

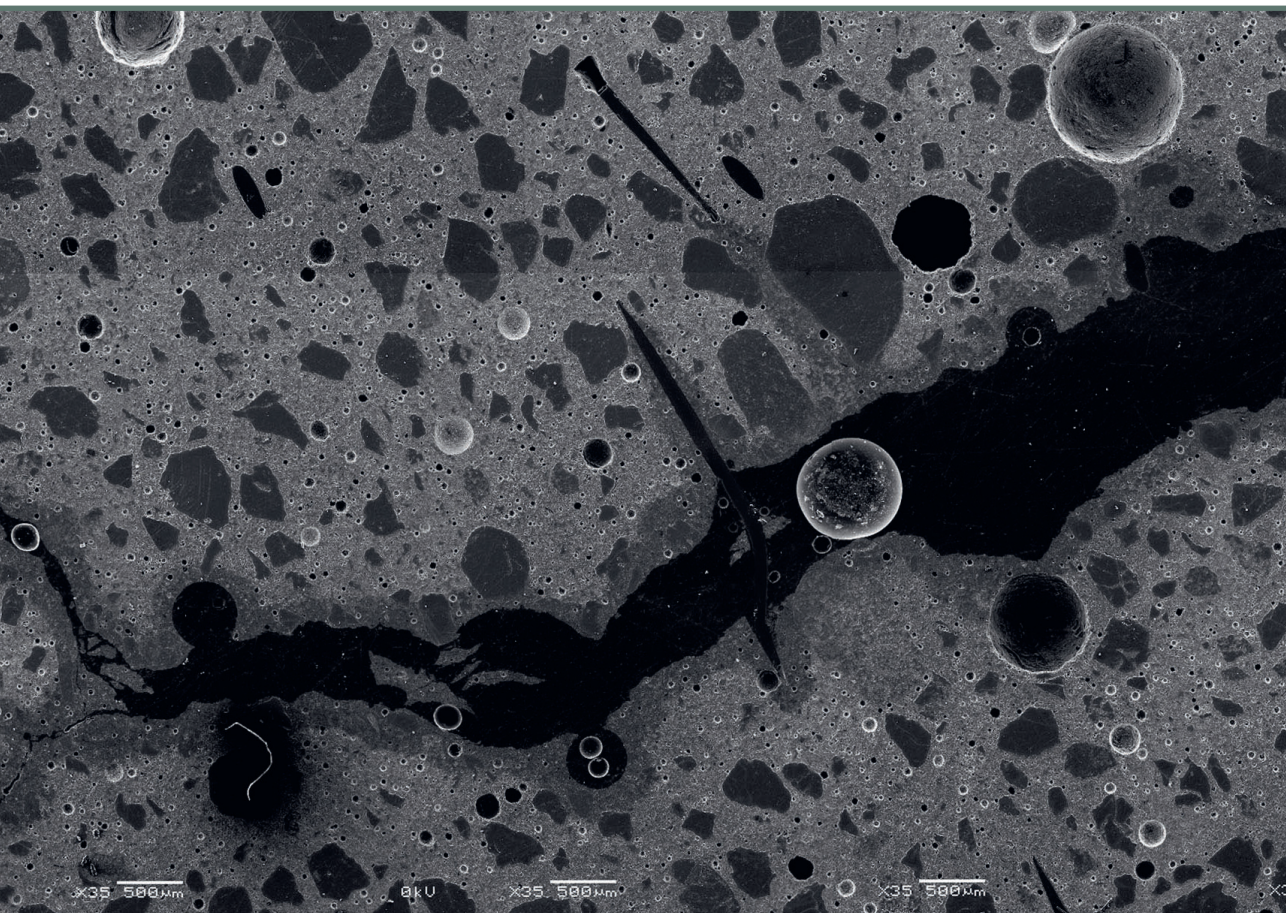


RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Rihards Gailītis**

# **METODOLOĢIJA ILGLAICĪGO DEFORMĀCIJU IETEKMES NOVĒRTĒŠANAI UZ ĢEOPOLIMĒRA KOMPOZĪTA MIKROSTRUKTŪRU**

Promocijas darba kopsavilkums



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte  
Būvkonstrukciju inženierzinātņu institūts

