

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Dizaina tehnoloģiju institūts

Zane Zelča

**KANĒPJU BĀZES KOMPOZĪTU SORTIMENTA
PAPLAŠINĀŠANA UN TEHNOLOĢIJU
OPTIMIZĀCIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
profesore *Dr. habil. sc. ing.*
SILVIJA KUKLE

asoc. profesors *Dr. sc. ing.*
JĀNIS KAJAKS

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Zelča, Z. Kaņepju bāzes kompozītu sortimenta paplašināšana un tehnoloģiju optimizācija. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 32 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “P-11” 2019. gada 21. februāra lēmumu, protokols Nr. 1.

Vāka attēls Inga Zotova

Paldies Vernerā fon Siemensa stipendijas un doktorantūras pētniecības grantu finansiālajam atbalstam!

ISBN 978-9934-22-272-6 (print)
978-9934-22-273-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 26. aprīlī Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Kļipsalas ielā 6, 117. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Uldis Spulle,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Rimvydas Milasius,
Kauņas Tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. sc. ing.* Remo Merijs Meri,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vārds Uzvārds (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 121 attēls, 29 tabulas, kopā 163 lappuses. Literatūras sarakstā ir 189 nosaukumi.

SATURS

Izmantotie apzīmējumi un saīsinājumi.....	5
1. Darba vispārējs raksturojums	6
1.1. Tēmas aktualitāte.....	6
1.2. Promocijas darba mērķis	6
1.3. Promocijas darba uzdevumi	6
1.4. Promocijas darba zinātniskās novitātes	7
1.5. Aizstāvamās tēzes	7
1.6. Promocijas darba praktiskā vērtība	7
1.7. Darba aprobācija	8
2. Darba saturs.....	11
2.1. Situācijas analīze	11
2.2. Metodiskā daļa	12
2.2.1. Kompozītu komponentes.....	12
2.2.2. Armējošo komponentu apstrādes metodes	13
2.2.3. Kompozītu izgatavošana	14
2.2.4. Paraugu testēšanas metodika	18
2.3. Rezultāti un to izvērtējums.....	20
2.3.1. Kompozītu armējošo komponentu īpašību izpēte.....	20
2.3.2. Kaņepēm armētu kompozītu īpašības	22
2.3.3. Kompozītu virsmas un novecošanās pētījumi	25
Secinājumi	29
Priekšlikumi un ierosinājumi	30
Izmantotā literatūra	31

IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN SAĪSINĀJUMI

A – kaņepju šķirnes ‘Bialobrzieskie’ pirmreizējās pārstrādes atlikumi
 a^* , b^* – krāsu vektoru koordinātes *CIELab-76* krāsu telpā
AAK – ar atlikumiem armēts kompozīts
APTES – aminopropiltrietilortoksilāns (*γ -aminopropyltrialkoxysilane*)
ASM – atomspēku mikroskopija
C – krāsas piesātinājums
 d – diametrs
D – determinācijas koeficients
DŠK – dabiskas šķiedras saturoši kompozīti
EDS (*EDX*) – enerģijas dispersīvā rentgenstaru spektroskopija
Ek – ekstrudēts kompozīts
 E_{st} – elastības modulis stiepē, MPa
 ϵ_{st} – relatīvais pagarinājums jeb sagraušanas pagarinājums pie maksimālā sprieguma, %
FTIR – Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopija
GU – spīduma vienības
H – krāsas tonis
KI – kausējuma indekss, g/(10 min)
 L^* – krāsas gaišuma pakāpe
LZBPE – lineārs zema blīvuma polietilēns
MAPE – ar maleīnskābes anhidrīdu modificēts polietilēns
mas. % – procentuālais masas apjoms
R – korelācijas koeficients
RMS – vidējais kvadrātiskais laukuma raupjums no vidējā viļņa garuma
SEM – skenējošā elektronu mikroskopija
Si – silanizēta armējošā komponente
Sol – armējošā komponente, apstrādāta ar sola-gēla metodi
Š – kaņepju šķirnes ‘Bialobrzieskie’ tehniskās šķiedras
ŠAK – ar šķiedrām armēts kompozīts
TEOS – tetraetilortoksilāns
V – valcēts kompozīts
VM – *Vicker* virsmas mikrocietība, MPa
 Δa^* , Δb^* – vidējās krāsu vektoru koordinātes
 ΔC – krāsas piesātinājuma atšķirība
 ΔE – krāsu atšķirība
 ΔH – krāsas toņa izmaiņas
 ΔL – krāsu gaišuma atšķirība
 ρ – blīvums, g/cm³
 σ_{st} – stiepes stiprība jeb maksimālais sagraušanas spriegums, MPa
ZAD – cinka acetāta dihidrāts

1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Pieaugot dažādu kompozītu ražošanas apjomiem pasaulē un samazinoties fosilajiem resursiem, pastiprināti tiek meklētas metodes un radīti jauni materiāli, kas varētu uzlabot jau esošo materiālu īpašības vai aizstāt tos ar bioloģiskiem, dabai draudzīgiem ekokompozītiem, ko var reciklēt un izmantot atkārtoti, reizē taupot arī izejvielu resursus. Augsta blīvuma polietilēns un polipropilēns ir poliolefini ar daudzveidīgu lietojumu, termoplastiskās matricas viegli var pārstrādāt atkārtoti un izgatavot dažādus kompozītus. Darbam izvēlēts lineārs zema blīvuma polietilēns, tā galvenā priekšrocība ir regulāra struktūra un liela elastība, ko veiksmīgi var izmantot, palielinot dabisku šķiedru saturu kompozītā, tādējādi uzlabojot gan kompozīta īpašības, gan samazinot polietilēna patēriņu un materiāla cenu. Kā armējošā komponente izvēlētas kaņepju šķiedras un stiebru pirmreizējās apstrādes atlikumi. Kaņepju audzēšana Latvijā pamazām attīstās, līdz ar to apstrādes atlikumu apjoms nākotnē palielināsies. Pateicoties piemērotām audzēšanas un ievākšanas metodēm, kaņepēm ir augstas mehāniskās īpašības. Industriāla šķiedru kaņepju audzēšana un izmantošana spēj dot lielu ieguldījumu Latvijas dabisko resursu papildināšanā un jaunu uzņēmējdarbības jomu attīstībā, jo kaņepes ir ātraudzīga kultūra, augšanas procesā tai nav vajadzīgs liels ķīmisko vielu daudzums. Kaņepju pirmreizējās apstrādes un tekstilapstrādes procesos radušos kaņepju atlikumu izmantošana dabas šķiedru kompozītu izgatavošanai ievērojami ietaupa fosilos resursus, un izveidotais dabisku šķiedru saturošs kompozīts ir daļēji bioloģiski noārdāms videi draudzīgs materiāls.

1.2. Promocijas darba mērķis

1. Paplašināt dabas šķiedrām armētu polimēru kompozītu sortimentu, integrējot kaņepju šķiedras un stiebru pirmreizējās pārstrādes atlikumus lineāra zema blīvuma polietilēna matricā kompozītu izstrādei ar samazinātu ūdens absorbciju un paredzamajiem lietojumiem atbilstošām mehāniskām īpašībām.
2. Pielāgot armējošajām kaņepju komponentēm ķīmiskās apstrādes, kas veicina polimēra matricas un armējošo komponentu adhēziju un pārklājuma noturību.

1.3. Promocijas darba uzdevumi

1. Publicēto literatūras avotu atlase un analīze par dabisku augu valsts izcelsmes šķiedru (kaņepes, lini u. c.) saturošiem kompozītiem un to īpašībām.
2. Dabisku šķiedru virsmas modificēšanas paņēmieni apskats, to analīze un piemērotu uznešanas tehnoloģiju izvēle.
3. Izvēlēto dabisku šķiedru virsmas modifikācijas metožu optimizācija.
4. Kaņepju šķiedru atlikumu modificēšana un pārklājumu īpašību izvērtēšana.
5. Kvalitatīvāko modificēto kaņepju atlikumiem armēto kompozītu izgatavošana.

6. Iegūto kompozītu īpašību testēšana un analīze, ieguves tehnoloģiju pilnveidošana.
7. Izpētīto kompozītu iespējamo lietojumu prognozēšana un otrreizējās pārstrādes iespēju apzināšana.

1.4. Promocijas darba zinātniskās novitātes

Darbā izpētīta Latvijā audzētu kaņepju ‘Bialobrzieskie’ šķirnes šķiedras un to stiebru pirmreizējās apstrādes atlikumu ķīmiskās apstrādes ietekme uz kaņepju īpašībām un modificētās kaņepju šķiedras saturošu lineāra zema blīvuma polietilēna kompozītu ekspluatācijas īpašībām. Pētījuma rezultātā pierādīta iespēja palielināt kaņepju šķiedru saturu kompozītā, vienlaikus uzlabojot kompozīta fizikālos un mehāniskos rādītājus, ievērojami samazinot materiāla ūdens absorbcijas spēju un saglabājot pietiekami labas reoloģiskās īpašības, kas dod iespēju kompozītus pārstrādāt ar tradicionālajām polimēru pārstrādes metodēm (ekstrūzija, spiedlēšana u. c.). Pielāgotie soli nodrošina kvalitatīvu kaņepju virsmas modificēšanu.

1.5. Aizstāvamās tēzes

1. Pētījumā parādīts, ka sola-gēla tehnoloģijas izmantošana kaņepju šķiedru virsmas īpašību modificēšanai nodrošina uz LZBPE veidota kompozīta īpašību uzlabošanu. Ir iespējams palielināt modificēto šķiedru atlikumu saturu kompozītā, vienlaikus kompozīta kausējumam saglabājot pietiekami labu tecētspēju un ļaujot optimizēt kompozīta izgatavošanas parametrus.
2. Ar optimāla sastāva solu ir iegūts vienmērīgs pārklājums, kura vidē un fiksācijas procesā netiek bojāti kaņepju atlikumi. Sintezētos solus ir iespējams modificēt ar mērķi piešķirt vēlamās īpašības gan šķiedru atlikumiem, gan dabas šķiedru kompozītiem kopumā.
3. Modificētie kaņepju šķiedru atlikumi ir integrējami termoplastisku polimēru kompozītos, tiem ir pietiekami laba mehāniskā izturība un samazināta ūdens absorbcija, kas atļauj prognozēt plašāku materiālu lietojumu.

1.6. Promocijas darba praktiskā vērtība

Latvijā iegūtām kaņepju šķiedrām ir labas īpašības, jo šeit to audzēšanai ir piemēroti laika apstākļi un iegūtā raža ir pietiekami laba, taču nav sakārtots posms audzētājs-kaņepju šķiedru ražotne. Eksportēšana uz citām valstīm nav ekonomiski izdevīga, tāpēc kvalitatīvu šķiedrmateriālu izgatavošana uz vietas veicinātu nozares ekonomisko attīstību un neradītu lielu apdraudējumu dabai. Atlikumu izmantošana jauna kompozīta ražošanai ekonomē resursus un risina atkritumu likvidēšanas problēmu atbilstoši aprites ekonomikas vadlīnijām.

Promocijas darba izpildes gaitā ir radīti kompozīti uz kaņepju un LZBPE bāzes, kuru sastāvā integrētām komponentēm ir palielināta adhezīvā aktivitāte. Tas ļauj papildināt gan praktiskās zināšanas, gan uzlabot kompozīta tehnoloģiskās un lietošanas īpašības, kā arī ievērojami paplašināt iespējamo materiāla izmantošanas spektru.

Uzlaboto kompozītu kausējuma tecētspējas īpašības ļauj to pārstrādei izmantot tradicionālās polimēru pārstrādes metodes (ekstrūzija, spiedliešana, valcēšana, presēšana u. c.). Parasti augsti pildītu dabas šķiedru kompozītu pārstrāde izstrādājumos ir apgrūtināta, jo, ievadot polimēra matricā šķiedrveida armējošās komponentes, strauji samazinās kompozītu tecētspēja – kausējuma indekss. Iegūtos dabas šķiedru kompozītus var izmantot ierobežotu slodzi nesošu konstrukciju detaļu un citu izstrādājumu ražošanai, piemēram, automašīnu durvju paneļos, auto bamperos, dažādu iekārtu korpusos, iepakojumos un citās jomās, kur plaši izmanto polietilēnus.

