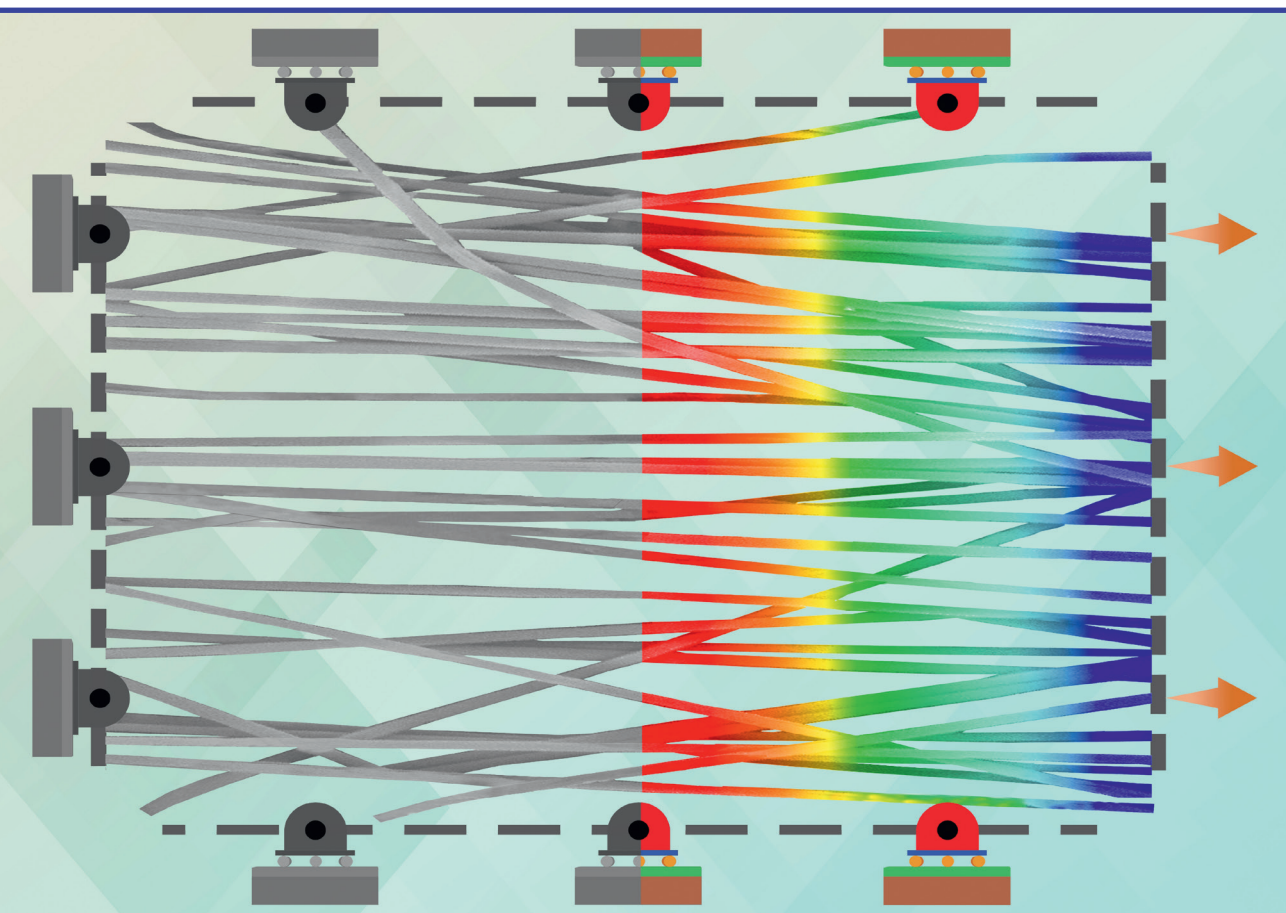


Jaymin Vrajlal Sanchaniya

PAN NANOŠĶIEDRU IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJAS, ĪPAŠĪBU UN LIETOJUMA IZPĒTE

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Jaymin Vrajlal Sanchaniya

Studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika (lietišķā mehānika)”

doktorants

PAN NANOŠĶIEDRU IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJAS, ĪPAŠĪBU UN LIETOJUMA IZPĒTE

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

asociētā profesore

Dr. sc. ing. Inga Ļašenko

profesors *Dr. sc. ing.*

Andrejs Krasņikovs

RTU Izdevniecība

Rīga 2024

Sanchaniya, J. V. PAN nanošķiedru izgatavošanas tehnoloģijas, īpašību un lietojuma izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 41 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-04" 2024. gada 5. jūnija lēmumu, protokols Nr. 04030-9.4.1/3.



Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda (projekts Nr. 8.2.2.0/20/I/008), Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras grantu programmas un Rīgas Tehniskās universitātes DAD (Departamenta atbalsts doktorantiem) programmas finansiālu atbalstu.

Vāka attēla autors Jaymin Vrajlal Sanchaniya.

<https://doi.org/10.7250/9789934370861>

ISBN 978-9934-37-086-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 18. jūlijā plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 420. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks *Ph. D.* Mārtiņš Irbe,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Dr.* Virginija Daukantiene,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

Profesors *Ph. D.* Yuris Dzenis,
University of Nebraska-Lincoln, ASV

APSTIPRINĀJUMS

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

Jaymin Vrajlal Sanchaniya
Datums: 02.03.2024.



Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, 60 attēlu, astoņas tabulas, kopējais lappušu skaits – 150, ieskaitot pielikumus. Bibliogrāfijas sarakstā ir 159 nosaukumi.

SATURS

Promocijas darba aktualitāte	5
Darba mērķis	5
Pētniecības uzdevumi.....	5
Darba zinātniskā novitāte	6
Darba praktiskā vērtība	7
Pētniecības metodes	7
Aizstāvēšanai izvirzītās hipotēzes.....	8
PROMOCIJAS DARBA SATURS	12
1. nodaļa. Literatūras apskats.....	12
2. nodaļa. PAN nanošķiedru paklāju izgatavošana	12
3. nodaļa. Nanošķiedru mata mehānisko īpašību noteikšanas GE modelis	18
4. nodaļa. Atkvēlināšanas ietekme uz PAN nanošķiedrām.....	24
5. nodaļa. Ar <i>PVA</i> saistītu PAN nanošķiedru pārklājumu izpēte.....	27
6. nodaļa. Ar PAN nanošķiedrām stiegroti laminēti tekstilmateriāli	33
SECINĀJUMI.....	38
IZMANTOTĀ LITERATŪRA.....	40

Promocijas darba aktualitāte

Promocijas darbā apskatīti procesi nanotehnoloģiju jomā, īpaši koncentrējoties uz poliakrilonitrila (PAN) nanošķiedru izpēti un izmantošanu. Tajā padziļināti pētītas PAN nanošķiedru izgatavošanas metodes, kā arī to mehāniskās un termiskās īpašības, atklājot arī šo šķiedru praktiskās lietošanas potenciālu.

Darba pamatā ir literatūras analīze, papildinot to ar veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem. Izpētot nanošķiedru izgatavošanas metodes, īpaši elektrovērpšanu, un noskaidrojot dažādu metodoloģiju ietekmi uz PAN nanošķiedru īpašībām un lietojumu, šajā pētījumā atklāti veidi, kā optimizēt to lietderību. Promocijas darbā pētīta PAN nanošķiedru lietojamība filtrācijā, biomedicīnā un konstruktīvajos materiālos.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir analizēt poliakrilonitrila (PAN) nanošķiedras, izpētot to izgatavošanas tradicionālās un jaunās metodes, kā arī šo šķiedru mehāniskās un termiskās īpašības un izmantošanas iespējas. Šī darba mērķis ir, izstrādājot galīgo elementu (GE) modeli, modelēt PAN nanošķiedru mehānisko uzvedību. Koncentrējoties uz elektrovērpšanas procesa optimizāciju un eksperimentiem ar jaunām izgatavošanas metodēm, mērķis ir uzlabot PAN nanošķiedru veiktspēju un lietojamību dažādās nozarēs, tostarp filtrēšanā, biomedicīnā un strukturālo materiālu izgatavošanā.

Pētniecības uzdevumi

- 1. Literatūras pārskats.** Veikt plašu esošās literatūras analīzi, lai apzinātu pašreizējo situāciju pētāmajā jomā.
- 2. Izgatavošanas metodes.** Izpētīt dažādas PAN nanošķiedru izgatavošanas metodes, īpašu uzmanību pievēršot elektrovērpšanai. Tas ietver eksperimentus gan ar tradicionālām, gan jaunām, netradicionālām izgatavošanas metodēm, lai uzlabotu nanošķiedru kvalitāti un funkcionalitāti.
- 3. Izstrādāt galīgo elementu (GE) modeli.** Formulēt GE modeli, lai precīzi prognozētu PAN nanošķiedru mehānisko uzvedību. Šis uzdevums ietver modeļa kalibrēšanu un validāciju, salīdzinot modelēšanas rezultātus ar eksperimentālajiem datiem, lai nodrošinātu rezultātu ticamību.

4. **Eksperimentāli analizēt mehāniskās un termiskās īpašības.** Veikt eksperimentālus pētījumus, lai novērtētu PAN nanošķiedru mehāniskās un termiskās īpašības, tostarp izgatavošanas parametru ietekmi.
5. **Novērtēt fizikālo iedarbību ietekmes.** Izpētīt atkvēlināšanas ietekmi, lai modificētu PAN nanošķiedru strukturālās un funkcionālās īpašības. Izpētīt, kā uzlabot šķiedru veiktspēju, izmantojot pēcapstrādes procesus.
6. **Izpētīt PAN nanošķiedru integrēšanu laminētos tekstilmateriālos.** Izmantot PAN nanošķiedru iestrādāšanu laminētos (slāņainos) tekstilizstrādājumos, lai uzlabotu tekstilmateriālu strukturālo integritāti un funkcionālās īpašības.

Šo pētījumu mērķis ir attīstīt PAN nanošķiedru tehnoloģiju jomu, padziļinot izpratni par to izgatavošanas metodēm.

Darba zinātniskā novitāte

Nozīmīga novitāte šajā pētījumā ir atkvēlināšanas procesa izpēte, kas var kalpot kā metode, lai uzlabotu PAN nanošķiedru mehāniskās un termiskās īpašības. Rūpīgi analizējot atkvēlināšanas temperatūras ietekmi uz PAN nanošķiedram, promocijas darbā noskaidrota sakarība starp atkvēlināšanas apstākļiem un izrietošajām nanošķiedru īpašību izmaiņām. Šī padziļinātā termiskās apstrādes izpēte sniedz būtisku ieskatu PAN nanošķiedru īpašību uzlabošanā.

Turklāt promocijas darba gaitā izstrādāta jauna, netradicionāla metode, kas ietver PAN nanošķiedru pārklāšanu ar polivinilspirta (*PVA*) šķīdumu. Izpētot rezultātus, pētījums atklāj PAN nanošķiedru uzlabotas mehāniskās īpašības un jaunas funkcionālās īpašības, paverot iespējas jauniem lietojumiem.

Galīgo elementu (*GE*) modelis piedāvā veikt mehāniskās uzvedības prognozēšanu PAN nanošķiedru izstrādājumiem ar haotisku un orientētu struktūru, integrējot empīriskos datus, kas iegūti eksperimentos ar iegremdēšanu *PVA*. Šī prognozēšanas spēja nodrošina nanošķiedru īpašību pielāgošanu konkrētām lietojuma vajadzībām bez plašas empīriskās testēšanas.

Kopumā darba zinātniskais devums saistīts ar atlaidināšanas efekta izpēti, sākot ar *PVA* iegremdēšanas kā netradicionālas metodes izmantošanu un beidzot ar prognozēšanas *GE* modeļa izstrādi. Šie jauninājumi sniedz dziļāku izpratni par manipulācijām ar nanošķiedru īpašībām.

Darba praktiskā vērtība

Promocijas darba praktiskā vērtība, pirmkārt, ir uzlabotie PAN nanošķiedru izgatavošanas procesi, tostarp atkvēlināšanas metode un iegremdēšana *PVA*, kas nozares speciālistiem piedāvā jaunas iespējas, lai ražotu nanošķiedras ar uzlabotām īpašībām. Šie procesi ļauj pielāgot PAN nanošķiedru mehāniskās un termiskās īpašības, padarot tās piemērotas filtrēšanai un lietošanai aizsargtekstilā un biomedicīnas ierīču komponentēs, tādējādi apmierinot pieaugošo pieprasījumu pēc augstas veiktspējas materiāliem.

Šajā darbā izstrādātā galīgo elementu (GE) modeļa praktiskais lietojums nodrošina rīku PAN nanošķiedru uzvedības prognozēšanai dažādos apstākļos. Šis modelis palīdz projektēt un izstrādāt produktus uz nanošķiedru bāzes, ievērojami samazinot laiku un resursus, kas tiek tērēti empīriskiem testiem. Ražotāji var izmantot šo modeli, lai simulētu dažādus ražošanas scenārijus un pēcapstrādes procesus, optimizējot produktu dizainu konkrētiem lietojumiem ar uzlabotu efektivitāti un rentabilitāti.