**Rihards Gailītis**

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

**METODOLOĢIJA ILGLAICĪGO  
DEFORMĀCIJU IETEKMES NOVĒRTĒŠANAI  
UZ ĢEOPOLIMĒRA KOMPOZĪTA  
MIKROSTRUKTŪRU**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskie vadītāji:  
asociētā profesore *Dr. sc. ing.*  
ANDĪNA SPRINCE,  
profesors *Dr. sc. ing.*  
LEONĪDS PAKRASTIŅŠ

RTU Izdevniecība  
Rīga 2023

Gailītis R. Metodoloģija ilglaicīgo deformāciju ietekmes novērtēšanai uz ģeopolimēra kompozīta mikrostruktūru. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 61 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes “RTU P-06” 2023. gada 16. jūnija lēmumu, protokols Nr. 04030–9.6.2/5.

Vāka attēla autors – Rihards Gailītis

<https://doi.org/10.7250/9789934229749>  
ISBN 978-9934-22-974-9 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 10. novembrī plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 342. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Vad. pētn. *Dr. sc. ing.* Sandris Ručevskis,  
Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc. prof. *Ph. D. Barbara Kucharczykova*,  
Brno Tehnoloģiju universitāte, Čehija

Asoc. prof. *Dr. habil. sc. ing. Marek Hebda*,  
Krakovas Tehnoloģiju universitāte, Polija

## 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.

Rihards Gailītis ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā un sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Promocijas darbs ietver kopsavilkumu un deviņas zinātniskās publikācijas. Septiņas no publikācijām ir rakstītas angļu valodā, to apjoms ir 64 lappuses. Divas publikācijas ir Latvijas nacionālie patenti, tie rakstīti latviešu valodā, un to apjoms ir 34 lappuses. Literatūras sarakstā ir 185 literatūras avoti.

## Pateicības

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē Būvkonstrukciju inženierzinātņu institūtā no 2018. līdz 2023. gadam.

Paldies Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Būvkonstrukciju, Būvmateriālu, Būvmehānikas, Kompozītu materiālu un konstrukciju katedru mācītbspēkiem un personālam, kā arī Krakovas Tehnoloģiju universitātes Materiālu inženierijas un fizikas fakultātes personālam par atbalstu un palīdzību!

Īpašs paldies darba vadītājiem *Dr. sc. ing.* Andīnai Sprincei un *Dr. sc. ing.* Leonīdam Pakraštinam, kuri uzņēmās vadīt manus pirmos soļus un tālāko izaugsmi zinātnē! Milzīga pateicība *Dr. ing.* Kingai Korniejenko, kura iepazīstināja ar ģeopolimēru kā materiālu un bija viena no iniciatoriem konkrētā virziena pētniecībai, un *Bc. sc. ing.* Tomasam Kozlovskim, kurš sniedza vērā ņemamu atbalstu pētniecībā un sarežģītu risinājumu piemērošanā. Pateicos arī *Dr. sc. ing.* Līgai Gailei, *Ph. D.* Līvai Pupurei, *Dr. sc. ing.* Gitai Šakalei, *Ph. D.* Atim Degro, *Dr. sc. ing.* Andrejam Pupuram, *Mg. sc. ing.* Laurai Vītolai, kuri atbalstīja un sniedza vērā ņemamus un neaizstājamus padomus gan pētniecībā, gan promocijas darba izstrādē. Liels paldies arī visiem maniem bakalaura un maģistra līmeņa studentiem!

Milzīga pateicība arī manai ģimenei – Patrīcijai, mammai Agnesei, tētim Arturam un māsai Dacei, kuriem bija jāsadzīvo ar manu laika trūkumu un neapmierinātību par paveikto, kā arī opim Kārlim, kurš vienmēr ir bijis lielākais pretinieks un mans opozicionārs, tādējādi motivējot man pierādīt pretējo!

Šis darbs izstrādāts ar:

- Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras grantu programmu DOK.BIF/19, DOK.BIF/20, DOK.BIF/21 atbalstu;
- LZP zinātniskā projekta “Inovatīvu cementa kompozītmateriālu ilglaicīgās deformācijas dažādos spriegumstāvokļos” Nr. lzp-2018/2-0249 atbalstu;
- Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu.



NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA  
Eiropas Sociālais  
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

## SATURS

Saīsinājumi.....	7
Darba vispārīgs raksturojums.....	9
Darba mērķis .....	9
Darba uzdevumi.....	9
Darba zinātniskā novitāte.....	9
Darba praktiskā nozīme .....	10
Darba sastāvs un apjoms .....	10
Darba aprobācija un publikācijas .....	10
Publikāciju saraksts.....	10
Nacionālie patenti.....	12
Darba rezultāti prezentēti zinātniskajās konferencēs.....	12
Autora apliecinājums par aizstāvamām publikācijām .....	13
Aizstāvamās tēzes.....	17
1. Ievads .....	18
2. Ģeopolimēra kompozīti .....	21
2.1. Izejmateriāli.....	22
2.1.1. Aluminosilikāti.....	22
2.1.1.1. Elektrofiltru putekļi .....	22
2.1.2. Stiegrojums .....	24
2.1.2.1. Tērauda šķiedras .....	25
2.1.2.2. Neorganiskās šķiedras.....	26
2.1.2.3. Oglekļa šķiedras .....	26
2.1.2.4. Polimēra šķiedras.....	27
2.1.2.5. Dabiskās šķiedras .....	27
2.2. Ģeopolimēra kompozītu īpašības .....	27
2.2.1. Mehāniskās īpašības .....	27
2.2.2. Ģeopolimēra kompozītu izturība.....	32
2.2.3. Ģeopolimēra kompozītu termiskā izturība .....	33

2.2.4. Ģeopolimēra kompozītu ilglaicīgās īpašības .....	33
2.2.4.1. Šļūdes īpašības .....	33
2.2.4.2. Rukuma īpašības.....	37
3. Ģeopolimēra mikrostruktūra .....	39
3.1. Sārma aktivizācijas reakcijas raksturs un īpašības .....	39
3.2. Elektrofiltru putekļu ģeopolimēra kompozītu poru struktūra .....	40
3.3. Ģeopolimēra un portlandcements kompozītu mikrostruktūru atšķirības.....	41
3.4. Uz kaļķa un silīcija bāzētu ģeopolimēra kompozītu mikrostruktūras attīstība .....	42
4. Ģeopolimēra kompozītu lietojums būvniecībā .....	43
4.1. Ģeopolimēra lietošana grunšu pastiprināšanā .....	43
4.2. Ģeopolimēra lietošana civilajās būvēs un infrastruktūras objektos.....	43
4.3. Ģeopolimēra lietošana javu formātā.....	45
4.4. Ģeopolimēra kā uguns ietekmi aizturošā slāņa lietošana .....	46
4.5. Ģeopolimēra kā siltumizolējoša materiāla lietošana .....	46
5. Ģeopolimēra kompozītu ilgtermiņa vides ietekme.....	47
5.1. Ģeopolimēra ilgtermiņa ietekmes uz vidi novērtējums, pamatojoties uz dzīves cikla novērtējumu.....	47
Secinājumi.....	51
Izmantotā literatūra.....	53

## SAĪSINĀJUMI

*ADPF* – fosilā kurināmā abiotiskā izsīkšana  
*BA* – smagie pelni  
*BFA* – biomasas elektrofiltru putekļi  
*Ca(OH)<sub>2</sub>* – kalcija hidroksīds  
*CAC* – kalcija aluminātu cements  
*CaCO<sub>3</sub>* – kalcija karbonāts  
*CT* – iepakojumu stikls  
*EFC* – dabai draudzīgs betons  
*FA* – elektrofiltru putekļi  
*FS* – ferrohroma izdedži  
*GBFS* – granulēti domnu krāsns izdedži  
*GGBFS* – malti granulētu domnu krāsns izdedži  
*GLSS* – granulēti svina kausēšanas izdedži  
*GP* – ģeopolimērs  
*GPC* – ģeopolimēra betons  
*IOT* – dzelzs rūdas pārstrādes pārpalikumi  
*KHFA* – augstas veiktspējas ultrasmalki kaolīna pelni  
*KL* – kaolīns  
*LS* – kaļķakmens  
*LWA* – vieglā pildviela  
*M* – molārs  
*MK* – metakaolīns  
*NaCl* – nātrija hlorīds  
*NaOH* – nātrija hidroksīds  
*NS* – nanosilika  
*OPC* – portlandcements  
*PAN* – poliakrilonitrils  
*PE* – polietilēns  
*PET* – polietilēntereftalāts  
*PCFA* – smalki malti ogļu elektrofiltru putekļi  
*POFA* – palmu eļļas pelni  
*PP* – polipropilēns  
*PVA* – polivinilspirts  
*RHA* – rīsu graudapvalku pelni  
*SD* – zāģa skaidas  
*SEM* – skenējošais elektronu mikroskops  
*SF* – mikrosilika