1.7. Darba aprobācija

Raksti zinātniskajos žurnālos

1. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J., Kirilovs, E. Effect of Fiber Surface Morphology on Water Sorption of Pre-treated Hemp Fiber Reinforced LLDPE Composites. *Materials Science. Textile and Clothing Technology*. – 2014. – Vol. 9. – pp. 17.–21. ISSN 1691-3132. e-ISSN 2255-8888.
2. Kajaks, J., Zelča, Z., Kukle, S. The Effect of Modification Methods on Performance Characteristics of Composites based on Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) and Natural – Hemp Fibres. *Mechanics of Composite Materials*. – 2015. – Vol. 51., Iss. 5. – pp. 955–964. ISSN 0191-5665. e-ISSN 1573-8922.*
3. Kajaks, J., Zelča, Z., Kukle, S. Влияние способов модифицирования на эксплуатационные свойства композитов на основе линейного полиэтилена низкой плотности и натурального волокна конопли. *Механика композитных материалов*, -2015. – Т. 51., N. 5., сmp. 677.–682. ISSN 0203-1272.
4. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. Short Natural Fibers Reinforced Polyolefin Composites. *Materials Science. Textile and Clothing Technology*. – 2016. – Vol. 11. – pp. 6.–11. ISSN 1691-3132. e-ISSN 2255-8888.
5. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J., Ručevska, I., Vihodceva, S. Properties of Composites Based on Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) and by Sol-gel Method Modified Fibres. *Journal of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 111., No. 1, – ID 012012. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X.*
6. Kukle, S., Vidzickis, R., Zelča, Z., Beļakova, D., Kajaks, J. Influence of Hemp Fibers Pre-processing on Low Density Polyethylene Matrix Composites Properties. *Journal of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 123., Iss. 1., – pp. 1.–6. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X.*
7. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J., Geikina-Geimane, M. Hemp Fibers Waste and Linear Low Density Polyethylene Composite Properties. *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 721. – pp. 33.–37. ISSN 1662-9795.*
8. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. Hemp Fibres Modification by sol-gel Method for Polyolefin Composite Filling. *Procedia Engineering, Elsevier*. – 2017. – pp. 26.–32. ISSN 1877-7058.*

9. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. LLDPE and Natural Fiber Composites Characterization using AFM. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 251. – pp. 1.–8.*
10. Zelča, Z., Vihodceva, S., Kukle, S. Sol-Gel Coating Processing Optimisation for Natural Fibers. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 66., pp. 467.–472. ISSN 1736-6046. e-ISSN 1736-7530.*

Raksti zinātnisko rakstu krājumos

1. Kukle, S., Beļakova, D., Zelča, Z., Kajaks, J. Biobased Hemp Fibers Reinforced Composite. // Proceedings of the 2nd International Conference on Natural Fibres – From Nature to Market, Portugal, Acores, San Miguel, Ponta Delgada, 27.–29. april, 2015. São Miguel, Azores: Universidade do Minho, 2015, pp. 1.–11. ISBN 978-989-98468-4-5.
2. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J., Jēgina, S. Effects of Hemp Fibres Pre-Processing on Linear Low Density Polyethylene Matrix Composite Mechanical Properties. // 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues: Proceedings of CYSENI, Lithuania, Kaunas, 26.–27. may, 2016. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 2016, pp. 201.–208.
3. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. The Hemp Primary Processing Waste and Linear Low Density Polyethylene Composite. // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, Vienna GREEN Extended Scientific Sessions: SGEM 2016 Conference Proceedings, Austria, Vienna, 2.–5. november, 2016. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2016, pp. 55.–60. ISBN 978-619-7105-82-7. ISSN 1314-2704.**
4. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. Statistical Analysis of Chemically Treated Hemp Fibre Waste Particle Size Distribution after Grinding. // 16th International Scientific Conference „Engineering for Rural Development”: Proceedings. Vol. 16., Latvia, Jelgava, 24.–26. maijs, 2017, pp. 48.–53. ISSN 1691-5976.**

Konferenču tēzes

1. Kukle, S., Zelča, Z., Kajaks, J. Influence of Hemp Fibers Pre-processing on Low Density Polyethylene Matrix Composites Properties. // 3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes: Book of Abstracts, Hungary, Miskolc-Lillafured, 6.–10. october, 2014. Igrici: IGREX Engineering Service Ltd., 2014, p. 89. ISBN 978-963-12-0334-9.
2. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. Effects of Hemp Fibers Pre-Processing and Content on Linear Low Density Polyethylene Matrix Composite Properties. // Baltic Polymer Symposium 2015: Programme and Proceedings, Latvia, Sigulda, 16.–18. september, 2015. Riga: RTU Press, 2015, p. 117.
3. Kukle, S., Beļakova, D., Zelča, Z., Kajaks, J. Biobased Hemp Fibers Reinforced Composite. // From Nature to Market: 2nd International Conference on Natural Fibers (ICNF 2015), Portugal, Azores, 27.–29. april, 2015. Azores: Universidade do Minho, 2015, p. 271. ISBN 978-989-98468-5-2.

4. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J., Geikina-Geimane, M. Effects of Hemp Fibers Waste Pre-Processing of Linear Low Density Polyethylene Matrix Composite Properties. // 25th International Baltic Conference of Engineering Materials & Tribology (Baltmattrib 2016): Abstract Book, Latvia, Riga, 3.–4. november, 2016. Riga: The Latvian Materials Research Society, 2016, p. 70. ISBN 978-9934-19-029-2.
5. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. Effects of Hemp Fibers Pre-Processing on Linear Low Density Polyethylene Matrix Composite Mechanical Properties. // International Conference of Young Scientists on Energy Issues: List of Accepted Abstracts, Lietuva, Kaunas, 26.–27. may, 2016. Kaunas: Lietuvos Energetikos Institutas, 2016, p. 31.
6. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. The Hemp Primary Processing Waste and Linear Low Density Polyethylenene Composite. // 16th International Multidizciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Abstract Book, Austria, Vienna, 2.–5. november, 2016. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2016, p. 4.
7. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. LLDPE and Natural Fiber Composites Characterization using AFM. // Abstracts, Latvia, Riga, 27.–29. september, 2017. Riga: RTU, 2017, p. 170.
8. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. Hemp Fibers Modification by Sol-Gel Method for Polyolefin Composite Filling. // 3rd International Conference on Natural Fibers „Advanced Materials for a Greener World”: Abstracts, Portugal, Braga, 21.–23. june, 2017. Braga: 2017, pp. 1.–2.
9. Zelča, Z., Vihodceva, S., Kukle, S. Sol-Gel Coating Processing Optimisation for Natural Fibers. // International Conference „Functional Materials and Nanotechnologies 2017”: Book of Abstracts, Igaunija, Tartu, 24.–27. april, 2017. Tartu: Institute of Physics, University of Tartu, 2017, p. 133. ISBN 978-9985-4-1030-1.
10. Zelča, Z., Kukle, S., Kajaks, J. Effect of Hemp Waste Surface Modification on the Morphological, Tensile Properties and Water Absorption of Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) Composites. // Baltic Polymer Symposium 2018: Programme and Proceedings, Latvia, Jurmala, 12.–14. september, 2018. Riga: 2018, p. 77.

* Zinātniskie raksti, kas indeksēti *Web of Science* un/vai *SCOPUS* datubāzē.

** Raksti rakstu krājumos ar ISBN numuru un indeksēti *Web of Science Conference Proceeding Citation Index* un/vai *SCOPUS*.

2. DARBA SATURS

2.1. Situācijas analīze

Augu valsts šķiedru saturošus kompozītus var iedalīt trīs grupās: pildīti, stiegroti un slāņaini kompozīti. Atkarībā no veida jāņem vērā, ka tiem ir atšķirīgs šķiedru sagatavošanas process, kompozīta izgatavošanas metodes un pārstrādes iespējas [1]. Kompozītu izgatavošanu ierobežo termiskās apstrādes temperatūra, kas nedrīkst ilgstoši pārsniegt 180–200 °C. Šis faktors samazina potenciālo polimēru izvēli, ko var izmantot kā matricas dabisku šķiedru pastiprinātos kompozītmateriālos [2], [3]. No naftas produktiem ražotu polimēru pieprasījums turpina pieaugt, bet ļoti liela interese un uzmanība tiek pievērsta arī biomateriāliem, pateicoties to mazākām ieguves izmaksām un iespējai saudzēt dabu. Dabiskām šķiedrām ir vairākas būtiskas priekšrocības – tās ir atjaunojams resurss ar nelielu blīvumu un salīdzinoši zemu cenu, viegli reciklējamās un biodegradējamās, ar labām termiskajām un akustiskajām īpašībām [4], [5].

Augu valsts šķiedras galvenokārt sastāv no celulozes, lignīna un hemicelulozes. Pat vienas sugas ietvaros kaņepju šķiedru ķīmiskais sastāvs atšķiras, to ietekmē gan augšanas vieta, gan mainīgie laika apstākļi un piemērotais agrotehniskais komplekss. Salīdzinot šķiedru un spaļu ķīmisko sastāvu, redzamas būtiskas atšķirības, spaļos ir uz pusi mazāk celuloze, bet vairāk ūdenī šķīstošo komponentu, kas ietekmē to īpašības, piemērotākās apstrādes metodes un izmantošanas iespējas. Kopējais šķiedru saturs kaņepju auga sausā stiebrā atkarībā no šķirnes ir robežās no 25–35 % [6], [7].

Kompozītos, kuros kā armējošās komponentes izmantotas īsas šķiedras, būtisks ir katrai matricai pielāgots šķiedru procentuālais saturs, šķiedru vai atlikumu garums un piemērotākā izgatavošanas metode. Kaņepju šķirnei nav īpaši lielas ietekmes uz LVBPE kompozīta mehāniskajām īpašībām, bet šķiedru garums gan tās ietekmē būtiski. Kaņepju šķiedru gadījumā optimālais šķiedru saturs LVBPE kompozītā ir 30 mas. %, bet izmantotās šķiedras garums ir līdz 1 mm [8]. Ārējā slodze tiek pārnests uz armējošajām komponentēm, pateicoties starpfāžu saistībai starp matricu un kaņepēm, stipra starpfāžu adhēzija garantē mehānisko īpašību pieaugumu.

Būtisks dabisku šķiedru trūkums ir tieksme piesaistīt ūdeni, tāpēc plaši izmanto dažādas ķīmiskās apstrādes, lai to samazinātu un piešķirtu arī citas papildīpašības. Atkarībā no paredzamā kompozīta lietošanas mērķa izmanto dažādas šķiedru priekšapstrādes vai to kombinācijas metodes – ķīmiska un mehāniska apstrāde, mikroorganismu ietekme u. c. Kaņepju šķiedru modificēšanai visbiežāk izmanto apstrādi ar sārmu, acetilēšanu, silanizēšanu, vai dažādu nanopārklājumu uznesanu. Avotos maz pētīta kompozītos integrējamo armējošo komponentu modifikācija, piemērojot sola-gēla tehnoloģiju [9], [10].

Sola-gēla metodes pielāgošana kaņepju šķiedrām ir priekšnosacījums kvalitatīva pārklājuma uznesanai, turklāt atšķirīgu augu sugas var būt jutīgākas pret izmantotā sola vides ķīmisko sastāvu. Kaņepju šķiedras neiztur tik skābu vidi kā kokvilnas šķiedras, jo satur mazāk celulozes [11].

Sola-gēla procesu ietekmē dažādu faktoru kopums: prekursora izvēle, $H_2O : Si$ attiecība, šķīdinātājs, sola pH, katalizatora veids, temperatūra u. c. Lai iegūtu nanodaļiņas robežās 1–4 nm, nepieciešams izmantot zemu temperatūru, kurā prekursora šķīdība ir lēna un pH tuvu 2 vai 7, lai nanodaļiņu augšana notiktu lēni. Polimerizācijas procesu skābā vidē ir vieglāk kontrolēt, jo daļiņu augšanas izmaiņas nenorit tik strauji kā bāziskā vidē [12].

Augu valsts lignocelulozes, šķiedrveida armējošās komponentes galvenokārt izmanto termoplastisku poliolefīnu matricu pastiprināšanai, jo termoplastiskos polimērus var pārstrādāt atkārtoti, tiem ir salīdzinoši zemas pārstrādes temperatūras un labas mehāniskās īpašības. Polietilēni, piemēram, LEBPE, ir piemēroti ar dabiskām šķiedrām armētu kompozītu izgatavošanai, jo tiem ir zema kušanas temperatūra (no 120 °C), augsts kausējuma indekss (līdz pat 50 g / 10 min), kas ir būtiski, lai varētu palielināt šķiedru procentuālo saturu tecētspējas saglabāšanai un samazināt matricas patēriņu. Globālajā polimēru tirgū LEBPE prognozē 6,0–5,5 % patēriņa pieaugumu, jo tas ir salīdzinoši lēts [13].

Kaņepju šķiedrām armētu kompozītu īpašību uzlabošanai izmanto ne tikai šķiedru modificēšanu, bet pievieno arī dažādas piedevas matricas modificēšanai – plastifikatorus, nanopildvielas, sašūšanas aģentus, pigmentus u. c. Pēdējos gados ļoti plaši tiek pētīti hibrīdkompozīti, kuros apvieno dažādas modificēšanas metodes, atšķirīgas armējošās komponentes un nanopiedevas [14], [15].