Turklāt PAN nanošķiedru lietošana tekstilizstrādājumos, kas nav laminēti, ir praktiska nozīme. Palielinot tekstilmateriālu mehānisko stiprību, šis lietojums paver iespējas jaunu kompozītmateriālu radīšanā. Šie materiāli varētu būt izmantojami tādās nozarēs kā kosmiskā aviācija, automobiļu rūpniecība un būvniecība, kur pieprasījums pēc viegliem, bet izturīgiem materiāliem nepārtraukti pieaug.

Pētniecības metodes

Promocijas darbā izmantotās metodes var iedalīt vairākās kategorijās.

1. Eksperimentālās metodes. Darba pamatā ir eksperimentālās metodes. Šajā kategorijā ietilpst:

- elektrovērpšana – PAN nanošķiedru iegūšanas process, izmantojot elektrovērpšanu, dažādu parametru ietekmes izpēte uz šķiedru kvalitāti;
- atkvēlināšana – termiskās apstrādes metode, ko izmanto, lai modificētu PAN nanošķiedru mehāniskās un termiskās īpašības, karsējot tās iepriekš noteiktā temperatūrā;
- pārklāšana ar *PVA* šķīdumu – pieeja, lai uzlabotu nanošķiedru īpašības, pārklājot tās ar polivinilspirta šķīdumu, analizējot iegūtās strukturālo un funkcionālo īpašību izmaiņas;
- skenējošā elektronu mikroskopija (SEM) – PAN nanošķiedru mikrostrukturālas analīze; SEM nodrošina detalizētus attēlus;

- stiepes pārbaudes – veiktas, lai izmērītu nanošķiedru mehānisko stiprību un stingumu;
 - termiskā analīze – veikta, lai noteiktu nanošķiedru termiskās īpašības un sagraušanas temperatūru; izmantota diferenciālā skenēšanas kalorimetrija (*DSC*) un termogravimetriskā analīze (*TGA*);
 - porainības noteikšana – ļauj novērtēt nanošķiedru paklāju poru struktūru un sadalījumu, kas ir būtisks faktors izstrādājumiem, kam nepieciešamas īpašas filtrēšanas spējas vai izstrādājumiem audu inženierijai.
- 2. Galīgo elementu modelēšana (GEM).** Šī pieeja ietver skaitliska modeļa izstrādi, lai prognozētu PAN nanošķiedru mehānisko uzvedību. GEM ir izšķiroša nozīme šķiedru:
- mehāniskās uzvedības modelēšanā, jo, veicot mehāniskās pārbaudes, dod iespēju gūt ieskatu par to, kā nanošķiedras reaģē uz slodzes izmaiņām;
 - parametru jutīguma analīzē, jo rada izpratni par to, kā dažādi izgatavošanas un apstrādes parametri ietekmē nanošķiedru īpašības.
- 3. Datu analīzes metodes.** Svarīgas, lai interpretētu lielu datu apjomu, kas iegūts, izmantojot eksperimentālās un modelēšanas metodes. Šajā kategorijā ietilpst:
- statistiskā analīze, kas izmantota, lai analizētu stiepes testus, termiskās analīzes un citu eksperimentu rezultātus, kas palīdz noteikt modeļus, tendences un sakarības;
 - modeļa validācija, kas ietver eksperimentālo datu izmantošanu, lai pārbaudītu galīgo elementu modeļa precizitāti, nodrošinot tā uzticamību prognozēšanas mērķiem.

Aizstāvēšanai izvirzītās hipotēzes

1. Pētījuma rezultāts ir poliakrilnitrila (PAN) nanošķiedru izgatavošana ar haotisku un orientētu struktūru. Tas ir pamats, lai izprastu šķiedru orientācijas ietekmi uz iegūto nanošķiedru paklāju mehāniskajām un fizikālajām īpašībām. Manipulējot ar elektrovērpšanas parametriem, tiek iegūta nanošķiedru strukturālās orientācijas kontrole, kas ļauj izstrādāt šķiedras, kas pielāgotas konkrētiem lietojumiem.
2. Atkvēlināšanā būtiski uzlabo PAN nanošķiedru mehāniskās īpašības, tostarp stiepes stiprību un stingumu. Turklāt šis process ietekmē termiskās īpašības, piemēram, termisko stabilitāti un sagraušanas temperatūru.

3. Kā jauna pieeja PAN nanošķiedru modificēšanai izmantota netradicionāla iegremdēšanas metode PVA šķīdumā. Šāda apstrāde ne tikai uzlabo nanošķiedru mehāniskās īpašības, bet arī ievieš jaunas funkcionālās īpašības, paplašinot to lietojumu dažādās jomās.
4. Galīgo elementu (GE) modelis un tā validācija, lai prognozētu PAN nanošķiedru mehānisko uzvedību. Šis modelis, verificēts ar eksperimentu datiem, kalpo kā rīks nanošķiedru uzvedības simulēšanai, samazinot nepieciešamību veikt plašas fizikālās pārbaudes.

PĒTĪJUMA REZULTĀTU APROBĀCIJA

Q1 ranžējuma žurnālu raksti

1. **Sanchaniya, J. V.**, Lasenko, I., Gobins, V., & Kobeissi, A. (2024). A Finite Element Method for Determining the Mechanical Properties of Electrospun Nanofibrous Mats. *Polymers (Basel)*, 16 (6), 852. <https://doi.org/10.3390/polym16060852>.
2. **Sanchaniya, J. V.**, Lasenko, I., Vijayan, V., Smogor, H., Gobins, V., Kobeissi, A., & Goljandin, D. (2024). A Novel Method to Enhance the Mechanical Properties of Polyacrylonitrile Nanofiber Mats: An Experimental and Numerical Investigation. *Polymers (Basel)*, 16 (7), 992. <https://doi.org/10.3390/polym16070992>.
3. **Sanchaniya, J. V.**, Lasenko, I., Kanukuntala, S. P., Smogor, H., Viluma-Gudmona, A., Krasnikovs, A., Gobins, V., & Tipans, I. (2023). Mechanical and thermal characteristics of annealed-oriented PAN nanofibers. *Polymers (Bael)*. <https://doi.org/10.3390/polym15153287>.
4. **Sanchaniya, J. V.**, Lasenko, I., Kanukuntla, S. P., Mannodi, A., Viluma-gudmona, A., & Gobins, V. (2023). Preparation and Characterization of Non-Crimping Laminated Textile Composites Reinforced with Electrospun Nanofibers. *Nanomaterials*, 13 (13), 1949. <https://doi.org/10.3390/nano13131949>.

Q3 ranžējuma žurnāla raksts

5. **Sanchaniya, J. V.** (2024). Comparative Analysis of Thermal Characteristics: Virgin Polyacrylonitrile (PAN) Versus Electrospun PAN Nanofiber Mats. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. Accepted Article.

Citi žurnālu raksti un konferenču tēzes

Pārējie pētījumu rezultāti ir atspoguļoti vēl 16 zinātniskajās publikācijās.

6. **Sanchaniya, J. V.**, Dobariya, S. P., & Lasenko, I. (2024). Mechanical and Thermal Properties of Nanocomposites Reinforced with Pan Nanofiber Mats. *Latvian Journal of physics and technical sciences*. Accepted Article.
7. **Sanchaniya, J. V.**, Rana, V., & Vejanand, S. R. (2024). Optimization of Electrospinning Parameters for High-Strength Oriented Pan Nanofiber Mats. *Latvian Journal of physics and technical sciences*. Accepted Article.
8. **Sanchaniya, J. V.**, Muraleedharan, H. K., & Lasenko, I. (2024). Influence of Iron (III) Oxide Nanorods on The Mechanical and Thermal Properties of Pan Nanofiber Mats. *Latvian Journal of physics and technical sciences*. Accepted Article.
9. **Sanchaniya, J. V.**, & Moothedath, G. (2024). Deformation Behaviour of Oriented Electrospun Pan Nanofiber Mats. *Latvian Journal of physics and technical sciences*. Accepted Article.
10. **Sanchaniya, J. V.**, Soni, T., & Lasenko, I. (2024). Development and Characterization of Biaxial Pan Nanofiber Mats. *Latvian Journal of physics and technical sciences*. Accepted Article.
11. Lasenko, I., **Sanchaniya, J. V.**, Kanukuntla, S. P., Ladani, Y., Viluma-Gudmona, A., Kononova, O., Lusic, V., Tipans, I., & Selga, T. (2023). The mechanical properties of nanocomposites reinforced with PA6 electrospun nanofibers. *Polymers (Basel)*, 15, doi: 10.3390/polym15030673.
12. Lasenko, I., Grauda, D., Butkauskas, D., **Sanchaniya, J. V.**, Viluma-Gudmona, A., & Lusic, V. (2022). Testing the physical and mechanical properties of polyacrylonitrile nanofibers reinforced with *succinite* and *silicon dioxide* nanoparticles. *Textiles*, 2, 162–173, doi: 10.3390/textiles2010009.
13. **Sanchaniya, J. V.**, Kanukuntla, S. P., & Senyurt, K. B. (2023). Fabrication and mechanical properties of polymer composite nanofiber mats. *22nd Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc. 2023*, 22, 85–90, doi: 10.22616/ERDev.2023.22.TF014.
14. Kanukuntla, S. P., **Sanchaniya, J. V.**, & Kardani, U. (2023). Numerical simulation of polymeric composite nanofiber mat. *22nd Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc. 2023*, 22, pp. 790–795, doi: 10.22616/ERDev.2023.22.TF156.
15. Kanukuntla, S. P., **Sanchaniya, J. V.**, & Beresnevics, V. (2023). Comparative dsc analysis of virgin and nanofiber mats of pa6. *22nd Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc. 2023*, 22, 539–543, doi: 10.22616/ERDev.2023.22.TF113.

16. **Sanchaniya, J. V.**, & Kanukuntla, S. P. (2023). Morphology and mechanical properties of PAN nanofiber mat. *J. Phys. Conf. Ser.* 2023, 2423, 012018, doi: 10.1088/1742-6596/2423/1/012018.
17. **Sanchaniya, J. V.**, Kanukuntla, S. P., Modappathi, P., & Macanovskis, A. (2022). Mechanical behaviour numerical investigation of composite structure, consisting of polymeric nanocomposite mat and textile. *21st Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc.* 2022, 21, 720–726, doi: 10.22616/erdev.2022.21.tf225.
18. **Sanchaniya, J. V.**, Kanukuntla, S. P., Shereef, A., & Kaneps, J. (2022). Modelling and analysis of composite polyacrylonitrile nanofiber mats utilized to strengthen motorbike side panel. *21st Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc.* 2022, 21, 727–736, doi: 10.22616/erdev.2022.21.tf226.
19. **Sanchaniya, J. V.**, Kanukuntla, S. P., Simon, S., & Gerina-Ancane, A. (2022). Analysis of mechanical properties of composite nanofibers constructed on rotating drum and collector plate. *21st Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc.* 2022, 21, 737–744, doi: 10.22616/erdev.2022.21.tf227.
20. Viluma-Gudmona, A., Lasenko, I., **Sanchaniya, J. V.**, & Podgornovs, A. (2021). Electro-resistant biotextile development based on fiber reinforcement with nano particles. In *20th Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc.* 2021, pp. 804–812, doi: 10.22616/ERDev.2021.20.TF182.
21. Viluma-Gudmona, A., Lasenko, I., **Sanchaniya, J. V.**, & Abdelhadi, B. (2021). The amber nano fibers development prospects to expand the capabilities of textile 3D printing in the general process of fabrication methods. *20th Int. Sci. Conf. Eng. Rural Dev. Proc.* 2021, pp. 248–257, doi: 10.22616/ERDev.2021.20.TF051.

Piezīme. Visas uzskaitītās publikācijas ir indeksētas *SCOPUS* vai *Web of Science* datubāzēs.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

1. nodaļa. Literatūras apskats

Promocijas darba 1. nodaļā pētīti pieejamie darbi, kas saistīti ar poliakrilonitrila (PAN) nanošķiedrām, pozicionējot šo pētījumu nanotehnoloģiju un materiālzinātnes jomās. Aplūkotas izgatavošanas metodes, kas izstrādātas un pilnveidotas, īpašu uzmanību pievēršot elektrovērpšanai. Šajā segmentā kritiski izvērtētas ar dažādām izgatavošanas metodēm saistītās priekšrocības un problēmas, aplūkojot, kā tās ietekmē nanošķiedru morfoloģiju, izlīdzināšanu un kvalitāti. Turklāt nodaļā ir sniegta PAN nanošķiedru mehānisko, termisko un ķīmisko īpašību analīze, uzsverot, kā šīs īpašības var pielāgot, izmantojot izgatavošanas parametrus, pēcapstrādes procesus un dažādu piedevu vai leģējošo vielu integrēšanu.

PAN nanošķiedru lietojumu izpēte atklāj to daudzpusību, kas aptver tādas jomas kā filtrēšana, biomedicīnas ierīces (*Xue et al.*, 2019), strukturālie materiāli (*Bidhar et al.*, 2021, *Papkov et al.*, 2019; *Papkov et al.*, 2013; *Papkov et al.*, 2013), enerģijas uzglabāšana (*Al-abduljabbar & Farooq*, 2023; *Chhetri et al.*, 2022) u. c. Šajā nodaļā ne tikai parādīts lietojumu klāsts, bet arī pievērsta uzmanība galvenajiem pētniecības ieguldījumiem un izpētei, kas demonstrē PAN nanošķiedru ietekmi reālu problēmu risināšanā.

