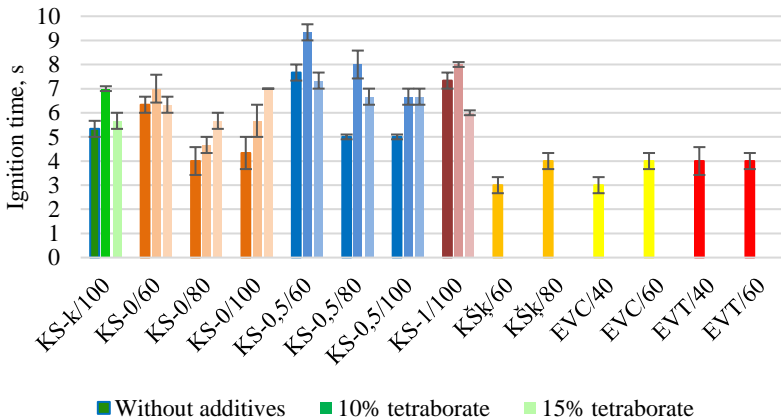


Fig. 3.9. Ignition time of untreated and steam-explosion treated hemp straw shives at different densities

Analysis of the results obtained in Fig. 3.10 allows the conclusion to be made that a 10% fire retardant additive statistically significantly ($p=0.004-0.039$) reduced the total heat release in all groups of samples by 4–7 MJ·m⁻², which makes 20–30% as compared to samples without the addition of fire retardants. The total heat release has decreased in the materials after all treatments and at all densities proportionally, and the effect of density on the results can be seen as well. There is a tendency for heat release to decrease as density increases, with less influence of chemical properties on fire response. However, based on the calculations, increasing density does not have a statistically significant effect ($p=0.2-0.79$). Increasing the amount of fire retardant additive from 10% to 15% does not have a significant effect ($p > 0.05$) on the total amount of heat release in the THR of the samples. When fire retardants are added to the developed thermal insulation materials in the amount of at least 10%, the amount of total heat generated in all data sets is not statistically significantly different from the industrially used wood fibre thermal insulation material ($p=0.3-0.5$). For the

sample KS-0/100, the total amount of released heat does not statistically significantly differ from the EVT samples (0.08–0.5).

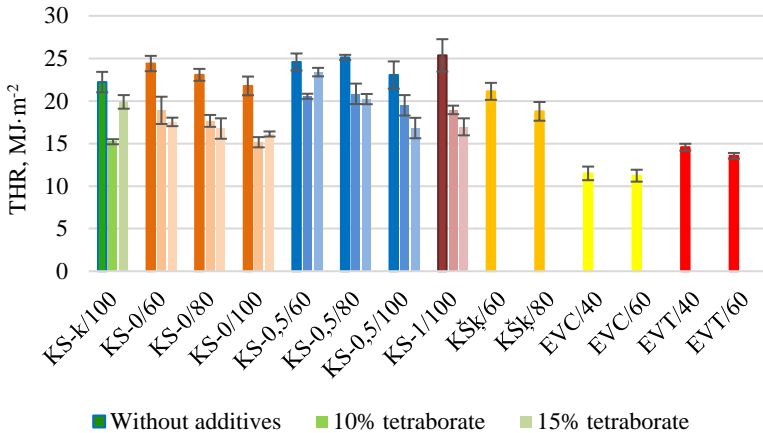


Fig. 3.10. Total heat release (THR) per unit area in 300 seconds for untreated and steam-exploded hemp shive samples with 10 and 15% fire retardant additive

The fire retardant additive added to the samples has a very different effect on the combustion power (see Fig. 3.11). For control samples, the addition of tetraborate reduces the combustion power to a lesser extent (by 6–13%), which is not statistically significant ($p=0.2$) than for samples treated with SE. The addition of a fire retardant to samples treated with SE statistically significantly ($p=0.00001-0.048$) reduces the maximum burning capacity by 12–40% when adding 10% fire retardant and by 15–50% when adding 15% fire retardant. When comparing treated and untreated hemp shive materials with industrially produced samples, the fire retardant properties are lower (with the exception of wood fibre insulation material, where $p=0.09-0.75$), but, as the Doctoral Thesis research shows, they can be improved. The ignition of the eco-wool insulation material is faster than any of the untreated and SE-treated hemp shive and wood fibre samples, but the overall heat release is lowest. As a result, a significant difference was observed – the eco-wool caught fire, and after some time the flame went out, but the materials developed by the author ignited and burnt, and the flame decreased until the material was completely burnt inside the conical calorimeter. The results were influenced by a problem that could not be solved during the entire study – the uniformity of fire retardant application. The fire retardant was a powdered substance that was mixed with the mass of material in appropriate proportions prior to being placed in the equipment.