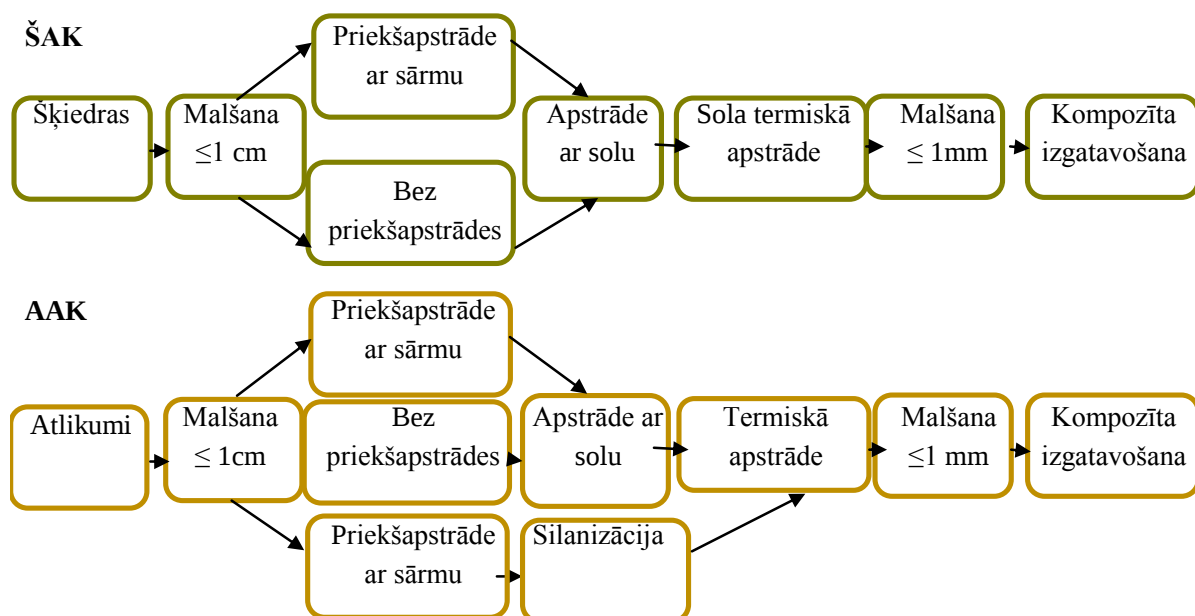
Kaņepju šķiedru saturošu kompozītu stiepes un lieces īpašības ievērojami palielina starpfāžu modifikatora maleinizētā polietilēna vasku (MAPE) un nanopildvielu piedevas, pieaugumu iespējams panākt, arī izmantojot kaņepju apstrādi ar silāniem. Silanizējot samazinās arī ūdens absorbcija, dažos avotos pozitīvus rezultātus sasniedz, arī izmantojot šķiedru apstrādi ar sārmu un acetilēšanu. Šķiedru ķīmiskais sastāvs lignīna, celulozes un hemicelulozes satura ziņā dažādās augu daļās ir ļoti atšķirīgs, un tas diezgan spēcīgi ietekmē arī kompozītmateriālu mehāniskās īpašības. Konstatēts, ka ar šķiedrām pastiprināto kompozītu mehāniskās īpašības ir augstākas nekā ar šķiedru ieguves atlikumu produktiem pildītiem kompozītiem [8], [16].

Dabisku šķiedru kompozītu īpašības būtiski ietekmē kompozīcijas sagatavošanas tehnoloģijas un gatavā izstrādājuma ieguves metodes. Pasaulē pašreiz izmanto divas izstrādājumu no DŠK iegūšanas tehnoloģijas – apvienoto un dalīto – atkarībā no vēlamā rezultāta. Parasti komponentu sajaukšana un izkļiede matricā ir atkarīga no kompozīcijas sagatavošanas procesā izvēlētajās tehnoloģijas un parametriem – temperatūras, laika, maisītāja apgriezienu skaita, bīdes ātruma u. c. Savietošanas aģenti, funkcionālie lubrikanti u. c. piedevas arī būtiski ietekmē jaukšanas vides, polimēra kausējuma viskozitāti un iegūtā kompozīta materiāla kvalitāti [17], [18].

2.2. Metodiskā daļa

2.2.1. Kompozītu komponentes

Kā kompozīta polimēra matrica ir izmantots lineāra zema blīvuma polietilēns (LEBPE). Šķiedrām armētiem kompozītiem (ŠAK) izmantots LL6201 markas polietilēns, bet atlikumiem armētiem kompozītiem (AAK) LL6201 XR.



2.1. att. Armējošo komponentu sagatavošanas vispārīgas shēmas.

Pētījumā izmantotas divu veidu lignocelulozi saturošas armējošās komponentes: 2014. gadā Latvijā ievāktu kaņepju šķirnes ‘Bialobrzesskie’ lūksnes šķiedras (Š), kas iegūtas pēc pirmreizējās mehāniskās pārstrādes, un kaņepju pirmreizējās pārstrādes atlikumi (A), apstrādes shēmas redzamas 2.1. att. Sākotnēji armējošās komponentes samaltas dzirnavās, izmantojot 1 cm acu sietu, tad apstrādātas atbilstoši izvēlētajai ķīmiskajai apstrādei un samaltas otrreiz ar 1 mm acu sietu *RETSCH ZM-200* dzirnavās, rotora apgriezienu skaits 1800 apgr./min, (2.1. att.). Malšana pēc ķīmiskās apstrādes nepieciešama, lai atdalītu salipušās A vai Š daļiņas.

2.2.2. Armējošo komponentu apstrādes metodes

Apstrāde ar sārmu

Kaņepju daļiņas apstrādātas ar 0,0025 vai 0,05 mol nātrija sārmu (NaOH) un destilēta ūdens šķīdumu 30 minūtes 20 °C temperatūrā, tad skalotas destilētā ūdenī līdz neitrālam pH līmenim.

Silanizācija

80 % etilspirta šķīdumam pievienoti 2 moli silāna (TEOS vai APTES) un hlorūdeņražskābe līdz pH 4 (2.1. tab.). A iztur sagatavotajā šķīdumā 1 h, tālāk žāvē termoskapī 24 h 60 °C temperatūrā, tad iztur vakuumskapī 2 h pie 110 °C (1 bar).

Sola-gēla sintēze

Solu kombināciju sintēzei izmantotie reaģenti redzami 2.1. tabulā. Sols sintezēts atbilstoši plānotajām kombinācijām, kā prekursoru lietojot izvēlēto silānu (APTES vai TEOS). Hidrolīzes un kondensācijas procesiem pievieno ūdeni un/vai etilspirtu, izvēlēta skābe kalpo kā katalizators vides skābuma regulēšanai līdz nepieciešamajam pH. Dažās solu kombinācijās kā modifikators pievienots arī cinka acetāta dihidrāts (2.2. tab.). Armējošās komponentes iemērkta solā, lai nodrošinātu vienmērīgu pārklājumu.

Solu kombinācijām piešķirti apzīmējumi pēc šāda principa:

silāns, mol : katalizators, mol : modifikators, mol/pH.

2.1. tabula

Sola-gēla sintēzei lietotie reaģenti

Reaģents	Formula	Ražotājs	Koncentrācija
Tetraetilortoksilāns (TEOS)	$C_8H_{20}O_4Si$	Vācija (<i>Alfa Aesar</i>)	99 %
Etanols	C_2H_5OH	ES (<i>SIA Enola</i>)	99 %
Fluorūdeņražskābe	HF	ES (<i>SIA Enola</i>)	40 %
Hlorūdeņražskābe	HCl	ES (<i>SIA Enola</i>)	27 %
Cinka acetāta dihidrāts	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$	ES (<i>SIA Enola</i>)	98 %
γ -aminopropiltrietilortoksilāns (APTES)	$H_2N(CH_2)_3Si(OC_2H_5)_3$	<i>Sigma Aldrich</i>	99 %

2.2. tabula

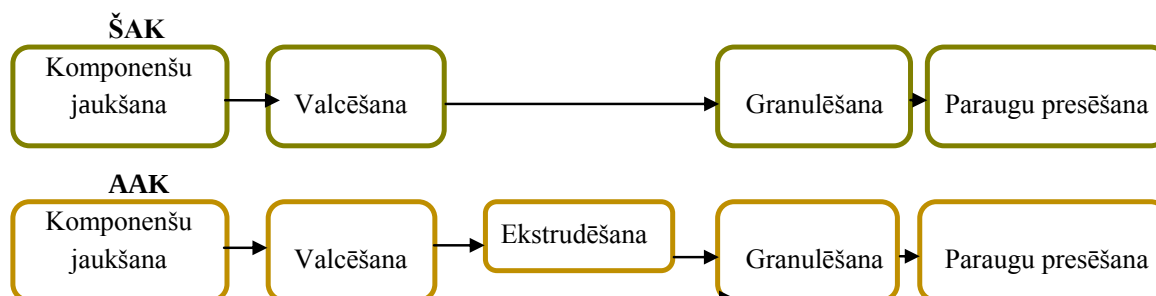
Sintezēto solu un termiskās apstrādes varianti

Sola variants: silāns, mol : katalizators, mol : modifikators, mol vai mas. %* / pH	Sola sajaukšana		Žāvēšana	Karsēšana	
	°C	min	°C	°C	min
TEOS 0,09 : HF 0,8/2	50	30	90	120	10
TEOS 0,13 : HF 0,8/2,2				90	30
TEOS 0,14 : HF 1,6/2				120	10
TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 8/ 5,3		40		90	30
TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6				120	10
TEOS 0,09 : HF 0,5 : ZAD 7,5/5,5					
TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 8 un APTES 0,009/5					
APTES 0,07 : HF 2,8/2,2		30			
APTES 0,06 : HCl 0,23/4,5		23		720	60
APTES 0,1 : HCl 0,25/9,6					
APTES 0,06 : HCl 0,23/ZAD 7,5/6,5					

* ZAD norādīts mas. %, bet APTES – mol.

2.2.3. Kompozītu izgatavošana

Armējošās komponentes pirms ievadīšanas kompozītā žāvē 12 h 60 °C, lai aizvadītu nesaistīto ūdeni, kompozītos nodrošinātu minimālu mitruma saturu un novērstu gaisa burbuļu veidošanos presēšanas laikā.



2.2. att. Kompozītu izgatavošanas shēmas.

Kompozītus izgatavo ar apsildāmiem divveltnu valčiem. Kompozīcijas izgatavošanas procesā daļu no paraugiem modificē ar 5 mas. % Licocene PE MA 4351: maleinizēta polietilēna vasku (MAPE) vai 1–3 mas. % PRIEX 15005 MAPE granulām un 2 mas. % cinka oksīda nanodaļiņām (ZnO). Dažiem kompozītiem pievienots plastifikators – funkcionālais lubrikants ekstrudēšanas procesa atvieglošanai *Struktol TPW709* 1 mas. %. Kompozīta modifikatori pievienoti valcēšanas procesā, aprēķinot procentuālo saturu no matricas svara.

Pēc valcēšanas materiālu sasmalcina nažveida dzirnavās neregulāras formas granulās. Sajaukšanas kvalitātes uzlabošanai daļu materiāla pēc valcēšanas papildus ekstrudē (ekstrūderis *PRISM TSE 16TC*), sajaucot 2-šneku ekstrūderī (Ek) pie temperatūras pa ekstrūdera cilindra apsildes zonām 160–165–175–185–195 °C un šneka apgriezienu skaita 25–75 min⁻¹ [19], [20]. Pēc ekstrudēšanas gatavie stienīši granulēti, sagriežot līdz 3 mm garos gabalos.

Kompozītu paraugi apzīmēti pēc šāda principa: armējošā komponente, mas. % / armējošās komponentes apstrāde / izgatavošanas metode / matricas modifikators izgatavošanas procesā, mas. % (2.3. un 2.4. tab.).

Paraugu izgatavošana, atlase un skaits atbilst standartos noteiktajām metodēm. No katra kompozīta varianta testēti vismaz 10 paraugi. Stiepes deformācijas noteikšanai testēti 15–20 paraugi, jo atbilstošā relatīvā kļūda var sasniegt 15 %, testējot nepietiekamu paraugu skaitu. Datu matemātiskā apstrāde veikta, aprēķinot parametru vidējās vērtības un novērtējot to ticamības intervālus atbilstoši ticamības varbūtībai 0,95, kā arī relatīvās kļūdas. Korelācijas analīze (korelācijas un determinācijas koeficientu matricas) piemērota sakarības intensitātes novērtēšanai starp paraugu īpašības raksturojošiem parametriem, statistiski nozīmīgas sakarības aprakstītas ar lineāriem vai nelineāriem matemātiskiem vienādojumiem. Grafiskie attēli veidoti *Microsoft Excel for Windows 2010* tehnoloģiskajā vidē, aprēķiniem un salīdzināšanai izmantotas iebūvētās funkcijas un datu analīzes programmas. Kompozītu ekspluatācijas svarīgāko īpašību optimizācijai (ūdens absorbcija, virsmas mikrocietība, blīvums, elastības modulis stiepē) veikts pirmās pakāpes pilns faktoru eksperiments, aprakstot izgatavošanas parametru un to mijiedarbības ietekmi gan ar statistiski adekvātiem vienādojumiem, gan to grafiskajām interpretācijām atbalss virsmu un divu dimensiju šķēlumu formā.