Literatūras pārskatā identificētas pētniecības nepilnības un nākotnes virzieni. Diskusijā par teorētiskajiem modeļiem akcentēta galīgo elementu modelēšanas (GEM) nozīme nanošķiedru uzvedības prognozēšanā.

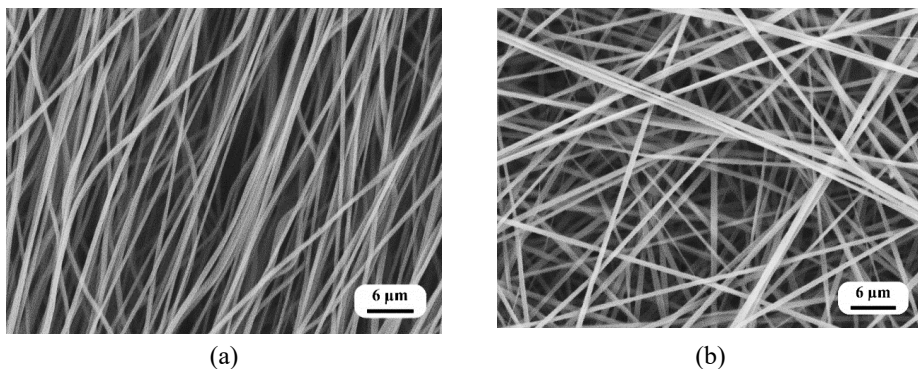
Apvienojot vēsturiskās atziņas, izgatavošanas metožu un īpašību kritisku analīzi un pētniecības tendenču perspektīvu, uzsvērtā nepieciešamība pētīt PAN nanošķiedru mehāniku.

2. nodaļa. PAN nanošķiedru paklāju izgatavošana

2. nodaļā detalizēti aplūkotas poliakrilonitrila (PAN) nanošķiedru izgatavošanā izmantotās metodoloģijas, īpašu uzmanību pievēršot elektrovērpšanas procesiem, kas pielāgoti gan nejaušas, gan orientētas struktūras iegūšanai. Šīs nodaļas saturs ir pieejams arī publicētā versijā (*Sanchaniya*, 2024; *Sanchaniya, Lasenko, Gobins et al.*, 2024).

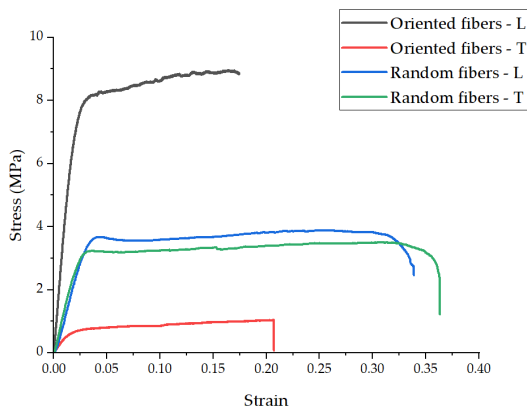
PAN aplūkots kā vēlamais materiāls nanošķiedru izgatavošanai, nosakot nozīmi to mehānisko īpašību, termiskās stabilitātes un ķīmiskās izturības dēļ. Šajā kontekstā pētīta elektrovērpšanas tehnika, uzsverot tās metodes daudzpusību, kas ļauj precīzi kontrolēt nanošķiedru morfoloģiju. Analizēti faktori, kas ietekmē elektrovērpšanas procesu, tostarp polimēra koncentrācija, šķīdinātāja veids, plūsmas ātrums, spriegums un kolektora

konstrukcija, ņemot vērā to nozīmi iegūto nanošķiedru paklāju kvalitātes un īpašību noteikšanā. SEM fotogrāfijās (1. att.) redzami nanošķiedru paklāji ar orientētu un nejaušu struktūru, izmantojot rotējošu cilindru un plakānu kolektoru.



1. att. Nanošķiedru paklāju SEM fotogrāfijas: (a) orientētas nanošķiedras; (b) nejauši veidotas nanošķiedras.

Lai noskaidrotu orientētu nanošķiedru struktūru reakciju uz stiepes spēkiem, veikts stiepes tests. Rezultāti parādīti 2. attēlā. Orientēto nanošķiedru paraugiem ir iegūta stiprība (*longitudinal ultimate tensile strength, LUTS*) ($8,9 \pm 0,5$) MPa gar šķiedru orientāciju, kas ievērojami pārsniedz perpendikulārā virzienā novēroto (*transverse ultimate tensile strength, TUTS*) ($1,1 \pm 0,1$) MPa. Šis stiepes stiprība kontrasts uzsvēr orientēto nanošķiedru paklāju mehāniski anizotropo raksturu, kur šķiedru izvietojums būtiski ietekmē to stiepes īpašības. Turpretī haotiski strukturētu paklāju stiprības vērtības saglabājās nemainīgas abās asīs, reģistrējot ($3,9 \pm 0,4$) MPa un ($4,0 \pm 0,5$) MPa vērtības, kas liecina par to kvaziizotropo mehānisko uzvedību.

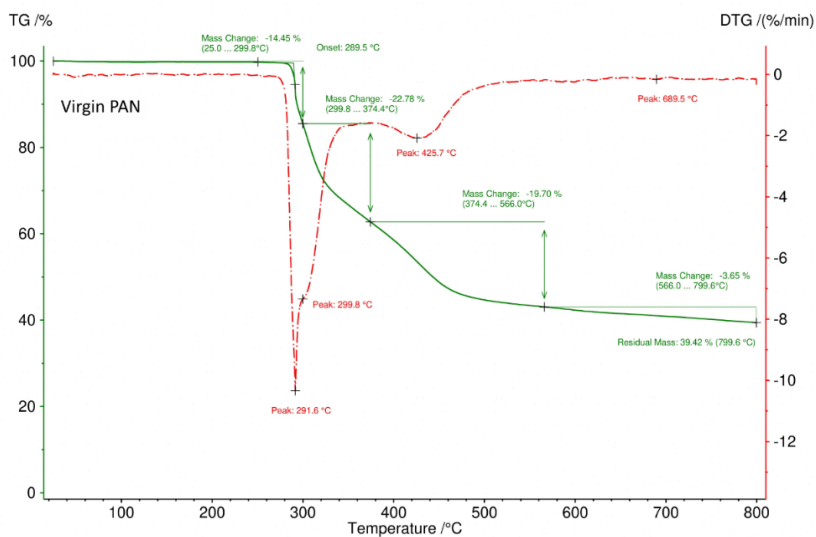


2. att. Sprieguma un deformācijas grafiki orientētām un haotiskām struktūrām slogojot garenvirzienā (L) un šķērsvirzienā (T).

Izpētot stingumu, izmantojot Junga moduļa mērījumus, orientēti nanošķiedru paklāji uzrādīja ievērojami lielāku stingrību garenvirzienā, kur modulis bija (410 ± 23) MPa, ievērojami pārsniedzot šķērsvirziena mērījumu (53 ± 5) MPa. Tas vēlreiz uzsver šo paklāju anizotropās īpašības. Turpretī haotiski strukturētu paklāju gadījumā Junga modulis uzrādīja vienmērīgu profilu ar mērījumiem (103 ± 4) MPa un (99 ± 5) MPa, kas liecina par izotropi orientētu materiāla stingrību.

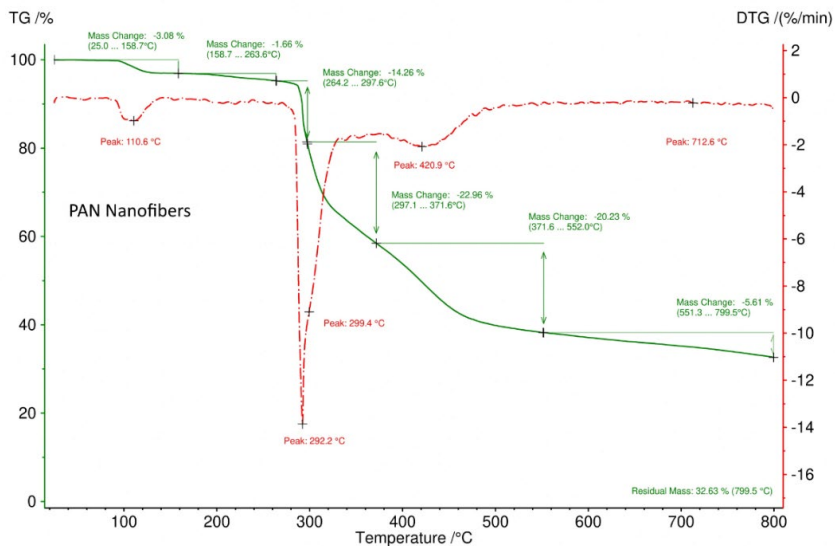
Viskozā, plastiskā uzvedība, ko apliecina pagarinājums pārraušanas brīdī, bija atšķirīga abās strukturālajās orientācijās un virzienos. Orientētās nanošķiedras ieguva šādas pārraušanas pagarinājuma vērtības: $0,19 \pm 0,02$ garenvirzienā; $0,2 \pm 0,03$ šķērsvirzienā. Savukārt haotiski strukturētās šķiedras uzrādīja lielākas viskozi plastiskas deformācijas un pagarinājums pārraušanas brīdī sasniedza attiecīgi $0,35 \pm 0,03$ un $0,36 \pm 0,04$.

TGA līkne neapstrādātam PAN (3. att., zaļā līnija) apliecina masas zudumu procentuālo daļu temperatūras diapazonā, savukārt DTG līkne (3. att., sarkanā līnija) sniedz detalizētu ieskatu masas zudumu ātrumā, atvieglojot precīzu kritiskas temperatūras noteikšanu. Neapstrādāta PAN analīze atklāj ievērojamu termisko stabilitāti līdz $289,5$ °C temperatūrai, pēc kuras sākas sabrukšana, par ko liecina $291,6$ °C sākuma temperatūra. Starp 25 °C un $299,8$ °C novēroti $14,15$ % masas zudumi, kas liecina par termiskās degradācijas sākumu.



3. att. TGA un DTG no neapstrādātam PAN šķiedrām.

4. attēlā redzamās PAN nanošķiedru TGA un DTG līknes rāda agrīnu masas samazināšanos 110,6 °C temperatūrā. Tā saistīta ar N,N-dimetilformamīda (DMF), kas izmantots kā šķīdinātājs elektrovērpšanas procesā, iztvaikošanu aptuveni 3,08 % apmērā. Masas zudums temperatūrā no 25,0 °C līdz 158,7 °C reģistrēts 3,08 %, no 158,7 °C līdz 297,6 °C reģistrēts turpmāks samazinājums par 1,66 %. Ievērojams masas zudums 14,26 % apmērā notika temperatūrā no 264,2 °C līdz 297,6 °C, kas liecina par kritisko noārdīšanās fāzi.

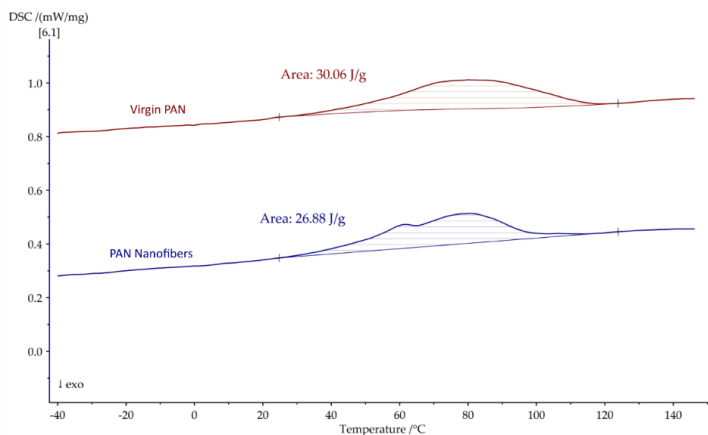


4. att. TGA un DTG PAN nanošķiedras matam.

Šī TGA un DTG analīze sniedz ieskatu gan neapstrādāta PAN, gan tā nanošķiedru termiskās stabilitātes un degradācijas modeļos. Rezultāti izgaismo termiskās pārejas un noārdīšanās kinētiku, kas ir ļoti svarīgi, lai izprastu materiāla veiktspēju augstas temperatūras apstākļos.

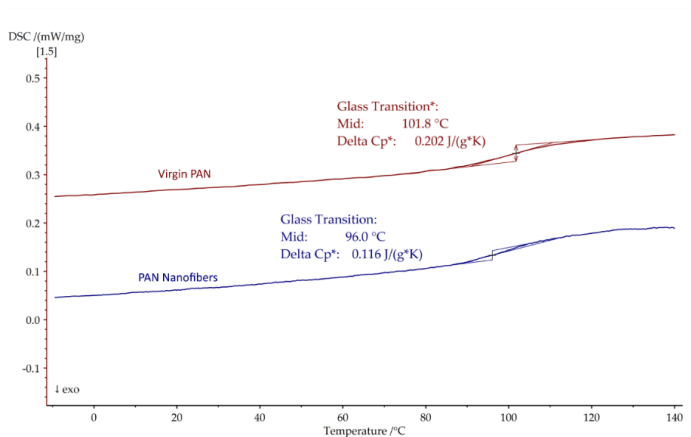
Diferenciālā skenēšanas kalorimetrija (*DSC*) sniedz datus par materiālu termiskajām pārejām, mērot siltuma plūsmu, kas saistīta ar materiāla fāžu izmaiņām. Šajā pētījumā apstrādāta poliakrilnitrila (PAN) un PAN nanošķiedru *DSC* analīze termiskā cikla laikā ļauj veikt detalizētu to termiskās uzvedības izpēti.