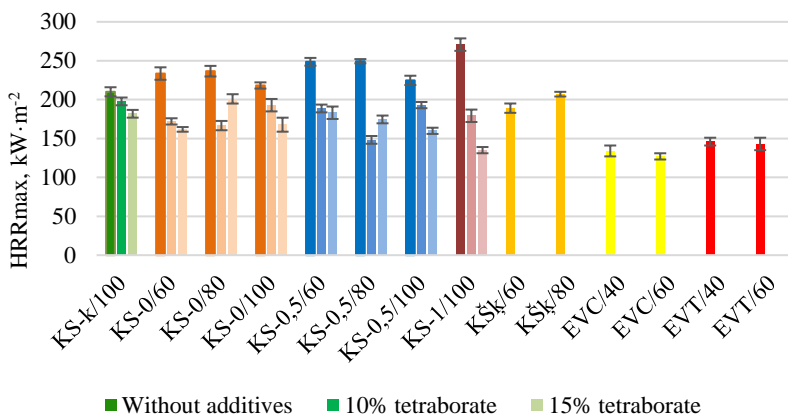


Fig. 3.11. **Maximum burning capacity (HRR_{max}) per unit area for untreated and steam-explosion hemp shive samples with 10 and 15% fire retardant additive**

3.5. Summary of subsection When considering the developed material without fire retardant additives, there is no clear dependence on the ignition time, as well as a noticeable relationship between density and ignition time. THR results show the influence of SE on the heat release. As the density increased, the THR value decreased. The HRR value is not affected by the SE treatment; it decreases with increasing sample density. The only different sample is KS-1/100, the different fire reaction characteristics of which can be explained by significant changes in the chemical composition.

The addition of 10% fire retardant to the developed material showed a significant positive effect on the fire reaction properties, but no correlation with ignition time was observed. 10% fire retardant additive reduces the THR by 4–7 MJ·m⁻² (by 20–30% compared to the material without additives). HRR reduction is 12–40% depending on the density and SE processing mode.

The fire reaction properties of the materials were also determined for the thermal insulation materials widely used at the market, which were compared with the developed thermal insulation material. All tested samples have been found to have very similar characteristics corresponding to EUROCLASS E based on the European Reaction to Fire Classification System. Further research using flame tests is important to be able to state this with certainty.

The factors or conditions discovered in the study and influencing the fire reaction.

Testing of bulk materials is a particularly complex process since each material differs in volume, fibrous structure, fineness of the fibres and fractional composition, which in turn affects the obtained fire resistance result. The application of tetraborate is different for each type of material and can

significantly affect the uniformity of application of the substance to the fibre surface. When incorporating bulk material into the test unit, it is difficult to incorporate the material evenly; a fluffy surface or microfibrils may form, and care should be taken to smooth them out as their presence can significantly affect ignition. The sample weight for bulk materials is of low mass, in this case, 21–50 g, which is the minimum limit for the weighing equipment. The material developed during the Doctoral Thesis research is intended for incorporation into the structures, so it is necessary to pay special attention to the technology of introducing fire retardants into loose-fill fibrous thermal insulation materials.

4. SUMMARY OF THE ECONOMIC EVALUATION

The full document of the technological and economic feasibility study can be viewed in the appendix of the thesis. The economic evaluation has been developed on the basis of a full-size production plant.

The **aim** of the TEP “Commercialisation of technique for the production of lignocellulose loose-fill thermal insulation material” was to assess and analyse the introduction of a potential new product (lignocellulosic loose-fill thermal insulation material) and a potential new technology (technique for obtaining lignocellulose loose-fill thermal insulation material using the SE method) with the aim of objectively and rationally identifying a new product and the advantages, disadvantages, opportunities and threats of the technology, as well as the resources necessary for commercialisation and implementation prospects.

The **tasks** of the technical and economic feasibility study were:

1. To perform the analysis of the new product.
2. To perform the analysis of analogical product markets and potential sales markets.
3. To analyse the measures for the protection of intellectual property rights.
4. To analyse previous and planned co-operation with other research organisations and merchants.
5. To perform the cost-benefit analysis of product commercialisation.

The technical and economic feasibility study was performed in accordance with the definition of Paragraph 87, Article 2 of EC Regulation No. 651/2014, as well as in accordance with Cabinet Regulation No. 692, adopted on 25 October 2016. Regulation for the Implementation of Activity 1.2.1.2 “Support for Improvement of the Technology Transfer System” of Specific Support Objective 1.2.1 “To increase investments of the private sector in R&D” of the Operational Programme “Growth and Employment”.

The potentially new product (lignocellulose loose-fill thermal insulation material) and potentially new technology (technology for obtaining lignocellulose loose-fill thermal insulation material using the SE method) are analysed within the document and **conform to two specialisation areas of**

RIS3 – Smart materials, technologies and engineering systems and knowledge-intensive bio-economy. Thus, the study of the technology of obtaining lignocellulose loose-fill thermal insulation material is an interdisciplinary study. The introduction of lignocellulosic loose-fill thermal insulation material in the manufacturing processes of the Latvian economy shall stimulate the international competitiveness of Latvian merchants and their entry into new foreign markets.