2.3. tabula

Šķiedrām armētu kompozītu parametri

Šķiedru mas. % / armējošās komponentes apstrāde / izgatavošanas metode / matricas modifikators izgatavošanas procesā						
	Armējošās komponentes apstrāde			Pievieno izgatavošanas procesā		
Kompozīta apzīmējums	NaOH, 0,05 mol	Sols	ZAD, mas. %	MAPE, 5 mas. %	Struktol, 1 mas. %	Valcēts/ ekstrudēts
Š30/-/V/-	–	–	–	–	–	Valcēts
Š30/NaOH/V/-		–	–	–	–	Valcēts
Š30/-/V/MAPE	–	–	–		–	Valcēts
Š40/-/V/-	–	–	–	–	–	Valcēts
Š40/-/V/MAPE	–	–	–		–	Valcēts
Š40/(TEOS 0,14 : HF 1,6/2)/V/-	–	TEOS 0,14 : HF 1,6/2	–	–	–	Valcēts
Š40/(TEOS 0,14 : HF 1,6/2)/V/MAPE	–	TEOS 0,14 : HF 1,6/2	–		–	Valcēts
Š40/(TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/-	–	TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6		–	–	Valcēts
Š40/(TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/MAPE	–	TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6				Valcēts
Š40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,14:HF 1,6/2)/V/-		TEOS 0,14 : HF 1,6/2	–	–	–	Valcēts
Š40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2)/V/MAPE		TEOS 0,14 : HF 1,6/2	–		–	Valcēts
Š40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/-		TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6		–	–	Valcēts
Š40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6) /V/MAPE		TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6			–	Valcēts
Š40/-/V/Struktol	–	–	–	–		Valcēts
Š40/-/V un Ek/Struktol	–	–	–	–		Valcēts un Ekstrudēts
Š50/-/V/-	–	–	–	–	–	Valcēts
Š50/-/V/MAPE	–	–	–		–	Valcēts
Š50/(TEOS 0,14: HF 1,6/2)/V/-	–	TEOS 0,14 : HF 1,6/2	–	–	–	Valcēts
Š50/(TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/MAPE	–	TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6			–	Valcēts

2.4. tabula

Atlikumiem armētu kompozītu parametri

Atlikumu mas. %/ armējošās komponentes apstrāde / izgatavošanas metode / matricas modifikators izgatavošanas procesā								
Apzīmējums	Armējošās komponentes apstrāde				Pievieno izgatavošanas procesā			Valcēts/ ekstru- dēts
	NaOH, mol	Silanizēts, 2 mol	Sols	ZAD, 7,5 mas. %	MAPE, mas. %	Struktol, 1 mas. %	ZnO, 2 mas. %	
A40/-/V/-	–		–	–	–	–	–	Valcēts
A40/-/V/Struktol	–		–	–	–		–	Valcēts
A40/-/V+ Ek/Struktol	–		–	–	–		–	V + Ek
A40/NaOH 0,025/V/-	0,025		–	–	–	–	–	Valcēts
A40/NaOH 0,05/V/-	0,05		–	–	–	–	–	Valcēts
A40/-/V/MAPE 1	–		–	–	1	–	–	Valcēts
A40/-/V/MAPE 2	–		–	–	2	–	–	Valcēts
A40/-/V/MAPE 3	–		–	–	3	–	–	Valcēts
A40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/-	0,05		TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6		–	–	–	Valcēts
A40/NaOH 0,05/V/ZnO	0,05		–	–	–	–		Valcēts
A40/NaOH 0,05 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2/V/-	0,05		TEOS 0,14 : HF 1,6/2	–	–	–	–	Valcēts
A40/NaOH 0,05 un sil APTES 2/V/-	0,05	APTES	–	–	–	–	–	Valcēts
A40/NaOH 0,05 un sil TEOS 2/V/-	0,05	TEOS	–	–	–	–	–	Valcēts
-/-/V/ZnO	–	–	–	–	–	–		Valcēts
A40/(APTES 0,06 : HCl 0,23/4,5)/V/-	–	–	APTES 0,06 : HCl 0,23/ 4,5	–	–	–	–	Valcēts
A40/(APTES 0,06 : HCl 0,23/ ZAD 7,5 6,5)/V/-	–	–	APTES 0,06 : HCl 0,23/ZAD 7,5/6,5		–	–	–	Valcēts

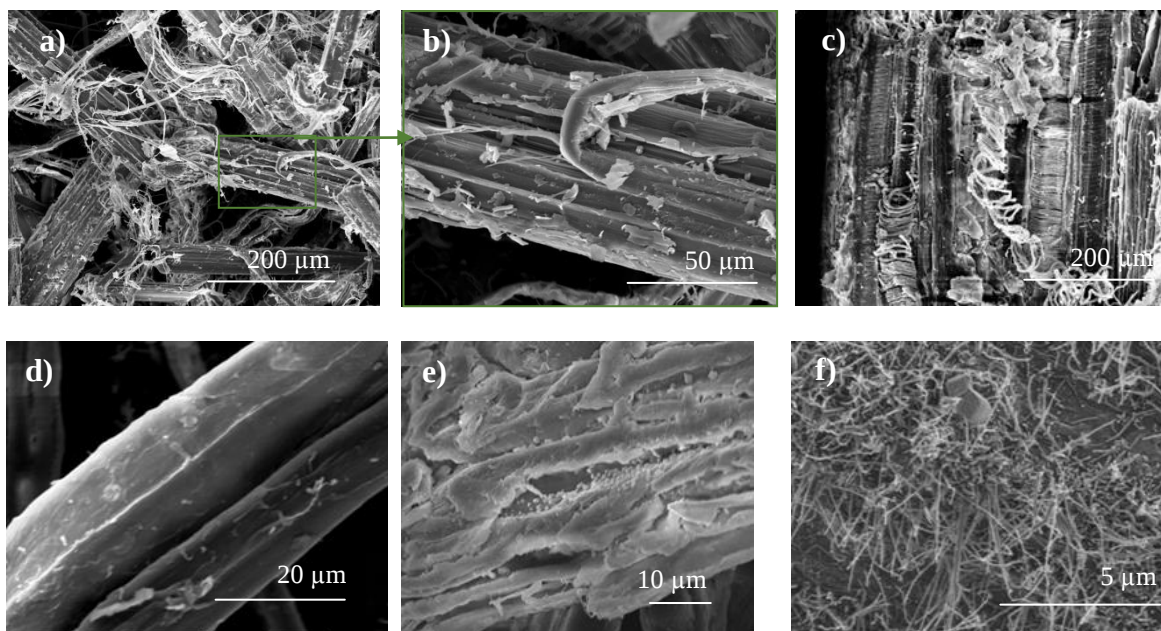
2.2.4. Paraugu testēšanas metodika

1. Plākšņveida paraugi iegūti, presējot sagatavoto kompozītu granulas. Sākotnēji materiālu presē iztur bez spiediena trīs minūtes 150 °C temperatūrā, tad presē zem 5 MPa spiediena 3 minūtes, bet pēc tam trīs minūtes atdzesē zem spiediena. Mikrociētības testam izgatavoti 1 mm biezi paraugi, stiepes stiprības-deformācijas īpašību testiem – 0,5 mm biezi paraugi; no tiem ar šablona palīdzību izcērt dubultlāpstiņveida paraugus.
2. pH noteikts ar ūdensizturīgu *AD14 pH* metru pie fiksētas temperatūras 22 °C ar precizitāti pH $\pm 0,01$ un $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.
3. Armējošo komponentu daļiņu izmēru noteikšanai izmantots augstas izšķirtspējas skeneris *Silverfast-se Epson perfection 4870* (izšķirtspēja 1200 dpi) ar slīdošo lenti un daļiņu automātisku attēlu analīzes programmu *FibreShape*, kas ļauj iegūt tūkstošiem objektu mērījumu vienlaikus. Uz slīdošās lentes virsmas iegūts melnbalts divdimensionāls attēls – šķiedru garums, diametrs un spalū garums un biezums, programmai automātiski nolasot, izteikts kā frakciju daļiņu garums un platums, automātiski noteikti statistiskie rādītāji.
4. Armējošo komponentu frakciju sadalījums pa izmēriem pēc šķiedras samalšanas caur 1 mm acu sietu veikts atbilstoši standartam LVS EN 933:2012 [21] ar sietu kratītāju A059-11/AE/0062, izmantojot 1000 μm , 500 μm , 355 μm , 150 μm un 90 μm sietus.
5. Enerģijas dispersīvo rentgenstaru spektroskopiju izmantoja kaņepju virsmas ķīmiskā sastāva analīzei ar *SEM Mira Tecsan HF* un ar *Oxford Inca X-sight EDX* detektoru.
6. Materiāla blīvums noteikts saskaņā ar standartu ISO 1183-1:2012 [22], izmantojot hidrostatiskās svēršanas aprīkojumu *YDK 01* un *Sartorius* (svaru precizitāte 0,00001 g) svariem 20 °C temperatūrā spirtā.
7. Šķiedru un atlikumu izmēru atšķirības daļiņām $< 90 \mu\text{m}$ novērtētas, izmantojot optisko mikroskopu ar 4x palielinājumu, bet novecināto kompozītu virsma un šķērsriezums 4x un 10x palielinājumu. Kompozītu smarža, aglomerātu un gaisa ieslēgumu veidošanās pēc presēšanas novērtēta organoleptiski.
8. Kompozītu ūdens absorbcijas kinētika, fiksējot paraugu masas izmaiņas laikā, noteikta atbilstoši standartam LVS EN ISO 62:2008 [23].
9. Kausējuma indeksu atbilstoši ASTM D 1238 – 90b [24] novērtē ar polimēra masu gramos, kas iztek cauri noteikta izmēra cilindriskam kapilāram ($d = 2,06 \text{ mm}$, $L = 8 \text{ mm}$), kas ievietots kapilārā viskozimetrā pie noteiktiem apstākļiem (temperatūras, slodzes), un kas ir pārrēķināta uz 10 minūšu ilgu tecēšanas laiku.
10. Parauga virsmas (pēc *Vickers M-41*) mikrociētību (VM) nosaka, iespiežot regulāru četrstūra dimanta piramīdu ar 136° leņķi starp skaldnēm parauga virsmā. Mikrociētības noteikšanai izmanto 1 mm biezu presēta plakanparalēla un gluda kompozīta materiāla plāksni ar iespējami zemāku virsmas raupjumu. Pieliktā slodze slogošanas laikā ir 200 g. Spriegums nepārsniedz 10 V.
11. Stiepes stiprības-deformācijas īpašības noteiktas saskaņā ar standratu ISO 527:2012 [25]. Izmantots universālais dinamometrs *Zwick/Roell Z020*. Pārbaudi veic pie