Sākotnējā sildīšanas fāzē (5. att.) redzams, ka neapstrādātajam PAN piemīt 30,06 J/g siltuma absorbcija, savukārt PAN nanošķiedras uzrāda nedaudz mazāku siltuma absorbciju – 26,88 J/g. Šajā fāzē siltuma absorbcijas profilā atklājās divi nozīmīgi maksimumi, kas, iespējams, atbilst šķīdinātāja iztvaikošanas procesam.



5. att. Pirmais sildīšanas cikls neapstrādāta PAN un PAN nanošķiedras *DSC* režīmā.

Nākamais sildīšanas cikls (6. att.) vēl vairāk precizēja šos novērojumus. Neapstrādāta PAN T_g reģistrēts $101,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, savukārt PAN nanošķiedru T_g bija aptuveni $96,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, kas nozīmē samazinājumu par aptuveni 5 %. Turklāt siltumspējas izmaiņas (ΔC_p^*) starp abiem materiāliem liecināja par ievērojamu atšķirību; neapstrādāts PAN uzrādīja ΔC_p^* $0,202\text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$, savukārt PAN nanošķiedrām reģistrēta zemāka vērtība – $0,116\text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$, kas ir par 42 % mazāk.



6. att. Otrais sildīšanas cikls neapstrādātām PAN nanošķiedrām un PAN nanošķiedrām *DSC* režīmā.

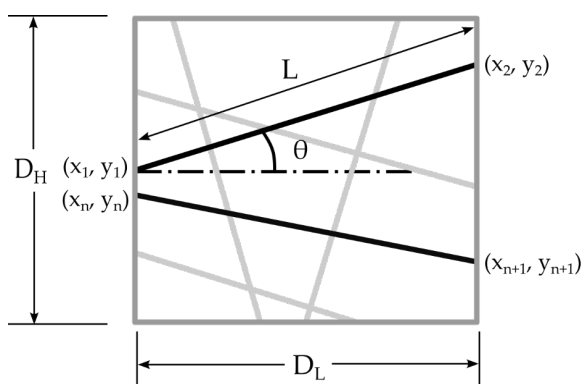
Nodaļas nobeigumā sniegta izpratne par dažādas struktūras PAN nanošķiedru paklāju izgatavošanas metodēm, tostarp par stratēģiskajām modifikācijām, ko piemēro, lai optimizētu to mehāniskās īpašības, termisko pretestību un porainību. Šī metodoloģiju izpēte pamato promocijas darba ieguldījumu nanošķiedru tehnoloģiju jomā.

3. nodaļa. Nanošķiedru mata mehānisko īpašību noteikšanas GE modelis

3. nodaļā aplūkota galīgo elementu (GE) modeļa izstrāde un validācija. Tas izstrādāts, lai prognozētu un analizētu elektriski savērptas PAN nanošķiedras paklāju mehāniskās īpašības. Šīs nodaļas saturs ir pieejams arī publicētā versijā (*Sanchaniya, Lasenko, Gobins et al.*, 2024).

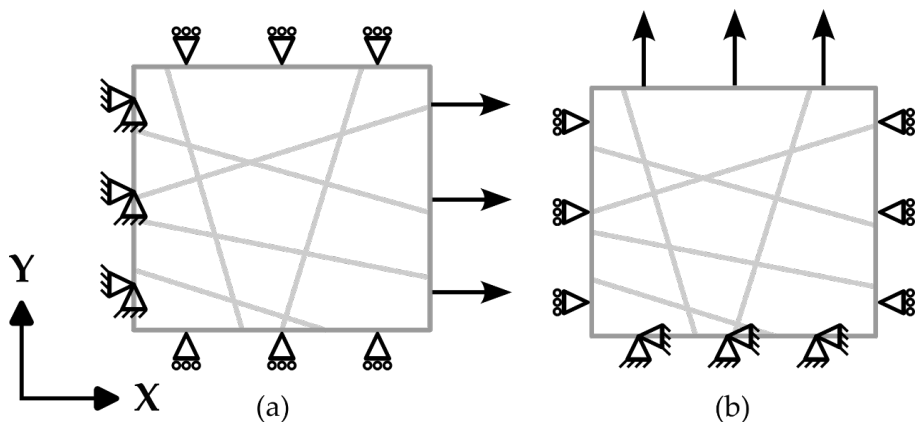
Jāuzsver, ka ir svarīgi modelēt PAN nanošķiedru paklāju mehāniskās īpašības, ņemot vērā to lietojumu dažādās jomās. GE modeļa izstrādes pamatā ir dati, kas iegūti iepriekšējās nodaļās aprakstītajos eksperimentos, iekļaujot tādus lielumus kā šķiedru orientācija, diametrs, sadalījums un pēcapstrādes apstrādes ietekme, piemēram, atkvēlināšana un iegremdēšana PVA.

Konstruējot galīgo elementu (GE) modeli, izmantota ģeometriskās modelēšanas stratēģija, kuras centrā bija parametriskā attēlojuma izstrāde, lai atdarinātu nanošķiedru struktūru (7. att.). Šā parametriskā modeļa izveidē noteiktas taisnas šķiedras ar vienādu diametru, kas vienmērīgi izvietotas noteiktā plaknē, ko raksturo zināms apgabala garums (D_L) un augstums (D_H).



7. att. Nanošķiedru ģeometrijas izstrādes procesa shematiskais attēlojums, uzsverot šķiedru orientācijas un izvietojuma kontroli apgabalā.

Robežnosacījumi redzami 8. (a) un (b) attēlā. Šķiedru galiem piemērotais pārvietojums aptver līdz 20 % no apgabala garuma, nosakot ierobežojumu kustībai negatīvā virzienā Y un Z ašu virzienā garenvirziena slodzes gadījumā un X un Z asīs šķērsvirziena slodzes gadījumā.



8. att. Robežnosacījumi, ko piemēro: (a) garenvirzienā; (b) šķērsvirzienā, lai simulētu normālā sprieguma reakciju uz pārvietojumu.

GE modelī ir pieņemts šāds materiāla modelis: materiāls ir lineāri elastīgs līdz stāvoklim kad tā deformācija sasniedz plastisko robežu ε_y . (ε – šķiedras deformācija tās virzienā, E – Junga modulis, σ – stiepes spriegums):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ ja } \varepsilon \leq \varepsilon_y. \quad (1)$$

Elastības-plastikas pārejas nelineārā uzvedība aprakstīta 2. vienādojumā.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n, \quad (2)$$

kur K un n – skaitliskie koeficienti.

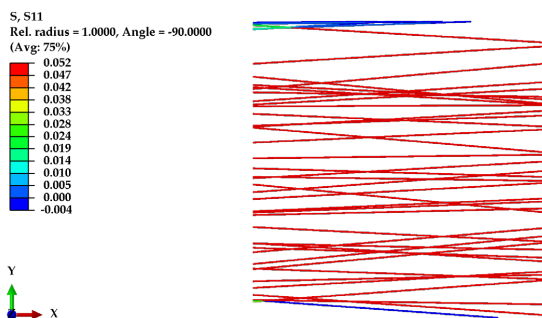
Bojājumu uzkrāšanos modelis aplūko enerģijas lielumu G_f , ko jāuzkrāj atsevišķai nanošķiedrai, lai tā sprieguma ietekmē zaudētu savu nestspēju.

$$G_f = \frac{1}{2} \sigma_f \cdot \Delta_f, \quad (3)$$

kur G_f – enerģija ($\mu\text{N}/\text{mkm}$), ko atsevišķa nanošķiedra uzkrāj līdz tās nestspējas zaudēšanas momentam; σ_f – spriegums; Δ_f – lineārais plastiskais pārvietojums nestspējas zaudēšanas brīdī.

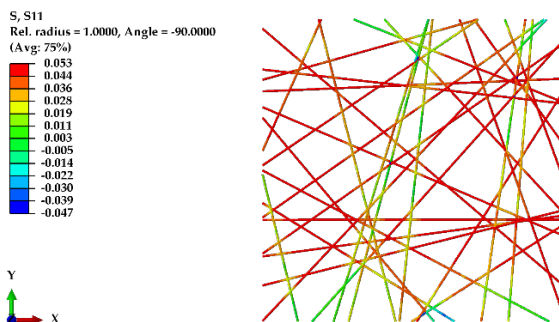
Kopā šie trīs vienādojumi veido pētījumā izmantotā materiāla modeļa pamatu, kas ļauj veikt visaptverošu nanošķiedru mata mehānisko raksturlielumu analīzi no elastības reakcijas, ņemot vērā plastisko deformāciju līdz galīgai sagraušanai.

9. attēlā redzams normāls spriegums gar X asi orientētā paklājā nanošķiedrās, kad tas ir pakļauts stiepei horizontālā virzienā (uzdodot pārvietojumu GE modelī).

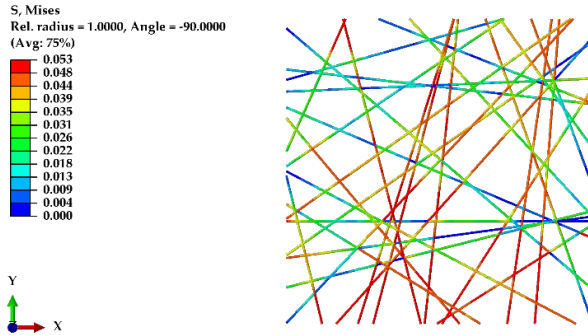


9. att. Normālspriegums gar X asi orientētam nanošķiedras paklājam, kas pakļauts pārvietojumam.

10. un 11. attēlā attiecīgi redzams normālspriegums un fon Mīzesa spriegums haotiski strukturētos nanošķiedru paklājos horizontālā pārvietojuma gadījumā.

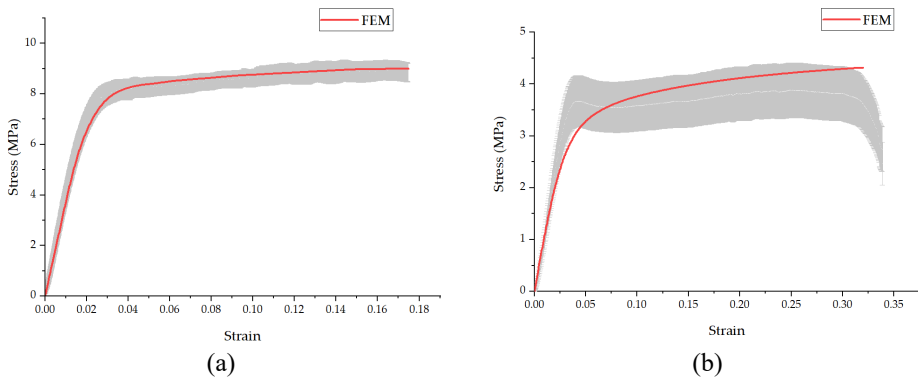


10. att. Normālspriegums gar X asi haotiskā nanošķiedru struktūrā pārvietojuma pa X asi gadījumā.



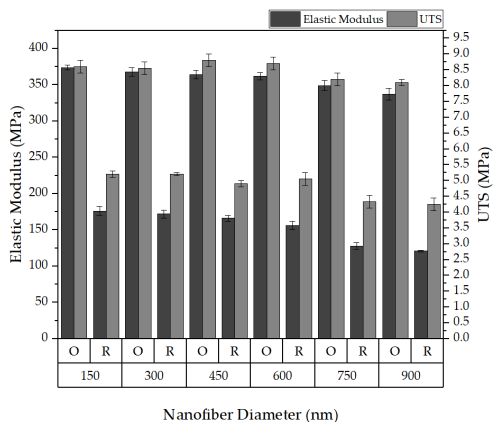
11. att. Fon Mizesa spriegums haotiskā šķiedru struktūrā, pārvietojuma pa Y asi gadījumā.

12. attēlā apkopotas mehāniskās uzvedības GE modeļa prognozes attiecībā uz nanošķiedru paklāju ar orientētām un haotiski strukturētām šķiedrām. Pelēkā zona attēlo eksperimentālos rezultātus, sarkanā līnija – rezultātus, kas iegūti, izmantojot GE modeli. Haotiskas struktūras empīriskie dati liecina par analogām mehāniskām reakcijām gan šķērsvirzienā, gan garenvirzienā. GE modelis veiksmīgi atspoguļoja šo rezultātu, norādot gandrīz neatšķiramas sprieguma reakcijas abām asīm haotiskā konfigurācijā.



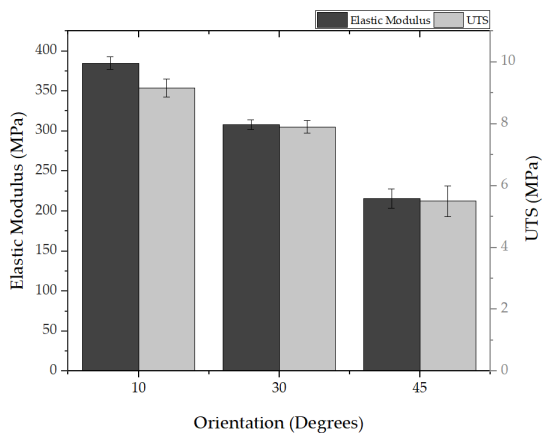
12. att. GE modeļa prognožu salīdzinājums (a) orientētiem un (b) haotiski strukturētiem nanošķiedru paklājiem, uzsverot tā precizitāti mehāniskās uzvedības modelēšanā.