The product and technology is of a high novelty level – currently, there is no thermal insulation material that is obtained using the SE technology available on the market. The high novelty of the product is confirmed by the obtained samples and scientific publications.

The product – lignocellulose loose-fill thermal insulation material – has been developed and the technology has been validated in an artificial (laboratory) environment. A sample of thermal insulation material has been obtained in small quantities in laboratory conditions using a 0.5 l SE device. In the commercialisation study, products up to the TRL6 level have been developed – a pilot batch of thermal insulation material has been produced, testing the technology at the pilot plant level and checking the properties of the product in a real operating environment (wooden frame houses).

The product corresponds to the direction of economic transformation “Sectors of future growth, where products of high added value and services exist or may emerge”, Priority 2 “Constant search for new products/services, within which it is required to create an effective identification system capable of finding and providing support to create new products within existing and cross-sectoral industries, as well as to create new sectors with high potential of growth”.

As a result of the technical and economic feasibility study, it is **concluded** that lignocellulose loose-fill thermal insulation material is a **product with high commercialisation potential**. Lignocellulosic loose-fill thermal insulation material is a natural material made from renewable natural resources and industrial by-products, harmless to human health. There are no significant obstacles to the commercialisation of the product. The commercialised product (lignocellulose loose-fill thermal insulation material) **can play an important role in expanding fast-growing markets, therefore it has a particularly high potential for investment**.

CONCLUSIONS

1. An innovative fiber extraction technology, which cannot be implemented with traditional fiberization methods, has been developed for obtaining loose-fill fiber thermal insulation material from hemp shives with the SE method.
2. The optimal treatment parameters of the SE method for obtaining loose-fill thermal insulation material are: $T=235\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{max}}=32\text{ Bar}$, with release immediately after reaching the pressure and temperature, i.e. holding time $\tau=0\text{ min}$ (KS-0).
3. In the developed SE method technology, the most important thing is the adiabatic process (second phase – explosion), which fragments the sample, maximally shortening the thermochemical process (first phase).
4. Parameters of loose-fill thermal insulating material sample obtained from hemp shives KS-0 under optimal conditions of SE treatment:
 - ✓ the bulk density decreases 2.3 times (compared to the control sample - raw hemp straws) to $43.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
 - ✓ mass loss - 2.4%,
 - ✓ the smallest volume of the fine fraction (10%),
 - ✓ thermal diffusivity ($2.4\text{--}4.2\text{ }\alpha\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot 10^{-1}$)
 - ✓ thermal conductivity $0.043\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (25% lower compared to control sample - raw hemp seeds)
5. The thermal conductivity coefficient λ of the loose-fill material obtained by SE treatment with a density of 40 to $80\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ is equal to the analogs of thermal insulation materials on the market.
6. The effect of SE treatment parameters is insignificant on the loose-fill thermal insulation material's fire response and sound insulation properties.
7. Increasing the density (up to $100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) of hemp shives loose-fill thermal insulation material obtained under optimal SE treatment conditions significantly worsens its thermal inertia and fire reaction results.
8. In the optimal SE treatment conditions, the density of the obtained hemp shives loose-fill thermal insulation material in the range of 40 to $100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ has no significant effect on thermal conductivity and sound insulation properties.
9. An economic assessment showed that lignocellulosic loose-fill thermal insulation materials made from hemp shives are competitive not only in the niche building materials market but also in the consumer market, given their low production costs and good thermal conductivity. In terms of price and quality, the developed loose-fill thermal insulation material even competes with mineral wool, but, unlike mineral wool, it is a product of natural origin.

Based on the results obtained and the conclusions drawn, it can be claimed that the goal of the Doctoral Thesis has been achieved, and the proposed hypothesis – it is possible to obtain a loose-fill thermal insulation material with equivalent or better thermal insulation properties than similar commercially available thermal insulation materials from the by-products of hemp fibre production, hemp shives, using a SE method – is proven.

RECOMMENDATIONS

1. In order to ensure a fire reaction class similar to analogues on the market, it is necessary to use at least 10% fire retardant (tetraborate). It is important to pay attention to the development of high-quality fire retardants.
2. Considering the high heat capacity and low thermal inertia values of the developed thermal insulation material, the material can be successfully used in roof and external wall structures in hot climates.
3. When using the developed thermal insulation material in cold climates, it is recommended to use vapour diffusion membranes and ventilated facades.
4. In accordance with the Latvian Construction Standards for the thermal engineering of enclosing structures, the minimum thickness of the wall structure is 190 mm.
5. Depending on the application – wall, roof or horizontal structures – the recommended installation density is within 60–80 kg m⁻³.