- deformēšanas ātruma 20 mm/min, nosaka stiepes stiprību (σ_{st}), elastības moduli stiepē (E_{st}) un relatīvo pagarinājumu (ϵ_{st}).
12. Kompozītu paraugu šķērsgriezumu-lūzuma plaknes un armējošo komponentu virsmas pārklājumu izpētei izmantotas ar skenējošo elektronu mikroskopu uzņemtas mikrofotogrāfijas (*SEM Mira Tescan*, *SEM Hitachi S-3400*, *Hitachi VP-SEM SU3500* un *Helios Nanolab, FEI*).
 13. Pavājinātās pilnīgās atstarošanas infrasarkanā spektroskopija (*FTIR-ATR*) izmantota, lai noteiktu funkcionālo grupu klātbūtni uz virsmas (diapazonā no 400 cm^{-1} līdz 4000 cm^{-1}).
 14. Paraugu virsmas topogrāfijas analīze veikta ar atomspēku mikroskopu *Bruker Dimension Edge* bezkontakta režīmā, izmantojot silīcija nanozondi ar smailes radiusu 3,75 μm , Springa konstanci 26 N/m, rezonanses frekvenci 300 kHz, garumu 160 μm , alumīnija pārklājumu 100 nm. Virsmas topogrāfija mērīta laukumā 25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$. Paraugi uzņemti pie sprieguma 2,6 V $\pm$ 0,2 V. Attēli apstrādāti programmas *NanoScope Analysis 1.5* tehnoloģiskajā vidē 3D modeļu iegūšanai. Automātiski kalkulētais vidējais kvadrātiskais nanolīmeņa raupjums (RMS) virsmas raupjuma izmaiņu salīdzināšanai. RMS aprēķināts, no vidējā integrālā raupjumu kvadrātu summas (ARS) izvelkot kvadrātsakni.
 15. Plēves veida kompozītiem novecošanās procesa kinētika pētīta UV kamerā (modelis *Q-UV spray with solar Eye Irradiance control*) aprīkotā ar UVA-340 starojuma lampu. Dominējošais UV starojuma viļņa garums ir 340 μm . UV novecošana veikta atbilstoši standartam ASTM G 154 [26] ar paraugu periodisku aprasināšanu ar ūdeni (80 cikli: 8 h apstarošana 60 °C, 4 h ūdens tvaikos 50 °C, apstarošanas jauda 0,89 W/m^2). Viena cikla laiks – 12 h, kopējais novecošanās procesa ilgums – 1000 h.
 16. Pēc novecināšanas noteiktas paraugu krāsu, gaišuma un spīduma izmaiņas, virsmas mikrociētība, stiepes stiprības rādītāji, un tie salīdzināti ar attiecīgajiem nenovecinātu paraugu rādītājiem. Virsmas krāsa noteikta presēta kompozīta vienā pusē ar iekārtu *X-Rite PANTONE Capsure MR200 Colorimeter*. Kalkulētas krāsu vektoru koordinātes a^* , b^* un L^* *CIELab-76* krāsu koordinātu telpā, kā arī gaišuma atšķirības starp paraugiem (ΔL^*), krāsu vektoru koordinātu izmaiņas (Δa^* , Δb^*), iespējamā izšķīramā krāsu atšķirība (ΔE), krāsas piesātinājums (C) un tonis (H).
 17. Presētu kompozītu virsmas spīdums noteikts ar iekārtu *NOVO-GLOSS LITE TM Statistical Glossmeter* atbilstoši ASTM D523 [27], mērījuma leņķis 60° gan pirms, gan pēc novecināšanas.

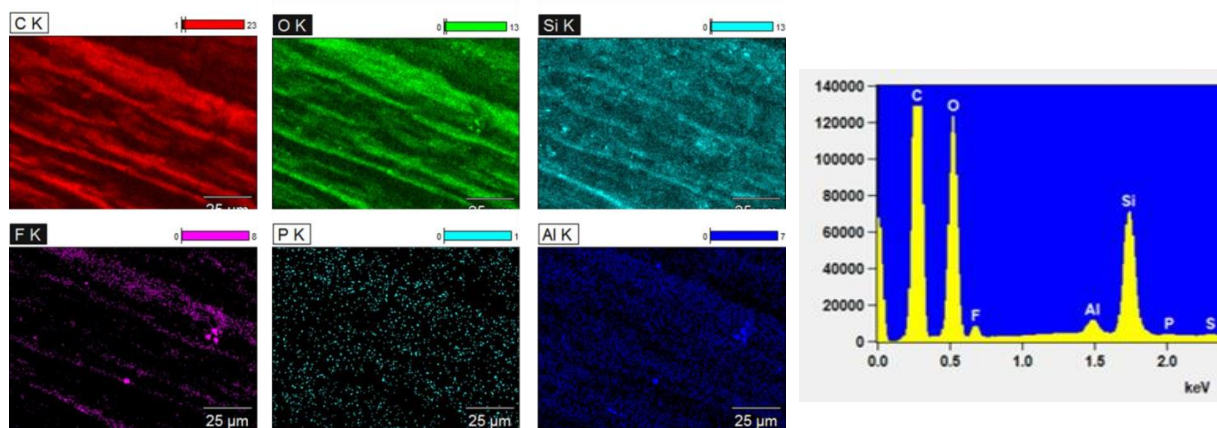
2.3. Rezultāti un to izvērtējums

2.3.1. Kompozītu armējošo komponentu īpašību izpēte

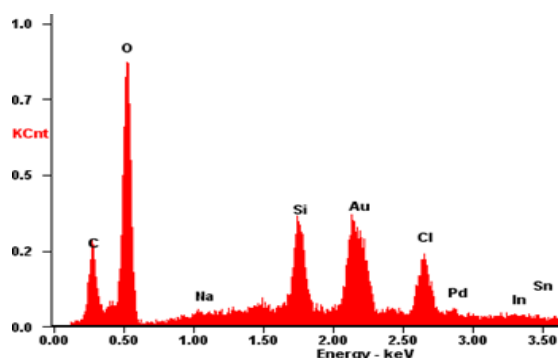


2.3. att. Samaltas kaņepju lūksnes šķiedras (a, b), atlikumi (c), ar 0,05 mol NaOH apstrādātas šķiedras (d), atlikumi ar 0,05 mol NaOH un silanizācijas (2 mol TEOS) apstrādi (e) un ar solu TEOS 0,14 : HF 1,6/2 apstrādātu kaņepju (f) SEM mikrogrāfijas.

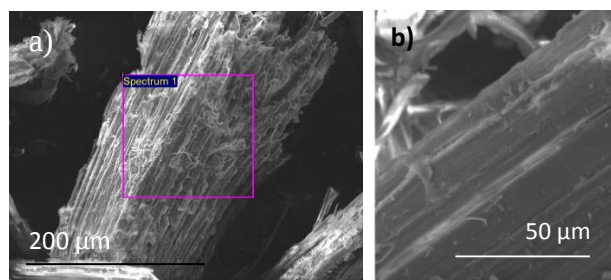
Armējošo komponentu virsmas mikrostruktūra ir ļoti daudzveidīga, tāpēc grūti identificēt uznestos pārklājumus (2.3. att. a–c). Apstrāde ar NaOH attīra kaņepju virsmu (2.3. att. d), sagatavojot to tālākai apstrādei, bet silanizēšana identificējama pēc kubiskas formas veidojumiem uz virsmas (2.3. att. e). Ar sola-gēla tehnoloģiju modificētu kaņepāju šķiedru un pirmreizējās apstrādes atlikumu virsmas struktūra mainās atkarībā no sola sastāva: ar APTES solu apstrādātā virsma ir gluda (2.6. att. b), bet ar TEOS solu apstrādātā veido reljefu, sākot no nelieliem ieapaļiem izaugumiem līdz gariem un ažūriem silīcija “zariem” (2.3. att. f).



2.4. att. Pārklājuma TEOS 0,14 : HF 1,6/2 ķīmiskie elementi uz kaņepju šķiedru virsmas.



2.5. att. Ķīmiskie elementi uz atlikumu virsmas pēc apstrādes ar solu APTES 0,06 : HCl 0,23/4,5.



a)	Elements	C	O	Si	Cl	Ca	Zn	Mg	Al
	Mas. %	44,5	38,6	3,9	4,4	0,5	7,8	0,1	0,2

2.6. att. Ķīmiskie elementi uz atlikumu virsmas (mas. %) pēc apstrādes ar solu APTES 0,06 : HCl 0,23 : ZAD 7,5/6,5.

EDS analīzē redzams, ka ķīmisko elementu izkliede uz virsmas atkarīga gan no virsmas reljefa, gan sola kvalitātes (2.4.–2.6. att.). Balstoties uz SEM un EDS armējošo komponentu virsmas modifikācijas variantu analīzes rezultātiem, par atbilstošāku uzskatāma NaOH 0,05 mol priekšapstrāde ar sekojošu silanizāciju ar 2 mol TEOS vai APTES un armējošo komponentu modifikācija ar sekojošiem prekursoru TEOS un APTES bāzes šķīdumiem:

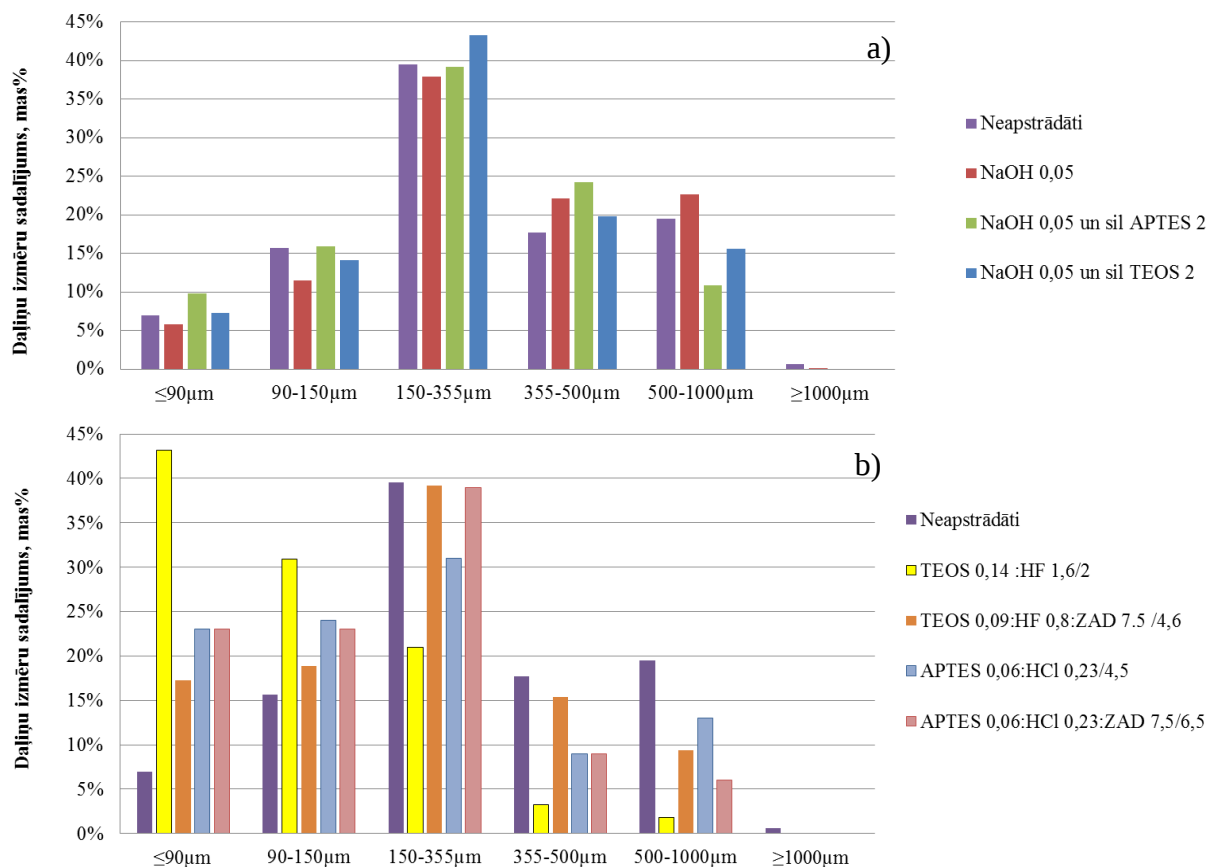
- TEOS 0,14 : HF 1,6/2;
- TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6;
- APTES 0,06 : HCl 0,23/4,5;
- APTES 0,06 : HCl 0,23 : ZAD 7,5/6,5.

2.5. tabula

Samaltu armējošo komponentu daļiņu garuma un platuma attiecība atkarībā no apstrādes

Paraugs	Garuma un platuma attiecība	±
Neapstrādātas šķiedras	10,91	0,16
Neapstrādāti atlikumi	16,01	0,10
Ar solu APTES 0,06 : HCl 0,23/4,5 apstrādāti atlikumi	14,69	0,12
Ar solu APTES 0,06 : HCl 0,23 : ZAD 7,5/6,5 apstrādāti atlikumi	13,27	0,14

Granulometriskā un daļiņu izmēru analīze liecina, ka neapstrādātu samaltu atlikumu daļiņu izmēri ir vidēji lielāki nekā šķiedru, ar šķīdumiem modificēto armējošo komponentu garuma un platuma dimensijas samazinās, salīdzinot ar neapstrādātām solu skābās vides ietekmē (2.5. tab.). Pārāk skābā sola vidē (ap pH 2) modificētu komponentu smalko frakciju satura pieaugums (2.7. att. b) malšanas procesā un atbilstošo kompozītu maksimālā sagraušanas sprieguma vērtību samazināšanās (no 11,2 MPa neapstrādātiem AAK uz 10,8 MPa un 8,9 MPa) (2.6. tab. un 2.8. att.) liecina par kaņepju destrukciju, kas var notikt modifikācijas procesā. Silanizētu (apstrāde pH 4 vidē) atlikumu daļiņu sadalījums ir tuvs neapstrādātu atlikumu sadalījumam (2.7. att. a).



2.7. att. Atlikumu daļiņu izmēru sadalījums pa frakcijām pēc ķīmiskās apstrādes: a) ar NaOH apstrādāti un silanizēti; b) apstrādāti ar sola-gēla tehnoloģiju.