13. attēlā redzama šķiedras diametra ietekme uz nanošķiedras paklāja mehāniskajām īpašībām.



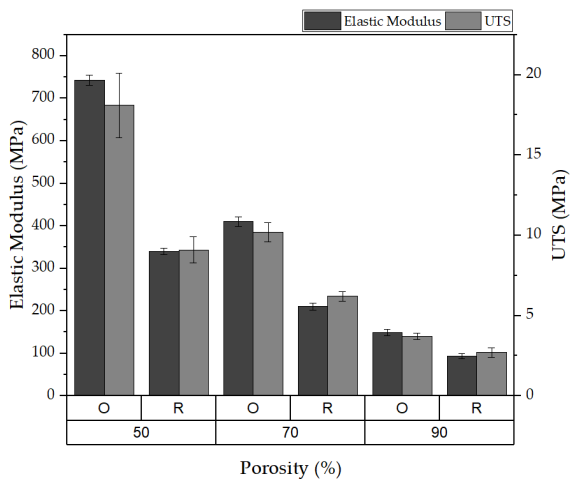
13. att. Nanošķiedras diametra ietekme uz elastības moduli un *LUTS*.

Promocijas darbā pētīta šķiedru orientācijas ietekme uz nanošķiedru paklāju mehāniskajām īpašībām, pārbaudot paklājus ar 10°, 30° un 45° orientāciju. Orientācijas ietekme uz paklāja mehāniskajām īpašībām redzama 14. attēlā.



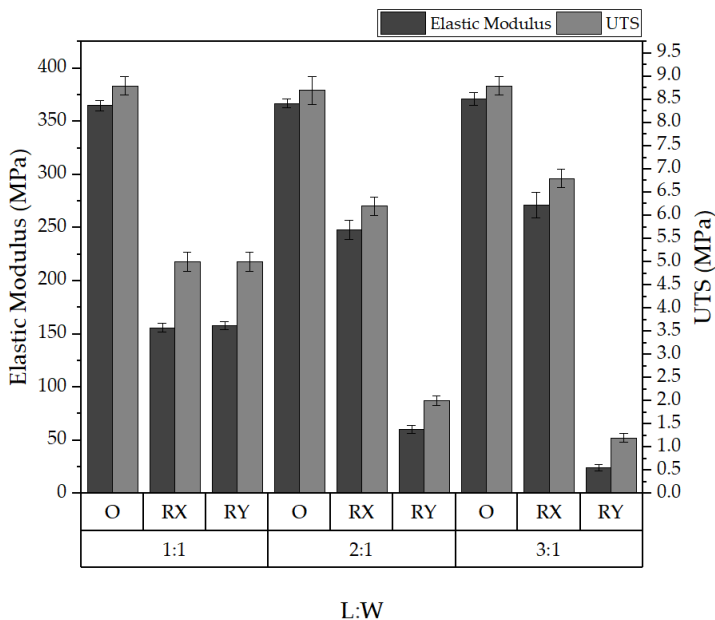
14. att. Orientācijas ietekme uz stingumu un *LUTS*.

15. attēlā redzama porainības ietekme uz nanošķiedras paklāja mehāniskajām īpašībām.



15. att. Porainības ietekme uz stingumu un *LUTS*.

16. attēlā redzams, ka $L : W$ attiecības izmaiņas būtiski ietekmēja paklāju ar haotisku šķiedru orientāciju mehāniskos raksturlielumus, kas izpaudās kā anizotropās tendences, mainoties attiecībai. Turpretī paklāji, kas sastāv no orientētām šķiedrām, uzrādīja stabilas mehāniskās īpašības, ko neietekmēja $L : W$ attiecības izmaiņas.



16. att. $L : W$ attiecības ietekme uz elastības moduli un *LUTS*.

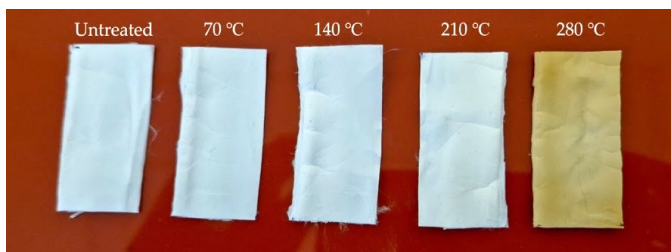
3. nodaļas nobeigumā aplūkota GE modeļa ietekme materiālzinātnes un inženierzinātnes jomā. Tajā uzsvērtā modeļa ne tikai kā pētniecības instrumenta nozīme, savienojot empīrisko un teorētisko jomu, bet arī praktiskā vērtība nozarēs, kurās ir izmantojamas PAN nanošķiedru paklāju īpašības.

4. nodaļa. Atkvēlināšanas ietekme uz PAN nanošķiedrām

4. nodaļā aplūkota atkvēlināšanas pārveidojošā ietekme uz poliakrilonitrila (PAN) nanošķiedru mehāniskajām īpašībām un termisko stabilitāti. Skaidrots, kā kontrolēta termiskā apstrāde var uzlabot vai pārveidot PAN nanošķiedru raksturīgās īpašības, veicinot to piemērotību dažādiem lietojumiem, kur mehāniskā integritāte un termiskā izturība ir ļoti svarīga. Šīs nodaļas saturs ir pieejams arī publicētā versijā (*Sanchaniya, Lasenko, Kanukuntala et al., 2023*).

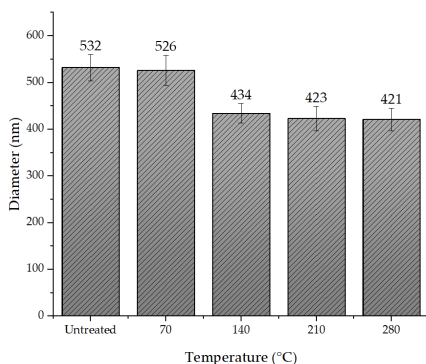
Nodaļa sākas ar teorētisku pārskatu par atkvēlināšanas procesu, skaidrojot tā nozīmi polimēru zinātnē, kur tas izmantojams kā metode iekšējo spriegumu mazināšanai, kristāliskuma uzlabošanai un iespējama polimēru materiālu mikrostrukturā maiņai. Izklāstīti konkrēti PAN nanošķiedru paklāju atkvēlināšanas mērķi, piemēram, stiepes izturības palielināšana, elastības pārveidošana un termisko īpašību uzlabošana.

17. attēlā sniegts vizuāls PAN nanošķiedru paklāju salīdzinājums pirms un pēc atkvēlināšanas procesa. Novērots, ka neapstrādātie un zemākā temperatūrā (70 °C un 140 °C) atkvēlinātie paklāji saglabā sākotnējo balto krāsu. Tomēr, palielinoties atkvēlināšanas temperatūrai, novērotas ievērojamas krāsas izmaiņas. 210 °C temperatūrā atkvēlinātajiem paklājiem bija gaiši dzeltena nokrāsa, 280 °C temperatūrā apstrādātie paklāji kļuva zeltaini, kas liecina par to degradācijas sākumu.



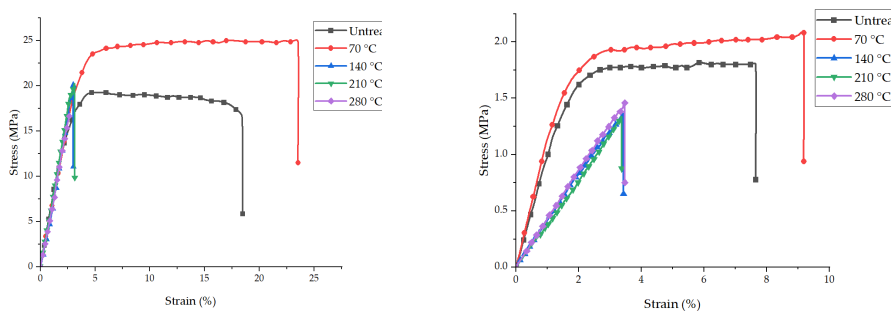
17. att. PAN nanošķiedru paklāju paraugi pēc atkvēlināšanas.

Attiecība starp nanošķiedras diametru un atkvēlināšanas temperatūru redzama 18. attēlā. Statistiskā analīze, jo īpaši *p* vērtību aprēķināšana, atklāja būtisku atšķirību starp 70 °C un 140 °C temperatūrā atkvēlināto nanošķiedru paklāju diametru ar robežlielumu 0,05.



18. att. Saistība starp nanošķiedras diametru un atkvēlināšanu.

Tālākā darba gaitā pētītas atkvēlinātā poliakrilonitrila (PAN) nanošķiedru mehāniskās īpašības. 19. (a) un (b) attēlā redzamas sprieguma (σ) un deformācijas (ϵ) līknes neapstrādātām un rūdītām PAN nanošķiedru matricām gan garenvirzienā, gan šķērsvirzienā.

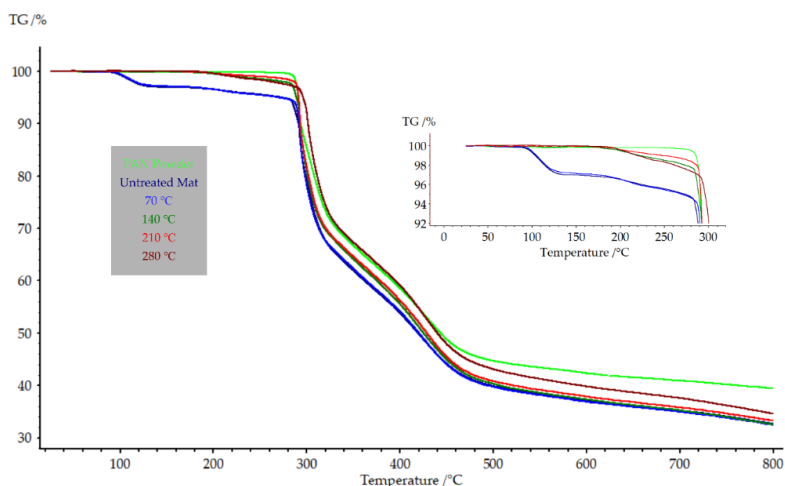


(a)

(b)

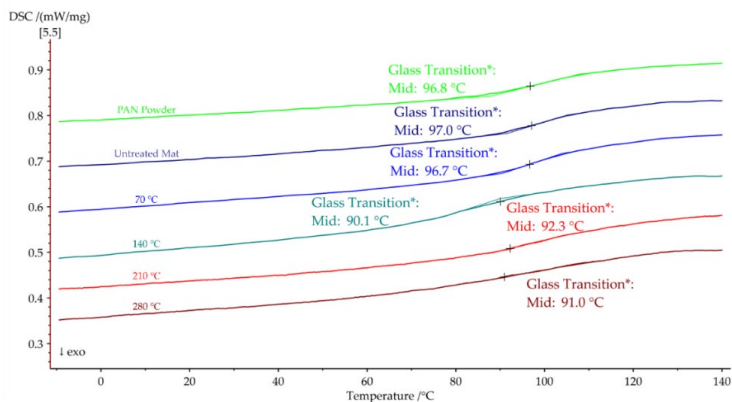
19. att. Orientētu PAN nanošķiedru paklāju reprezentatīvie sprieguma un deformācijas grafiki: (a) garenvirzienā; (b) šķērsvirzienā.

20. attēlā redzami PAN pulvera TGA grafiki neapstrādātiem nanopavedienu paklājiem un rūdītiem nanopavedienu paklājiem, kas ilustrē to termiskās degradācijas modeļus. Aptuveni 290 °C temperatūrā visos paraugos konsekventi novērots būtisks, straujš masas samazinājums līdz pat 30 %. Šis masas zudums liecina par strauju PAN sabrukšanu.



20. att. Dažādās temperatūrās atkvēlinātu PAN nanošķiedras paklāju TGA.

Otrais sildīšanas cikls (21. att.) atklāj stiklošanās temperatūras. PAN pulvera stiklošanās temperatūra ir 96,8 °C. Neapstrādātajiem un 70 °C temperatūrā atkvēlinātiem nanošķiedru paklājiem bija līdzīgas stiklošanās temperatūras – attiecīgi 97,0 °C un 96,7 °C. Tomēr paklājiem, kas atkvēlināti virs stiklošanās temperatūras, šī temperatūra ievērojami pazeminājās – 90,1 °C, 92,3 °C un 91,0 °C pavedieniem, kas atkvēlināti attiecīgi 140 °C, 210 °C un 280 °C temperatūrā.



21. att. Otrie *DSC* karsēšanas cikli dažādās temperatūrās atkvēlinātiem PAN nanošķiedras paklājiem.

4. nodaļas nobeigumā uzsvērtā atkvēlināšanas procesa praktiskā ietekme uz PAN nanošķiedru paklāju izmantošanu. Aplūkots atkvēlināto paklāju potenciāls nozarēs, kurās

nepieciešami materiāli ar precīzām mehāniskām specifikācijām un termisko pretestību, piemēram, kosmiskās aviācijas, autobūves un biomedicīnas nozarē.

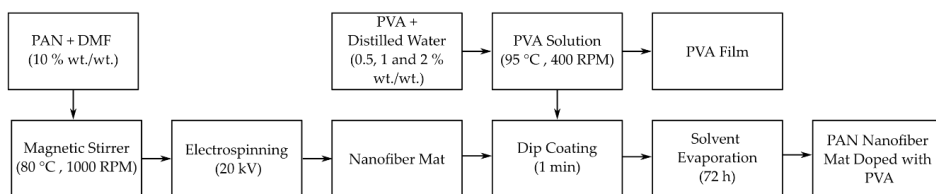
Sniedzot detalizētu izpēti par atkvēlināšanas ietekmi uz PAN nanošķiedrām, 4. nodaļa ne tikai papildina zinātniskās zināšanas par nanošķiedru apstrādes procesiem, bet arī uzsver promocijas darba nozīmi PAN bāzētu nenemateriālu funkcionalitātē un lietojamībā.

5. nodaļa. Ar PVA saistītu PAN nanošķiedru pārklājumu izpēte

5. nodaļā pētīta inovatīva pieeja poliakrilonitrila (PAN) nanopavedienu mehānisko īpašību un funkcionalitātes uzlabošanai, izmantojot polivinilspirta (PVA) saistvielu. Šīs nodaļas saturs ir pieejams arī publicētā versijā (*Sanchaniya, Lasenko, Vijayan et al., 2024*).

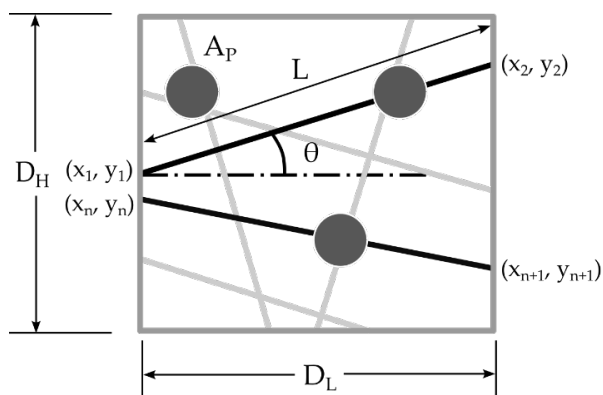
Nodaļa sākas ar ievadu polimēru saistīšanas koncepcijā, īpaši pievēršoties PVA kā PAN nanošķiedru saistvielas izmantošanai. Tajā izklāstīts PVA izvēles teorētiskais pamatojums, tostarp tā saderība ar PAN, šķīdība ūdenī un spēja veidot ūdeņraža saites, kas var būtiski ietekmēt nanošķiedru paklāju mehānisko integritāti un porainību.

Apstrādājot PAN nanošķiedru paklājus ar PVA, PAN nanošķiedru paklāji tika iegremdēti PVA šķīdumos, kam sekoja žāvēšana, lai iztvaicētu šķīdinātāju, tādējādi PVA vienmērīgi iestrādājot paklājā. Sagatavošana, elektrovērpšanas apstākļi un iegremdēšanas metodika ir vizuāli ietverta 22. attēlā, kas soli pa solim ilustrē izgatavošanas procesu, kura mērķis ir iegūt uzlabotus nanošķiedru paklājus.



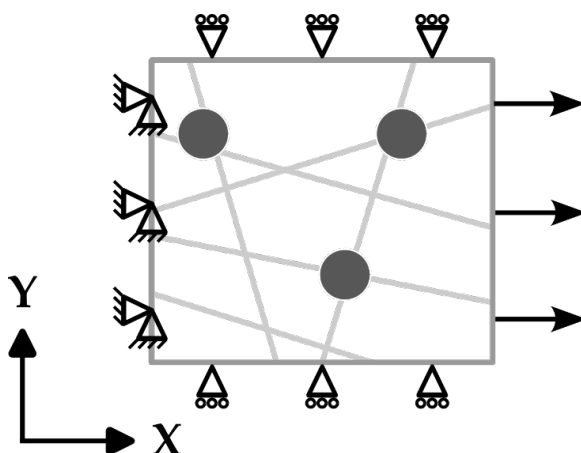
22. att. Ar PVA modificētu PAN nanošķiedru paklāju izgatavošanas process.

Darba gaitā izstrādāts galīgo elementu (GE) modelis ar PVA leģētiem PAN nanošķiedru paklājiem, izmantojot iepriekš izstrādāto metodiku. Šajā modelī integrēti būtiski ģeometriskie parametri, lai precīzi attēlotu nanošķiedru struktūras nianšes pēc PVA apstrādes, kā redzams 23. attēlā. Lai precīzi norobežotu nanošķiedru paklāja modeļa telpiskos izmērus, noteikti tādi galvenie parametri kā apgabala garums (D_L) un augstums (D_H).



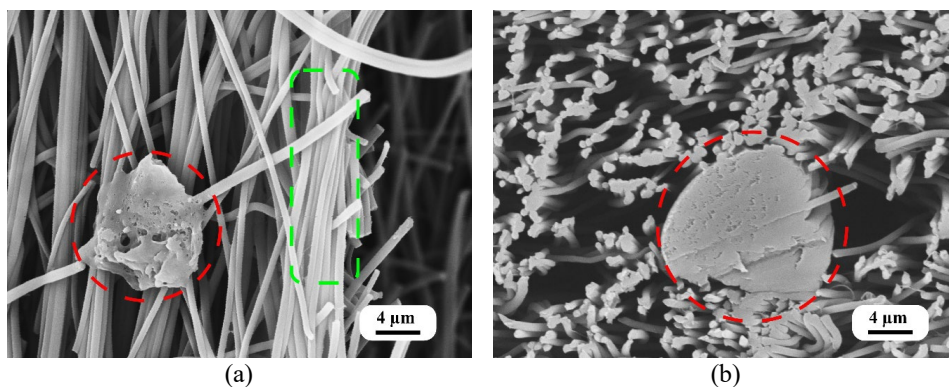
23. att. Ar *PVA* leģētu nanošķiedru ģeometrisko parametru shematisks attēlojums noteiktā apgabalā.

Modelis ir konfigurēts, lai simulētu nanošķiedru paklāju stiepes īpašības. Lai imitētu to reakciju uz pārvietojumu, piemēroti 24. attēlā aprakstītie robežnosacījumi, koncentrējoties uz reakcijas spēku (RF) gar X asi. Pārvietojumi (U_1, U_2, U_3) stratēģiski piemēroti, lai atspoguļotu reālo stiepšanās uzvedību stiepes slodzes ietekmē, ar īpašiem ierobežojumiem nodrošinot precīzu materiāla deformācijas īpašību simulāciju. Lineāro sijas elementu (B31) un čaulas elementu (S4R) izmantošana *Abaqus GEA* programmatūrā (2022) atvieglo attiecīgi nanošķiedru un *PVA* piedevas niansētu attēlojumu, nodrošinot nanokompozīta materiāla augstas precizitātes modeli.



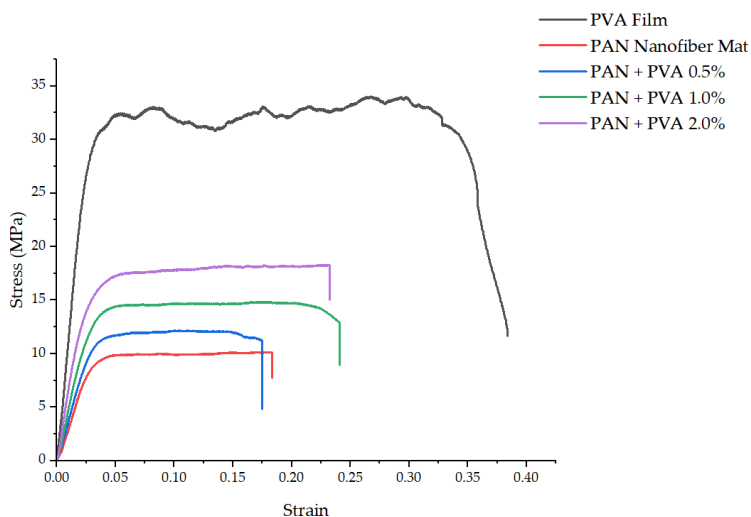
24. att. Robežnosacījumi, kas piemēroti, lai novērotu paraugu normālā sprieguma reakciju uz pārvietojumu.

Skenēšanas elektronu mikroskopijas (SEM) analīze ar *PVA* leģēto PAN nanošķiedru paklāju atklāj, cik sarežģīta ir iegremdēšanas procesa ietekme uz to morfoloģiju, kā spilgti redzams 25. attēlā. Šajā attēlā parādīti 2,0 % *PVA* šķīduma apstrādei pakļauti nanošķiedru paklāji, atklājot trīs ievērojamas morfoloģiskas pārvērtības: lokālu *PVA* aglomerāciju veidošanos nanošķiedru paklājā; plānas *PVA* plēves veidošanos, kas aizpilda spraugas starp PAN nanošķiedrām; vienmērīgu *PVA* pārklājumu, kas apņem PAN nanošķiedru virsmu. Šīs morfoloģiskās izmaiņas ir izšķirošas, uzlabojot paklāju strukturālo izturību, veicinot papildu mijiedarbības punktus starp šķiedrām, tādējādi ievērojami uzlabojot kompozīta mehāniskās īpašības.

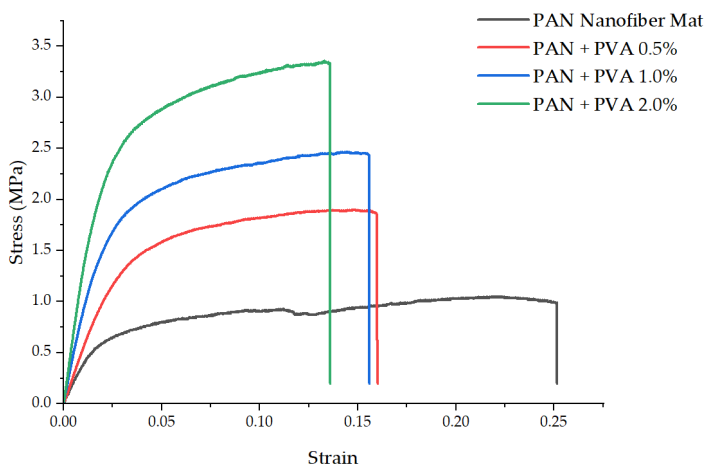


25. att. SEM attēli ar PAN nanošķiedru paklāju, kas leģēts ar 2,0 % *PVA* šķīdumu: (a) lokalizētas *PVA* aglomerācijas nanošķiedru paklājā (sarkanā krāsā) un pārklājums uz šķiedrām (zaļā krāsā); (b) lokalizēto *PVA* aglomerāciju šķērsriezuma attēls.

Ar *PVA* modificētu PAN nanošķiedru paklāju mehānisko īpašību rūpīga novērtēšana, kā parādīts 26. (a) un (b) attēlā, sniedz vispusīgu ieskatu par uzlabojumiem, kas panākti, pievienojot *PVA* dažādās koncentrācijās. Neatkarīgas *PVA* plēves uzrādīja stabilu elastības moduli – (1254 ± 57) MPa, stiepes stiprību – $(34 \pm 2,4)$ MPa un izcilu plastiskumu ar stiepes pagarinājumu pārraušanas brīdī – $(0,38 \pm 0,03)$ %. Īpaši jāatzīmē, ka biezuma viendabīgums, kas novērots gan nepiesātinātās, gan ar *PVA* piesātinātās PAN nanošķiedras paklājos, liecina, ka, pievienojot nelielu leģējošās vielas procentuālo daudzumu, tiek rūpīgi saglabāti paklāju strukturālie izmēri.



(a)

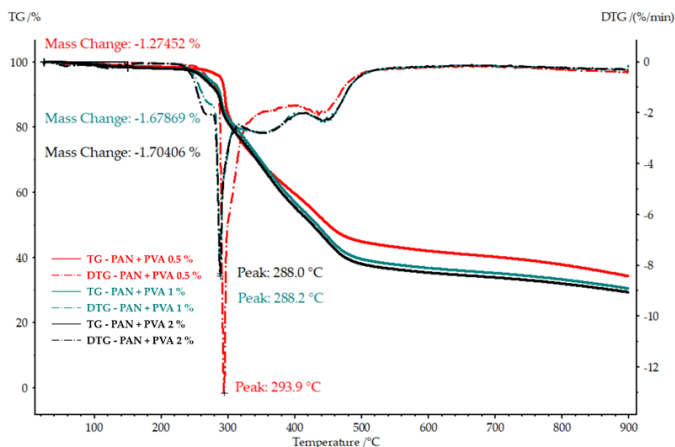


(b)

26. att. Reprezentatīvi sprieguma un deformācijas grafiki: (a) garenvirzienā, (b) šķērsvirzienā.