2.3.2. Kaņepēm armētu kompozītu īpašības

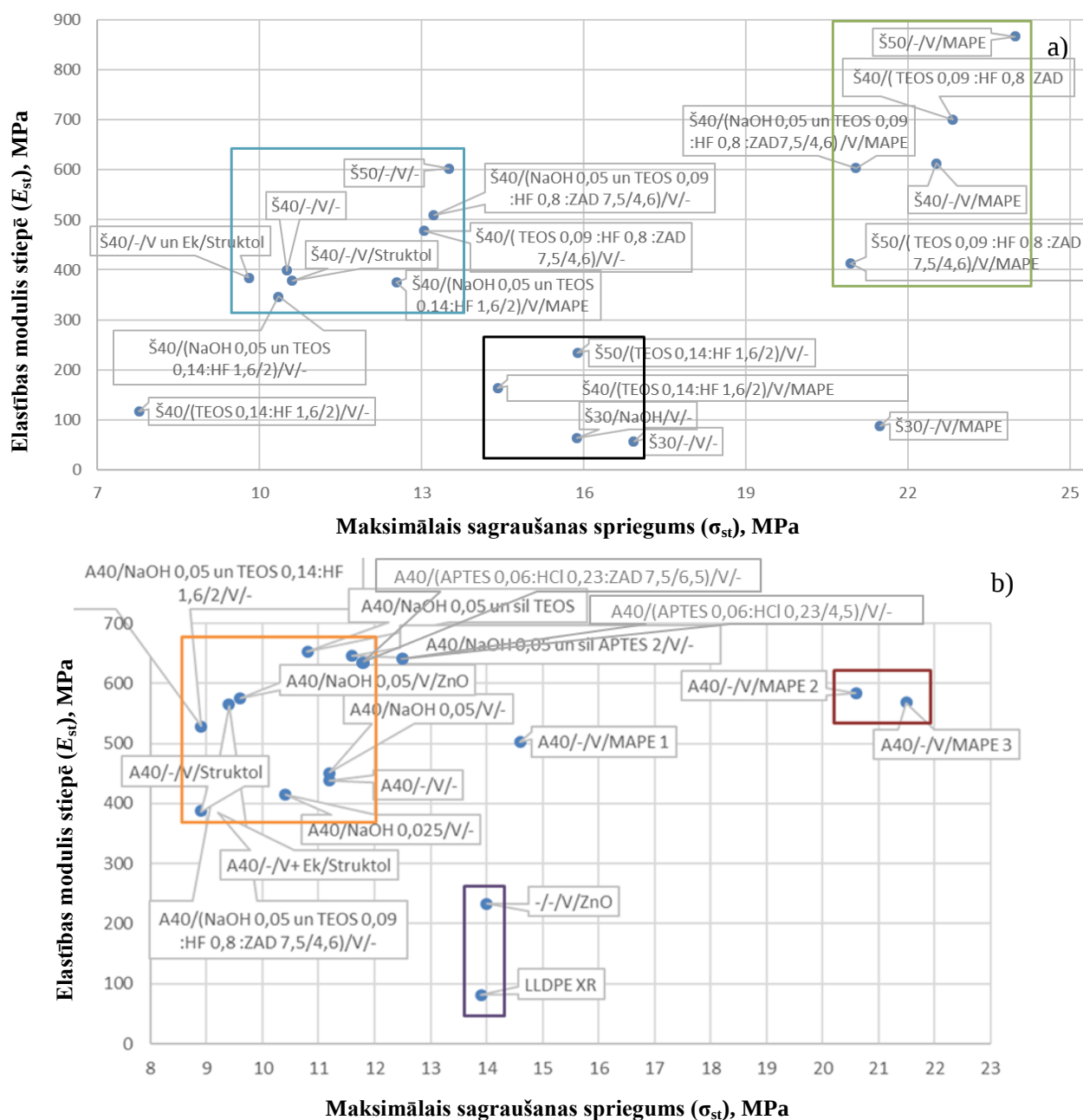
Salīdzinot ar izmantotās polimēra matricas attiecīgajām īpašībām, neapstrādātu armējošo komponentu 40 mas. % kompozītu sagraušanas pagarinājums samazinās attiecīgi 12,55 (ŠAK) un 5,02 (AAK) reizes, bet maksimālais spriegums 1,23 (ŠAK) un 1,24 (AAK) reizes. Savukārt elastības modulis palielinās attiecīgi 8,13 (ŠAK) un 5,36 (AAK) reizes (6. tab.).

2.6. tabula

Polimēra matricas mehānisko īpašību ietekme uz 40 mas. % kaņepāju šķiedrām un atlikumiem armētu kompozītu mehāniskajām īpašībām

Armējošās komponentes	Elastības modulis stiepē, MPa		Palielinās, reizes	Maksimālais sagraušanas spriegums, MPa		Samazinās, reizes	Sagraušanas pagarinājums, %		Samazinās, reizes
	LZBPE	40/-/V/-	Komp./matrica	LZBPE	40/-/V/-	Matrica/kompoz.	LZBPE	40/-/V/-	Matrica/kompoz.
Š	49,0	398,3	8,13	12,8	10,5	1,23	59	4,7	12,55
A	81,7	438,3	5,36	13,9	11,2	1,24	21,1	4,2	5,02

Ar 50 mas. % šķiedrām armētu kompozītu ar 5 mas. % MAPE piedevu stiepes stiprība (2.8. att. a) atbilstoši standartam EN 622 tuvojās slodži nesošu konstrukciju prasībām šķiedru plātnēm (24 MPa), un tā stiepes modulis ir 0,9 GPa (Š50/-/V/MAPE 2).

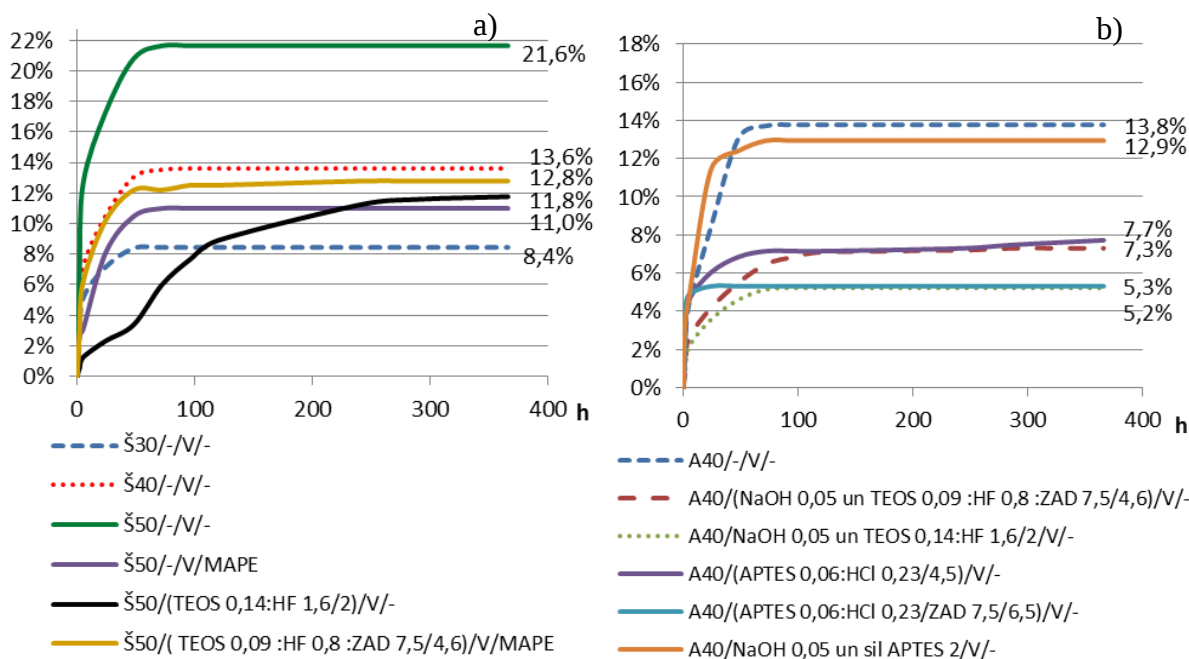


2.8. att. Kompozītu elastības modulis (E_{st}) un maksimālais sagraušanas spriegums (σ_{st}), MPa:
a) šķiedrām armēti kompozīti; b) atlikumiem armēti kompozīti.

Ar 40 mas. % kaņepēm armētus kompozītus var iedalīt trīs grupās pēc ūdens absorbcijas rezultātiem (2.9. att.):

- ļoti zema ūdens absorbcija – robežās no 5 % līdz 8 %: (Š40/-/V/MAPE; A40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/-; A40/NaOH 0,05 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2/V/-; A40/-/V/Struktol, A40/-/V+ Ek/Struktol);

- zema ūdens absorbcija – robežās no 8 % līdz 12 %: (Š40/(TEOS 0,14 : HF 1,6/2)/V/-; Š40/(TEOS 0,14:HF 1,6/2)/V/MAPE; A40/-/V/MAPE 1; Š40/(TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/MAPE; Š40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/MAPE; Š40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2)/V/-);
- vidēji augsta ūdens absorbcija – robežās no 12 % līdz 17 % (atbilst pārējie eksperimentālo kompozītu varianti).



2.9. att. Kaņepju šķiedrām (a) un atlikumiem (b) armētu LLDPE kompozītu ūdens uzsūkšanas kinētika.

Nemodificētu šķiedru kompozītu ūdens absorbcija strauji palielinās no 8 mas. % līdz 21,6 mas. %, pieaugot šķiedru saturam no 30 mas. % līdz 50 mas. %; to var samazināt līdz 11 % ar MAPE 5 mas. % piedevu, iekļaujoties zemas uzsūcamības intervālā vai līdz 12 % modificējot šķiedras ar TEOS 0,14 mol solu (2.9. att. a). Ar 40 mas. % atlikumiem armētu kompozītu ūdens absorbcija samazinās vairāk nekā divas reizes, ja atlikumi modificēti ar APTES 0,06 : HCl 0,23/ZAD/6,5 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2, kā arī, modificējot atlikumus ar APTES un TEOS soli, iegūto kompozītu ūdens absorbcija iekļaujas ļoti zemas absorbcijas robežās (2.9. att. b). Atlikumu sārma priekšapstrāde kombinācijā ar silanizāciju kompozīta ūdens uzsūcamību būtiski nesamazina.

Ekstrudēšanas un valcēšanas apvienošana samazina kompozītu E_{st} , σ_{st} , ϵ_{st} un VM, salīdzinot ar valcētiem paraugiem bez *Struktol TPW709* piedevas. Lai nodrošinātu ekstrudēto granulu gludu profilu, nepieciešama par 1 mas. % augstāka *Struktol TPW709* koncentrācija kompozītā.

Gan nemodificētu atlikumu, gan šķiedru pievienošana 1,2 reizes palielina kompozīta blīvumu, salīdzinot ar matricu. Atkarībā no atlikumu ķīmiskās apstrādes, atlikumu pievienošana 40 mas. % apjomā palielina kompozītu blīvumu robežās no 1,059 g/cm³ līdz 1,124 g/cm³, bet šķiedru pievienošana robežās no 1,052 g/cm³ līdz 1,122 g/cm³ (2.10. att.).

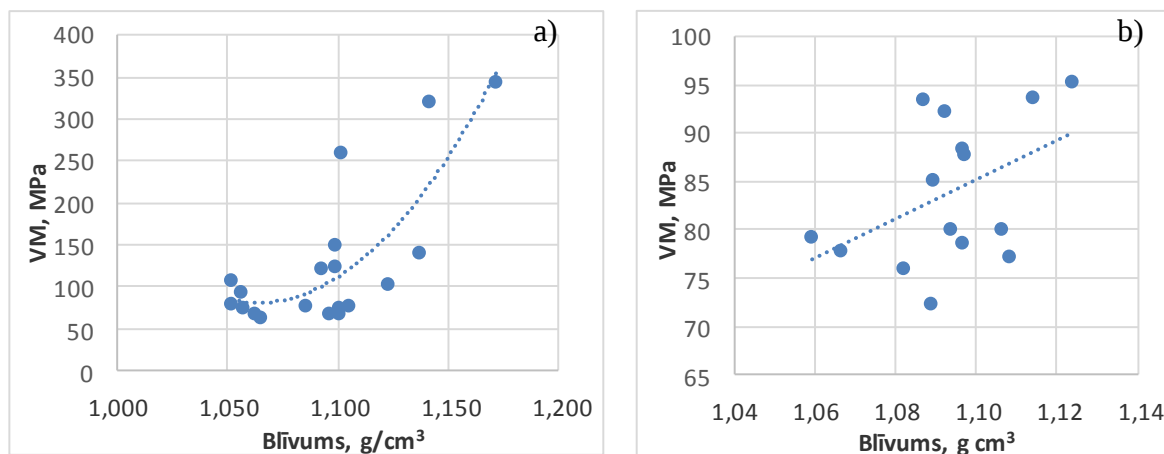
Ja salīdzina visu izgatavoto kompozītu īpašības, iespējams saskatīt likumsakarības starp vairākiem noteiktajiem parametriem. Virsmas mikrociētības atkarību no šķiedrām armētu kompozītu blīvuma (2.10. att. a) apraksta nelineārs vienādojums (2.1.):

$$y_{VM} = 23651x_b^2 - 50337x_b + 26865, (R = 0,79), \quad (2.1.)$$

kur y_{VM} – kompozītu virsmas mikrociētība, MPa;

x_b – kompozītu blīvums, g/cm³.