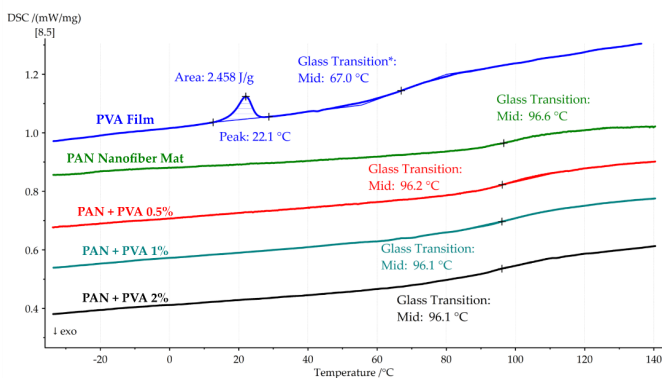
27. attēlā redzami TGA un DTG analīzes rezultāti PAN nanopavedienu paklājiem, kas pildīti ar *PVA* dažādās koncentrācijās. *PVA* koncentrācijas palielināšanās nozīmē maksimālās noārdīšanās temperatūras samazināšanos, kas liecina par kompozīta termiskās stabilitātes izmaiņām. Pie 0,5 % *PVA* koncentrācijas maksimālā noārdīšanās temperatūra bija ļoti līdzīga nelegēta PAN nanošķiedru paklāja temperatūrai. Tomēr pie 1 % un 2 % *PVA* koncentrācijas

novērots ievērojams samazinājums līdz 288,2 °C un 288,0 °C. Vienlaikus agrīnie masas zudumi līdz 150 °C pieauga līdz ar *PVA* koncentrāciju, kas bija no 1,27 % pie 0,5 % *PVA* līdz 1,67 % un 1,7 % attiecīgi pie 1 % un 2 % *PVA*.



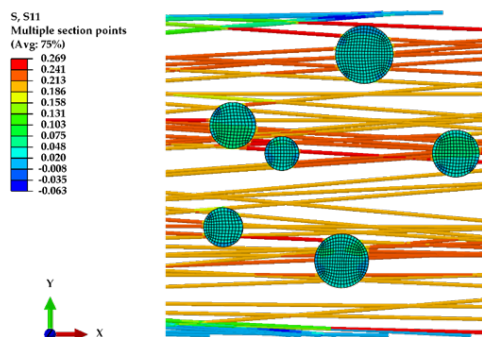
27. att. TGA un DTG PAN nanošķiedru paklājiem, kas leģēti ar dažādu *PVA* koncentrāciju, ilustrējot *PVA* koncentrācijas ietekmi uz to termisko noārdīšanos un agrīniem masas zudumiem.

Otrajā *DSC* sildīšanas ciklā, kā parādīts 28. attēlā, leģēto nanokompozītu stiklošanās temperatūras precīzi atspoguļoja tīra PAN nanošķiedru paklāja temperatūru, kas liecina, ka *PVA* iekļaušana būtiski nemaina kompozītu Tg.



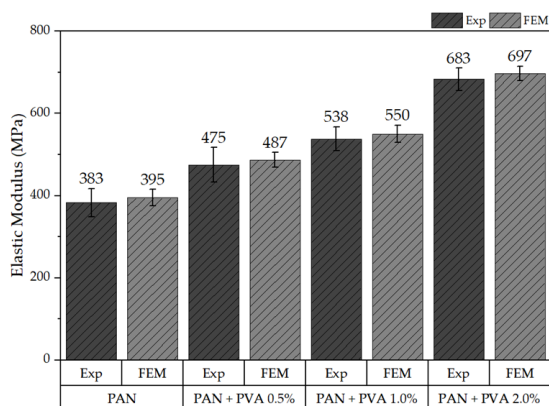
28. att. PAN nanošķiedras paklāja, *PVA* plēves un PAN nanošķiedras paklāja, kas leģēts ar *PVA*, otrais *DSC* karsēšanas cikls, norādot to stiklošanās temperatūru.

29. attēlā uzskatāmi parādīts normālsprieguma sadalījums gar X asi slodzes laikā, uzsverot leģējošās vielas lomu nanošķiedras paklāja strukturālās integritātes palielināšanā. Šis stingrības palielinājums uzsvē kompozīta pastiprināto noturību pret spriegumu.



29. att. Normālspriegums uz X ass nanošķiedras paklājam, kas leģēts ar 2 % *PVA*.

GE modeļa aprēķināto elastīgo reakciju salīdzinājums ar eksperimentālo datu spektru, kā parādīts 30. attēlā, apliecina modeļa precizitāti.



30. att. Eksperimentos iegūto elastības moduļu un GE modeļa salīdzinājums.

5. nodaļas nobeigumā aplūkots ar *PVA* apstrādātu PAN nanošķiedru paklāju praktiskais lietojums un potenciālās priekšrocības. Pētīta to piemērotība izmantošanai jomās, kurās nepieciešami materiāli ar īpašu mehānisko izturību, termisko pretestību un kontrolētu porainību, piemēram, filtrācijā, audu inženierijas skeletos un valkājamos sensoros. Uzsvērts, kā jaunā *PVA* apstrādes pieeja bagātina PAN nanošķiedru paklāju funkcionālo daudzpusību, apliecinot šī pētījuma ieguldījumu materiālzinātnes un nanošķiedru tehnoloģijas attīstībā.

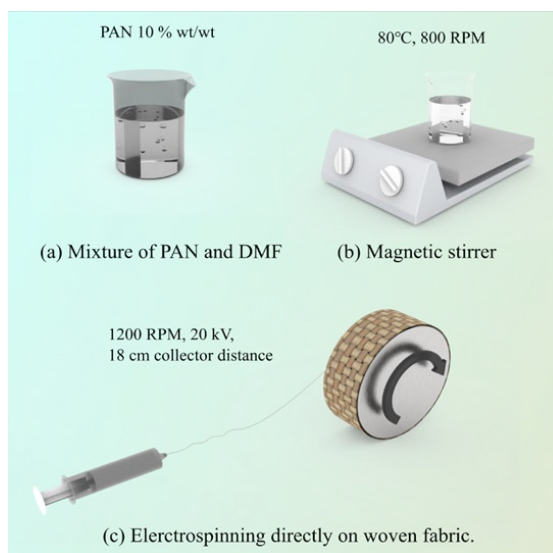
Sniedzot detalizētu pētījumu par *PVA* apstrādāto PAN nanošķiedru paklāju, 5. nodaļā aprakstītais paplašina nanošķiedru paklāju uzlabošanas metožu klāstu.

6. nodaļa. Ar PAN nanošķiedrām stiegroti laminēti tekstilmateriāli

6. nodaļā aplūkota inovatīva PAN nanošķiedru paklāju integrēšana tekstilmateriālu struktūrās, lai radītu pastiprinātu laminētu tekstilmateriālu bez savienošanas. Šajā nodaļā sniegts nozīmīgs progress kompozītmateriālu jomā, piedāvājot jaunu pieeju tekstilmateriālu strukturālās integritātes un funkcionālo īpašību uzlabošanai, izmantojot nanošķiedru tehnoloģiju. Šīs nodaļas saturs ir pieejams arī publicētā versijā (*Sanchaniya, Lasenko, Kanukuntla et al., 2023*).

Nodaļā izstrādāts tekstilmateriālu pastiprināšanas ar PAN nanošķiedrām pamatojums. PAN nanošķiedru īpašības, tostarp to augstā stiepes stiprība un termiskā stabilitāte, ir šo problēmu risinājumi, piedāvājot jaunu tekstilmateriālu pastiprināšanas paradigmu, kas saglabā tekstila bāzes elastību un drapējumu, vienlaikus ievērojami uzlabojot tā ekspluatācijas īpašības.

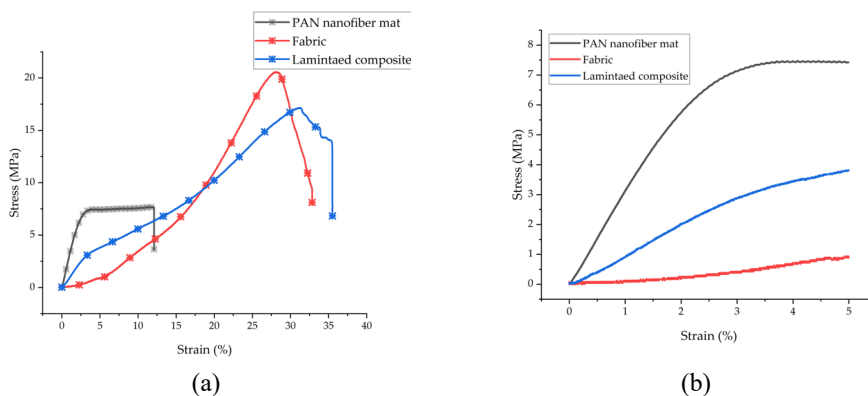
31. attēlā parādīts laminēto tekstilkompozītu izgatavošanas process, izmantojot tiešo elektrovērpšanu uz tekstilmateriāla.



31. att. PAN nanopavedienu kompozītmateriālu izgatavošanas process: (a) PAN un DMF maisījums; (b) magnētiskais maisītājs; (c) elektrovērpšana tieši uz auduma.

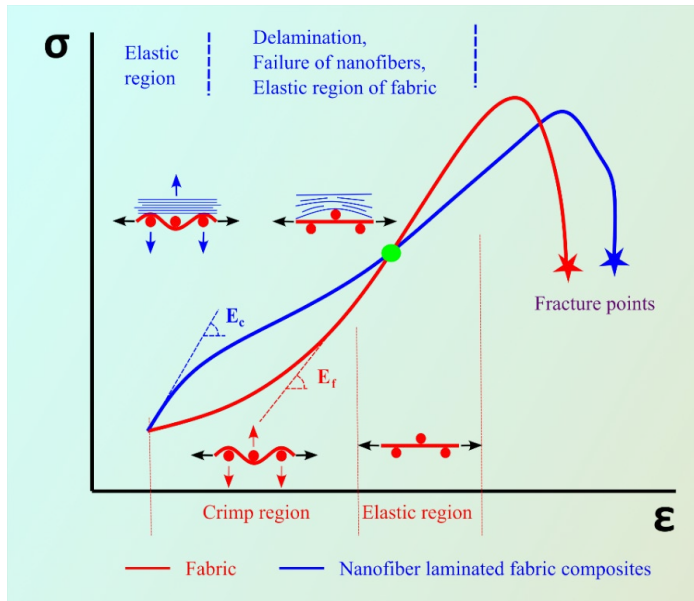
32. (a) attēlā redzamas sprieguma (σ) un deformācijas (ϵ) līknes PAN nanošķiedras paklājam, vienkāršam audumam un laminētiem kompozītmateriāliem. Jāatzīmē, ka stiepes

testēšanas laikā, pateicoties efektīvajam satvēriena spēkam, pie satvērieniem neradās bojājumi. Palielināts šo līkņu skats 5 % deformācijas diapazonā (32. (b) att.) atklāj to, ka laminēta kompozītmateriāla elastības modulis ir lielāks nekā tikai vienkāršā auduma elastības modulis. Šis uzlabojums ir skaidrojams ar nanošķiedru nodrošināto pastiprinājumu.



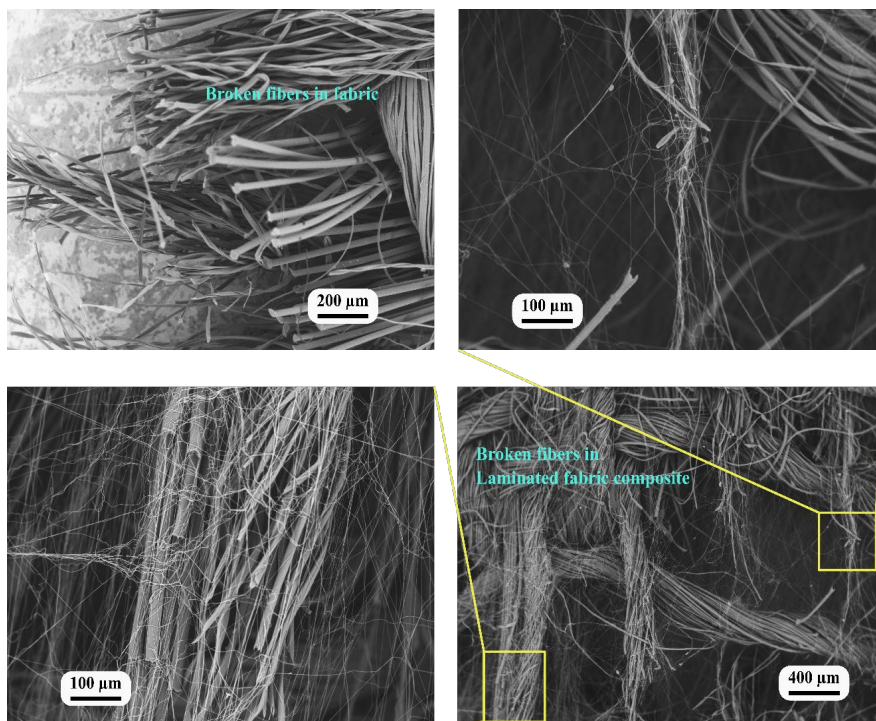
32. att. (a) Nanošķiedras paklāja, auduma un laminēta kompozītmateriāla reprezentatīvs sprieguma un deformācijas grafiks; (b) sprieguma un deformācijas līknes paplašinājums zemā deformācijas diapazonā (0–5 %).

33. attēlā vizuāli parādīta gan vienkāršā auduma, gan ar nanošķiedrām laminētā kompozītmateriāla sprieguma un deformācijas dinamika. Savukārt ar nanošķiedrām pastiprinātais audums uzrādīja nelineāru apgabalu, ko izraisīja PAN nanošķiedru atslāņošanās un pastāvīga pagarināšanās slodzes ietekmē, izraisot plastisku deformāciju.