Pieaugot kompozītu blīvumam, palielinās arī virsmas mikrociētība. Savukārt ar atlikumiem armētu kompozītu blīvuma ietekme uz mikrociētību ir salīdzinoši vājāka ($R = 0,46$, $D = 0,21$; 2.10. att. b).



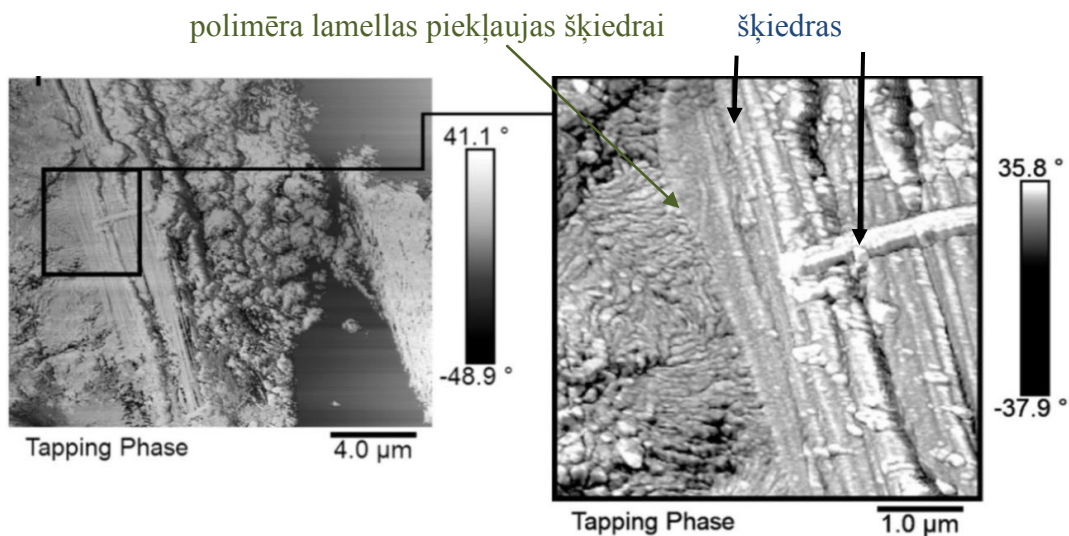
2.10. att. Kompozītu virsmas mikrociētības un blīvuma mijiedarbība: a) ar šķiedrām armēti; b) ar atlikumiem armēti.

Salīdzinot ar matricu, 40 mas. % AAK virsmas mikrociētība pieaugusi tikai 2,1 reizi, bet ŠAK 5,8 reizes. Ar TEOS 0,14 M modificējot šķiedras, iespējams iegūt kompozītus ar salīdzinoši augstu VM (Š40/(TEOS 0,14 : HF 1,6/2)/V/MAPE (260 MPa) un Š50/(TEOS 0,14 : HF 1,6/2)/V/- (345 MPa).

Neapstrādātu Š 40 mas. % kompozīta KI ir neliels – 0,59 g/10 min, bet AAK praktiski netek – 0,03 g/10 min. Gan AAK, gan ŠAK kausējuma indeksu veiksmīgi iespējams saglabāt un palielināt, izmantojot solu priekšapstrādes, ietekme uz KI ir līdzīga (AAK KI pieaudzis 0,4 reizes, ŠAK – 0,5 reizes).

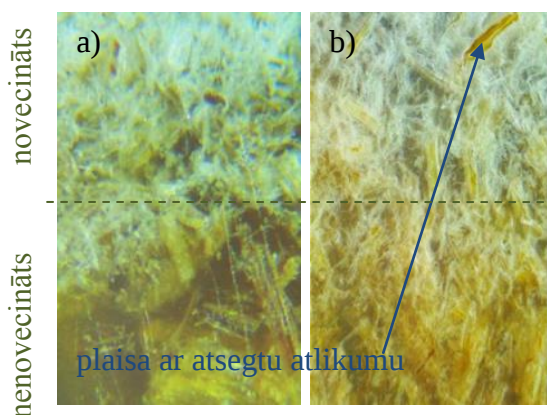
2.3.3. Kompozītu virsmas un novecošanās pētījumi

LZBPE matricai raksturīga sferolītu veidošanās lineārā virzienā ar nelielu sazarotību. No sferolītu centriem veidojas līdz pat 2 μm garas lamellas, un starp tām redzami amorfi polimēra apgabali. Apstrādātu šķiedru kompozītā (NaOH 0,05 mol un TEOS 0,14 : HF 1,6/2) redzama labāka šķiedru kompleksu adhēzija ar matricu nekā neapstrādātu, jo veidojas sakārtotāka lamellu pašorientācija bez izteiktiem amorfiem apgabaliem (2.11. att.).

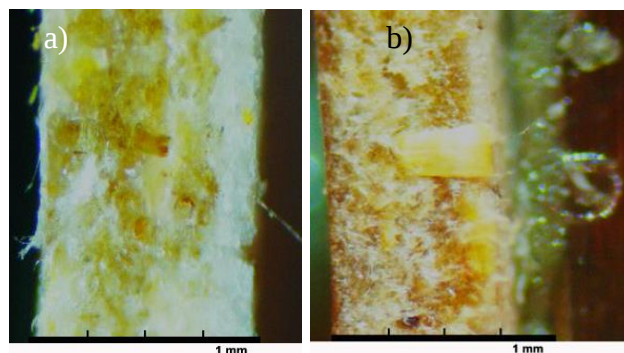


2.11. att. Kompozīta Š40/NaOH 0,05 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2/V/- virsmas nanostruktūras (fāze un amplitūda).

Novecināta parauga reljefa augstums ir divas reizes lielāks nekā pirms novecināšanas. Novecinātā kompozīta virsmā saskatāmas plaisas (2.12. att.).

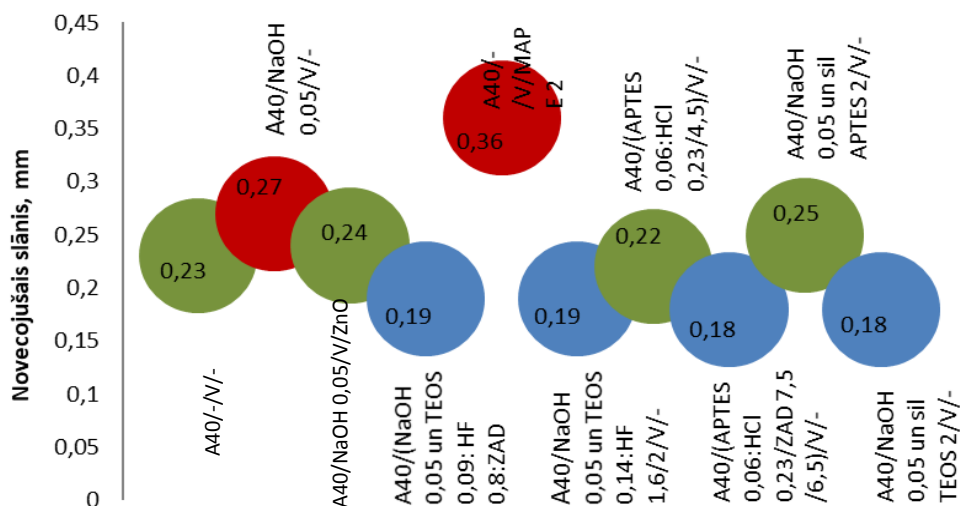


2.12. att. Novecinātu un nenovecinātu kompozītu robežvirsmā: a) A40/-/V/-; b) A40/NaOH 0,05/V/ZnO.



2.13. att. Kompozītu šķērs griezuma virsma pēc novecināšanas, optiskā mikroskopa attēli 4× palielinājumā (novecinātā virsma pa labi): a) A40/-/V/-; b) A40/-/V/MAPE 2.

Presēto kompozītu biezums pirms novecināšanas ir 1 mm. Neapstrādātu atlikumu kompozītā novecināšanas pēdas redzamas 0,23 mm dziļumā (2.13. att. a), līdzīgi rezultāti ir arī kompozītam ar sārma atlikumu apstrādi un ZnO nanodaļiņu piedevu – 0,24 mm.



2.14. att. Kompozīta novecinātās daļas dziļums, mm.

Kompozītiem, kuru atlikumi apstrādāti ar APTES solu un silanizēti – 0,22 mm un 0,25 mm (2.14. att.). Straujāk par neapstrādātu kompozītu noveco kompozīts ar MAPE piedevu – 0,36 mm dziļumā (2.13. att. b) un ar NaOH atlikumu apstrādi (0,27 mm). Mazākas novecošanās pēdas ir kompozītiem ar atlikumiem, kas apstrādāti ar ZAD saturošiem šķīdumiem vai kuru apstrādē izmantots TEOS (0,18–0,19 mm).

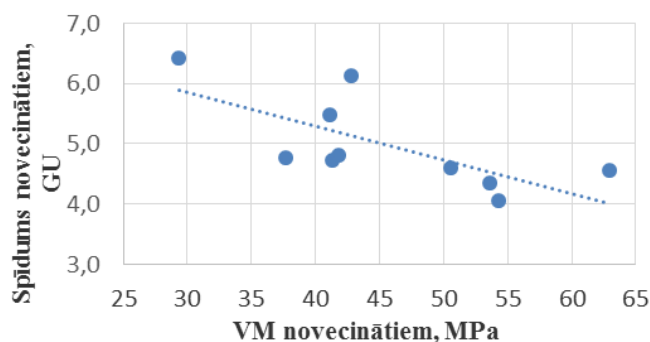
Nenovecinātu kompozītu virsmas ir vidēji spīdīgas, pusmatētas. Pēc novecināšanas kompozītu virsmas spīdums strauji samazinās – virsma kļūst matēta. Virsmas reljefa augstuma atšķirību pieaugums āra vides agresīvās ietekmes rezultātā ir galvenais iemesls spīduma izmaiņām.

Pēc novecināšanas lielākās spīduma izmaiņas, attiecīgi samazinoties par 88 % un 87 %, ir kompozītiem ar 2 mas. % MAPE piedevu un atlikumu apstrādi ar APTES. Novecinātu AAK virsmas spīduma un mikrociētības mijiedarbību apraksta vienādojums:

$$y_{GU} = -0,056x_{VM} + 7,5381, (R = 0,71), \quad (2.2.)$$

kur y_{GU} – kompozītu virsmas spīdums pēc novecināšanas, GU;

x_{VM} – virsmas mikrociētība novecinātiem kompozītiem, MPa.



2.15. att. Novecinātu AAK virsmas spīduma un mikrociētības mijiedarbība.

Eksperimentālo variantu virsmas spīdums variē robežās no 4 GU līdz 6 GU, un virsmas mikrociētība – no 38 MPa līdz 51 MPa. Samazinoties novecināto paraugu virsmas spīdumam, samazinās arī virsmas mikrociētība (2.14. att.).

Novecināšanas rezultātā ir notikušas vizuālas izmaiņas: kompozīti izbalojuši, zaudējuši krāsu, piesātinājumu un toni (2.12. att.). Krāsas izmaiņas notikušas, galvenokārt palielinoties gaišumam. Mazākās krāsas, nokrāsas, gaišuma, toņa izmaiņu vērtības ir kompozītam ar ZnO nanodaļiņu piedevu.

Kompozītu virsmas mikrocietība pēc novecināšanas strauji samazinās, zaudējot cietību robežās no 31 % līdz 62 %. Straujāk virsmas mikrocietību zaudē kompozīti ar atlikumu sārma priekšapstrādi un sekojošu silanizāciju, mazāk ar sārma priekšapstrādi un sekojošu apstrādi ar solu TEOS 0,14 : HF 1,6/2.

Novecināto kompozītu šķēsgriezumu bojātais slānis variē robežās no 0,18 mm līdz 0,36 mm. Dziļākie defekti saskatāmi kompozītā ar MAPE modificētiem atlikumiem, savukārt mazākās bojājumu pēdas ir ar ZAD saturošiem soliem modificētu atlikumu kompozītiem vai arī modificētiem tikai ar TEOS prekursora soliem.

Ārējās vides apstākļi būtiski ietekmē kompozītu novecošanos, tāpēc lietojumam ārvidē vairāk piemēroti kompozītu varianti ar armējošo komponentu priekšapstrādi ar TEOS solu, zemu ūdens absorbciju un plānotajam lietojumam atbilstošām mehāniskajām īpašībām (A40/(NaOH 0,05 un TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/-; A40/NaOH 0,05 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2/V/-). Iegūto kompozītu lietojumam iekšvidē ir mazāk ierobežojumu, bieži vien priekšplānā izvirzot mehāniskās īpašības, ko nodrošina MAPE piedeva vai arī MAPE apvienota ar armējošo komponentu ķīmisko apstrādi (Š50/-/V/MAPE, Š40/-/V/MAPE, Š40/(TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/4,6)/V/MAPE, A40/-/V/MAPE 3, A40/-/V/MAPE 2). Lietojumos ar ierobežotu slodzes nestspēju piemēroti kompozītu varianti ar vienkāršāk realizējamām tehnoloģiskām operācijām to izgatavošanai, samazinot izgatavošanas izmaksas (Š50/-/V/-, Š40/-/V/-, Š30/-/V/-, A40/-/V/-).

SECINĀJUMI

1. Kaņepju šķiedras un stiebru pirmreizējās pārstrādes atlikumi ir veiksmīgi integrējami kā armējošās komponentes lineāra zema blīvuma polietilēna matricā, uzlabojot tās mehāniskās un ekspluatācijas īpašības.
2. Augstākais ķīmiski neapstrādātu armējošo kaņepju komponentu procentuālais saturs, kādu iespējams ievadīt matricā, saglabājot kompozīta formēšanai nepieciešamo kausējuma indeksu un paaugstinātas mehāniskās īpašības, ir 40 mas. %.
3. Piemērojot šķiedru un atlikumu komponentēm dažādas priekšapstrādes un piedevas, iespējams LZBPE matricas kompozīta īpašības izmainīt plašās robežās un nodrošināt paredzamajam lietojumam svarīgāko īpašību uzlabojumus.
4. Pielāgojot dabiskajām šķiedrām atbilstošu modificēšanas temperatūru, laiku un vides pH, ar sola-gēla tehnoloģiju iespējams iegūt efektīvi funkcionējošus armējošo komponentu nanopārklājumus kompozīta ekspluatācijas īpašību projektēšanai.
5. Kompozītu mitruma un ūdens uzsūkšanas spēju ar lielu dabas šķiedru saturu iespējams efektīvi samazināt, piemērojot šķiedru komponentes priekšapstrādes virsmas hidrofobizēšanai.
6. Modificējot šķiedru komponentes ar atbilstoša sastāva solu, iespējams izveidot 50/50 mas. % kompozītus ar ierobežotu mitruma uzsūktspēju. Veiktie pētījumi ļauj prognozēt, ka, pilnveidojot solu sastāvu, nākotnē varētu palielināt kaņepju komponentes daļu līdz 60 mas. %.
7. Augstākās kompozītu mehāniskās īpašības stiepē iegūtas, kompozītiem pievienojot MAPE piedevu valcēšanas procesā un/vai armējošās komponentes modificējot ar TEOS un ZAD saturošiem šķīdinātājiem (šķiedras) un APTES šķīdinātājiem (atlikumus). Tomēr jāņem vērā, ka kompozīti ar MAPE piedevu noveco intensīvāk.
8. Eksperimentāli pielāgojot solu sastāvu, iespējams modificēt ne tikai kaņepes, bet arī citas dabiskās šķiedras un no tām izgatavotās drānas.
9. Izmantotās armējošo komponentu modificēšanas metodes iespējams veiksmīgi piemērot, veidojot citu termoplastisko matricu kompozītus, ar nosacījumu, ka to kušanas temperatūra nepārsniedz armējošo komponentu destrukcijas temperatūru.

PRIEKŠLIKUMI UN IEROSINĀJUMI

1. Kompozītu izgatavošanai kā armējošās komponentes ekonomiski izdevīgāk ir lietot neapstrādātus stiebru un primāro šķiedru pārstrādes atlikumus, nevis šķiedras, jo tie veidojas kā ražošanas blakusprodukts un to cenu galvenokārt veido transporta un uzglabāšanas izmaksas.
2. No kompozītu izgatavošanas viedokļa mazāk tehnoloģisko procesu ir jāveic kompozītiem, kuru sastāvā ir neapstrādātas armējošās komponentes un MAPE piedeva kompozītu īpašību uzlabošanai. Šajā gadījumā nav jāveic kaņepju komponentes ķīmiskā priekšapstrāde, to iespējams samalt vienā tehnoloģiskā komponentes sagatavošanas procesā.
3. Kaņepju komponentes virsmas modificēšana ar sola-gēla tehnoloģiju palielina kompozīta kopējo izgatavošanas operāciju skaitu, taču nodrošina komponentu ātrāku un vienmērīgāku sajaukšanos valcēšanas procesā, nozīmīgus kompozīta īpašību uzlabojumus, kā arī iespēju palielināt armējošo komponentu saturu līdz 50 mas. % un, iespējams, vēl vairāk.
4. Darbā pētīto optimālā sastāva solu (APTES 0,06 : HCl 0,23/4,5, APTES 0,06 : HCl 0,23/ZAD 7,5/6,5, TEOS 0,09 : HF 0,8 : ZAD 7,5/5,5 un TEOS 0,14 : HF 1,6/2) pozitīvais efekts ir pārbaudīts ar modificētiem kaņepju atlikumiem armētos kompozītos. Ņemot vērā to, ka kaņepju spalvu iekšējie dobumi ir lieli, kompozīta lietošanas īpašību uzlabošanai varētu piemērot komponentes piesūcināšanu ar solu vakuumā.
5. Darbā pētīto TEOS bāzes solu iegūšanas process, salīdzinot ar APTES saturošiem šķīdumiem, ir energoresursu ietilpīgāks, jo TEOS saturošu šķīdumu sintēze notiek no 30 min līdz 40 min 50 °C temperatūrā ar sekojošu žāvēšanu 90 °C un karsēšanu 120 °C. APTES saturoši šķīdumi tiek maisīti istabas temperatūrā (23 °C), un sola sastāvā nav jāiekļauj etilspirts, taču ievērojami palielinās maisīšanas laiks (720 min).
6. Lai precīzāk prognozētu kompozītmateriāla lietošanas sfēru, būtu jāveic arī kompozītu bioloģiskās noturības pārbaudes pret mikroorganismiem, piemēram, patogēnajām sēnītēm. Literatūrā ir ziņas, ka darbā izmantotais sola modifikators cinka acetāta dihidrāts var kalpot kā dažādu mikroorganismu augšanu samazinošs reaģents.
7. Atkarībā no materiāla vēlamajām ekspluatācijas īpašībām, kompozītus ar zemu ūdens absorbciju un lēnu novecošanos iespējams lietot ārvides apstākļos. Iepakojumu materiāliem būtisks ir zems blīvums, piemēroti visi iegūtie kompozīti, ja tos nav plānots izmantot saskarē ar pārtiku. Interjeru nenesošajām konstrukcijām (izņemot telpas ar paaugstinātu gaisa mitrumu), paneļiem, līstēm, blīvēm, korpusiem un citiem mājtsaimniecības izstrādājumiem iespējams izvēlēties kompozītus ar atbilstošākajām mehāniskajām īpašībām un zemāku noturību pret ultravioleto starojumu, saskaņojot ar atbilstošajiem standartos noteiktajām prasībām.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Stokke D. D., Wu Q., Guangping H., Stevens C. V. (Ed.) Introduction to Wood and Natural Fiber Composites. – John Wiley & Sons, 2013. – 314 p.
2. Ram K., Bajpai P.K. Effect of Chemical Treatment on Thermal Properties of Natural Fibers. Journal of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 455, Iss. 1, 012114.
3. Das H., Kalita D. Recent development of Fiber Reinforced Composite Materials. Biosensor nanotechnology. – 2014. – pp. 441.–496.
4. Stramkale V., Freivalde, L., Kukle, S. Analysis of the Renewable Fiber Properties and Uses in Scale of Latvia.// 41st International Symposium on Novelties in Textiles 2010: Book of Symposium proceedings – Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Textiles, – 2010. – pp. 300.–325.
5. Courgneau C., Rusu D., Henneuse C., Ducruet V., Lacrampe M-F., Krawcsk P. Characterisation of low-odor emissive polylactide/cellulose fibre biocomposites for car interior. Express Polymer Letters – 2013. – Vol. 7., Iss. 9. – pp. 787.–804.
6. Thygesen A., Properties of Hemp Fibre Polymer Composites—An Optimization of Fibre Properties Using Novel Defibration Methods and Fibre Characterization. Thesis PhD. – Roskilde: Royal Agricultural and Veterinary University of Denmark. – 2006. – 147 p.
7. Thakur V. K. Green Composites from Natural Resources. – CRC Press, 2017. – 419 p.
8. Nestore O., Kajaks J., Reihmane S., Vancovica I. Physical and Mechanical Properties of Composites Based on Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) and Natural Fibre Waste. Mechanics of Composite Materials, – 2013. – Vol. 48., Iss. 6. – pp. 619.–628.
9. Dayo A. Q., Zegaoui A., Nizamani A. A., Kiran S., Wang J., Derradji M., Cai W., Liu W. The influence of different chemical treatments on the hemp fiber/polybenzoxazine based green composites: Mechanical, thermal and water absorption properties. Materials Chemistry and Physics. – 2018. – Vol. 217. – pp. 270.–277.
10. Murphy J. Modifying Specific Properties: Mechanical Properties – Fillers, Additives for Plastics Handbook. – Elsevier B. V. – 2001.–484 p.
11. Zelca Z., Vihodceva S., Kukle S. Sol-Gel Coating Processing Optimisation for Natural Fibers. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 66. – pp. 467.–472.
12. Brinker C. J., Scherer G. W. Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing – Academic Press – 2013.– 109 p.
13. Global Linear Low-density Polyethylene (LLDPE) Market 2017-2021, August 2017, Internet. – <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/linear-lowdensity-polyethylene.asp>.
14. Wang K., Addiego F., Laachachi A., Kaouache B. Dynamic behavior and flame retardancy of HDPE/hemp short fiber composites: Effect of coupling agent and fiber loading. Composite Structures – 2014. – Vol. 113., Iss. 1. – pp. 74.–82.

15. Othman M. H., Rosli M. S., Hasan S., Amin A. M., Hashim M. Y., Marwah O. M. F. and Amin S. Y. M. The Optimisation of Processing Condition for Injected Mould Polypropylene-Nanoclay-Gigantochloa Scortechinii based on Melt Flow Index. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2018. – Vol. 324. – ID 012073.
16. Solizenko R., Kajaks J., Nestore O., Kukle S. The Exploitation Properties of Hemp Fibres Containing Linear Low Density Polyethylene Composites. Materials Science and Applied Chemistry – 2013. – Vol. 27. – pp. 17.–21.
17. Elsabbagh A., Ramzy A. Steuernagel L. Ziegmann G. Models of flow behaviour and fibre distribution of injected moulded polypropylene reinforced with natural fibre composites. Composites Part B: Engineering – 2019. – Vol. 162. – pp. 198.–205.
18. Ashby F. Michael Materials Selection in Mechanical Design, Faurth Edition. – Butterworth-Heinemann, 2011. – 640 p.
19. Bitenieks J. Oglekļa nanocaurulītes saturoši termoplastiski polimērkompozīti. Promocijas darbs. – Rīga: RTU, 2018. – 179 lpp.
20. Son Y., Migler K. B. Cavitation of Polyethylene during Extrusion Processing Instabilities. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics – 2002. – Vol. 40 – pp. 2791.–2799.
21. LVS EN 933:2012 minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana – 2. d. Daļiņu izmēra sadalījuma noteikšana – Testēšanas sieti, atvēruma nominālie izmēri.
22. ISO 1183-1:2012 Plastmasas. Neporainu plastmasu blīvuma noteikšanas metodes. 1. daļa: Iegremdēšanas metode, šķidrumsa piknometra metode un titrēšanas metode.
23. LVS EN ISO 62:2008 Plastmasas. Ūdens absorbcijas noteikšana.
24. ASTM D 1238 – 90b Termoplastu plūsmas ātrums ar izspiešanas plastometru standarta metode.
25. ISO 527-2:2012 Plastmasas. Stiepes īpašību noteikšana. 2. daļa: Testēšanas noteikumi lietai un presētai plastmasai.
26. ASTM G 154 Fluorescējošās ultravioletās (UV) lampas ierīču standarta metode nemetālisku materiālu iedarbībai.
27. ASTM D523 Standarta testēšanas metode atstarotajai gaismai.