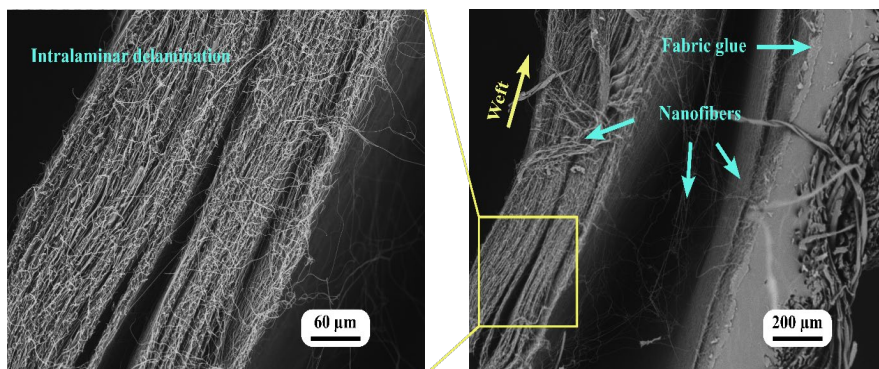
33. att. Tipiska sprieguma un deformācijas līkne audumam un kompozītmateriālam, kas laminēts ar nanošķiedru.

34. attēlā vizuāli parādītas abu materiālu lauktās virsmas. SEM attēli sniedz detalizētu plaisāšanas modeļu vizualizāciju, izceļot abu veidu audumu plaisāšanas mehānismu atšķirības. Austā auduma plaisājošajā virsmā pārsvarā bija redzamas salauztas šķiedras, kas atbilst traušajam plaisāšanas mehānismam. Deformācija bija ierobežota vienā plaknē, kas liecina par daudzplakņu sprieguma sadalījuma trūkumu. Šāda uzvedība ir raksturīga tradicionālajiem audumiem, kur bojājums galvenokārt notiek gar šķiedru lūzuma punktiem.



34. att. Auduma un ar nanošķiedru laminēta kompozītmateriāla testa paraugu SEM attēls.

35. attēlā galvenā uzmanība pievērsta SEM attēliem pie skavām un velku šķiedru galiem, kas izgaismo lūzumu uzvedību un bīdes sprieguma klātbūtni laminētā kompozītā un austā audumā. Pēc lūzuma SEM attēlos redzams, ka ar nanošķiedru laminētais kompozītmateriāls un austais audums ir atdalījies. Tas liecina par plaknes bīdes spriegumu, kas izraisa atslāpošanos. Šo spriegumu radīja elastības apgabalu neatbilstība starp slāņiem, kas izraisīja to atdalīšanos.



35. att. SEM attēls ar nanošķiedru laminēta kompozītmateriāla salūzušam paraugam (pie satvēriena).

6. nodaļas nobeigumā aplūkota šī pētījuma plašāka ietekme, vērtējot ar PAN nanošķiedrām pastiprinātu laminētu tekstilmateriālu nākotnes iespējas. Nodaļā uzsvērta šīs pieejas daudzpusība, ierosinot turpmākas pētniecības un attīstības iespējas, piemēram, daudzfunkcionālu nanošķiedru iekļaušanu, lai iegūtu papildu funkcijas, piemēram, pretmikrobu īpašības vai vadītspēju.

Ar PAN nanošķiedrām stiegrota laminēta tekstilmateriāla izstrāde sniedz jaunu un ietekmīgu ieguldījumu materiālzinātnes un inženierzinātnes jomā, parādot nanošķiedru tehnoloģijas potenciālu, lai radītu nākamās paaudzes kompozītmateriālus ar nepārspējamu veiktspēju un universālām īpašībām.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darbs iepazīstina ar nanošķiedru tehnoloģiju jomu, uzsverot tās nozīmi nanomateriālu unikālo īpašību dēļ. Tajā likts pamats pētījumam, izceļot poliakrilnitrila (PAN) nanopavedienu potenciālu dažādos lietojumos, ko nosaka to izcilās mehāniskās, termiskās un filtrēšanas spējas. Ir ieskicēts pētniecības trūkums un nepieciešamība padziļināti pētīt PAN nanošķiedru izgatavošanas paņēmienus, īpašības un lietojumus.
2. Darbā aplūkota nanošķiedru evolūcija, koncentrējoties uz izgatavošanas paņēmieniem, īpašu uzmanību pievēršot elektrovērpšanai, un izpētītas mehāniskās un termiskās īpašības, kas ir būtiskas to darbībai. Pārskatā ir identificētas esošās pētniecības nepilnības, jo īpaši PAN nanošķiedru jomā, un noteikts skaidrs pētījumu virziens.
3. Aplūkotās eksperimentālās procedūras PAN nanošķiedru paklāju izgatavošanai. Izpētītas dažādas elektrovērpšanas metodes, novērtējot to ietekmi uz šķiedru orientāciju un paklāja struktūru. Nanošķiedru paklājam ar orientētu struktūru ir par 128 % augstāks *LUTS* un par 298 % (~ 4 reizes) augstāks Junga modulis, salīdzinot ar nejaušo paklāja struktūru.
4. Izstrādāts un validēts galīgo elementu (GE) modelis, lai prognozētu nanošķiedru paklāju mehāniskās īpašības. Modeļa precizitāte, simulējot nanošķiedru uzvedību dažādos apstākļos, ir nozīmīgs solis nanošķiedru pētniecības analītiskajās iespējās.
5. Pētīta atkvēlināšanas ietekme uz PAN nanošķiedru paklāju īpašībām. Tajā sniegts būtisks ieskats par to, kā termiskā apstrāde var uzlabot nanošķiedru izturību un stabilitāti, piedāvājot iespēju uzlabot to izmantošanas potenciālu. Atkvēlināšanai ir būtiska ietekme uz PAN nanošķiedrām, kad, karsējot dažādās temperatūrās, nanošķiedru diametrs samazinājās par 20 %. Atkvēlināšana 70 °C temperatūrā palielināja *LUTS* par 32 % un Junga moduli par 6,5 %. Tomēr, atkvēlinot virs 100 °C temperatūrā, samazinājās stiepes izturība un Junga modulis. Šķērsvirzienā *TUTS* palielinājās par 23,5 %, savukārt Junga modulis palielinājās par 18,5 %.
6. Pētīta jauna pieeja PAN nanošķiedru mehānisko īpašību uzlabošanai, izmantojot *PVA* saistvielu. Šī inovatīvā stratēģija risina problēmu, kā saglabāt nanošķiedru paklāju strukturālo integritāti, vienlaikus palielinot to izturību. Pievienojot 2 % *PVA* šķīdumu PAN nanošķiedrai, porainība nedaudz samazinājās – par 12,5 %, ar 1 % *PVA* šķīdumu tā samazinājās līdz 6,9 %, ar 0,5 % *PVA* šķīdumu – līdz 4,1 %. Termiskā stabilitāte saglabājās nemainīga ar *PVA* piedevu, ar 0,5 % šķīdumu tā nedaudz mainījās. Kompozītam, kas pagatavots ar pievienotu 2 % *PVA* šķīdumu, garenvirzienā

palielinājās Junga modulis par 78,3 % un *LUTS* par 84,3 %, savukārt šķērsvirzienā – attiecīgi par 159,5 % un 200 %. Nanošķiedru kompozītmateriāla paklājam, kas izgatavots ar 2,0 % *PVA* šķīdumu, ir par 563 % lielāks Junga modulis garenvirzienā un par 22 % lielāks Junga modulis šķērsvirzienā, salīdzinot ar nejaušas nanošķiedru struktūras Junga moduli.

7. Eksperimentālā nodaļa ir veltīta PAN nanošķiedru lietošanai necaurlaidīgu tekstilizstrādājumu pastiprināšanai. Uzsvērts PAN nanošķiedru potenciāls kompozītmateriālu ar lieliskām mehāniskām īpašībām radīšanā.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Al-Abduljabbar, A., & Farooq, I. (2023). Electrospun Polymer Nanofibers: Processing, Properties, and Applications. *Polymers*, *15*(1)(65).
<https://doi.org/10.3390/polym15010065>.
2. Bidhar, S., Goss, V., Chen, W. Y., Stanishevsky, A., Li, M., Kuksenko, S., Calviani, M., & Zwaska, R. (2021). Production and qualification of an electrospun ceramic nanofiber material as a candidate future high power target. *Physical Review Accelerators and Beams*, *24* (12), 123001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.123001>.
3. Chhetri, K., Subedi, S., Muthurasu, A., Ko, T. H., Dahal, B., & Kim, H. Y. (2022). A review on nanofiber reinforced aerogels for energy storage and conversion applications. *Journal of Energy Storage*, *46* (October 2021), 103927.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103927>.
4. Papkov, D., Delpouve, N., Delbreilh, L., Araujo, S., Stockdale, T., Mamedov, S., Maleckis, K., Zou, Y., Andalib, M. N., Dargent, E., Dravid, V. P., Holt, M. V., Pellerin, C., & Dzenis, Y. A. (2019). Quantifying Polymer Chain Orientation in Strong and Tough Nanofibers with Low Crystallinity: Toward Next Generation Nanostructured Superfibers [Review-article]. *ACS Nano*, *13* (5), 4893–4927.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.8b08725>.
5. Papkov, D., Goponenko, A., Compton, O. C., An, Z., Moravsky, A., Li, X. Z., Nguyen, S. T., & Dzenis, Y. A. (2013). Improved graphitic structure of continuous carbon nanofibers via graphene oxide templating. *Advanced Functional Materials*, *23* (46), 5763–5770. <https://doi.org/10.1002/adfm.201300653>.
6. Papkov, D., Zou, Y., Andalib, M. N., Goponenko, A., Cheng, S. Z. D., & Dzenis, Y. A. (2013). Simultaneously strong and tough ultrafine continuous nanofibers. *ACS Nano*, *7* (4), 3324–3331. <https://doi.org/10.1021/nn400028p>.
7. Sanchaniya, J. V. (2024). COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL CHARACTERISTICS: VIRGIN POLYACRYLONITRILE (PAN) VERSUS ELECTROSPUN PAN NANOFIBER MATS. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. <https://doi.org/Accepted Article>.
8. Sanchaniya, J. V., Lasenko, I., Gobins, V., & Kobeissi, A. (2024). A Finite Element Method for Determining the Mechanical Properties of Electrospun Nanofibrous Mats. *Polymers (Basel)*, *16* (6), 852. <https://doi.org/10.3390/polym16060852>.
9. Sanchaniya, J. V., Lasenko, I., Kanukuntala, S.-P., Smogor, H., Viluma-Gudmona, A., Krasnikovs, A., Gobins, V., & Tipans, I. (2023). Mechanical and thermal characteristics of annealed-oriented PAN nanofibers. *Polymers*.
<https://doi.org/doi.org/10.3390/polym15153287>.
10. Sanchaniya, J. V., Lasenko, I., Kanukuntla, S. P., Mannodi, A., Viluma-gudmona, A., & Gobins, V. (2023). Preparation and Characterization of Non-Crimping Laminated Textile Composites Reinforced with Electrospun Nanofibers. *Nanomaterials*, *13* (13), 1949. <https://doi.org/10.3390/nano13131949>.
11. Sanchaniya, J. V., Lasenko, I., Vijayan, V., Smogor, H., Gobins, V., Kobeissi, A., &

- Goljandin, D. (2024). A Novel Method to Enhance the Mechanical Properties of Polyacrylonitrile Nanofiber Mats: An Experimental and Numerical Investigation. *Polymers*, *16* (7), 992. <https://doi.org/10.3390/polym16070992>.
12. Xue, J., Wu, T., Dai, Y., & Xia, Y. (2019). Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications. In *Chemical Reviews* (Vol. 119, Issue 8, pp. 5298–5415). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00593>.
 13. Zhou, Y., Liu, Y., Zhang, M., Feng, Z., Yu, D. G., & Wang, K. (2022). Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review. *Nanomaterials*, *12* (7). <https://doi.org/10.3390/nano12071077>.



Jaymin Vrajlal Sanchaniya dzimis 1992. gadā Radžkotā (Indija), Gudžaratas Tehniskajā universitātē (Indija) ieguvis bakalaura grādu mašīnbūvē (2015), Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) maģistra grādu mehānikā un mašīnbūvē (2020). Kopš 2020. gada ir RTU zinātniskais asistents. Guvis plašu pieredzi, sadarbojoties un stažējoties tādās atzītās institūcijās kā *KTH* Karaliskais tehnoloģiju institūts (Zviedrija), *RWTH Aachen* Universitāte (Vācija), Kompjeņas Tehnoloģiju universitāte (Francija), Normandijas Ruānas universitāte (Francija) un Tallinas Tehnoloģiju universitāte (Igaunija). Pētniecības intereses saistītas ar nanošķiedru un nanošķiedru paklāju izgatavošanu, raksturošanu, galīgo elementu modelēšanu un mehāniku. Viņa centību šajā jomā atspoguļo iespaidīgais publikāciju skaits – *SCOPUS* datubāzē indeksēti vairāk nekā 20 žurnālu un konferenču raksti, kas aptver tādas jomas kā nanošķiedru paklāju izgatavošana un raksturošana vides un viedo materiālu jomā.