$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  – silīcija dioksīds / alumīnija (trīs) oksīds

*SMF* – silīcija-mangāna izgarojumi

*SSD* – sausa piesātināta virsma

# DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

## Darba mērķis

1. Novērtēt ar dažādām šķiedrām pastiprināta ģeopolimēru kompozīta mehāniskās un ilglaicīgās īpašības spiedē, stiepē un trīs punktu liecē.
2. Noteikt ilglaicīgo deformāciju ietekmi uz ģeopolimēra kompozītmateriālu, kas stiegrots ar dažādu šķiedru stiegrojumu, mikrostruktūru spiedē, stiepē un trīs punktu liecē.

## Darba uzdevumi

1. Izveidot ģeopolimēru kompozītmateriālus, kuru īpašības uzlabotas ar:
  - a) polivinilspirta šķiedrām;
  - b) tērauda šķiedrām;
  - c) polipropilēna šķiedrām;
  - d) oglekļa šķiedrām;
  - e) automašīnu riepu pārstrādē iegūtām tērauda šķiedrām.
2. Noteikt šo izstrādāto kompozītu mehāniskās un ilglaicīgās īpašības:
  - a) spiedes, stiepes un lieces stiprību;
  - b) šļūdes deformācijas spiedes, stiepes un trīs punktu lieces sloojumos un žūšanas rukumu.
3. Izstrādāt metodoloģiju ilglaicīgo deformāciju ietekmes noteikšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos.
4. Noteikt saikni starp parauga šķērsriezuma mikrostruktūras sastāvu un ilglaicīgo deformāciju izpausmi.

## Darba zinātniskā novitāte

1. Izstrādāts un patentēts jauns paņēmieni betonu un cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai dažādos sprieguma stāvokļos.
2. Izstrādāts un Latvijas Patentu valdē iesniegts patenta pieteikums jaunam paņēmienam ārējo iedarbju ietekmes novērtēšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos.
3. Pārbaudīta un analizēta šķiedru stiegrojuma ietekme uz ģeopolimēru kompozītu mehāniskajām un ilglaicīgajām īpašībām.
4. Novērtēta ilgtermiņa slodzes iedarbība uz ģeopolimēru kompozītu mikrostruktūru spiedes, stiepes un trīs punktu lieces sloojumā.

## Darba praktiskā nozīme

1. Izstrādāts jauns paņēmieni betonu un cementa kompozītmateriālu ilglaicīgo īpašību noteikšanai laboratorijas apstākļos dažādos sprieguma stāvokļos, tādējādi sniedzot iespēju iegūt plašāku informāciju par betona un cementa kompozītiem un veicinot to lietošanu būvniecībā.
2. Izstrādāts un iesniegts patenta pieteikums jaunam paņēmienam ārējo iedarbju ietekmes novērtēšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru, izmantojot pulētās virsmas paraugus un pētot tos skenējošajā elektronu mikroskopā, tādējādi sniedzot iespēju noteikt gan laboratorijā pārbaudītu, gan reālu būvju un inženierbūvju konstrukciju mikrostruktūras īpašības pēc pakļaušanas ilgstoša slogojuma iedarbībai.
3. Izstrādāti ģeopolimēru kompozītu sastāvi, kuriem noteiktas mehāniskās un ilglaicīgās īpašības. Šādus ģeopolimērus iespējams lietot būvkonstrukciju izveidē.
4. Paplašināta informācija par elektrofiltru putekļu saturošu ģeopolimēru kompozītu mehāniskajām un ilglaicīgajām īpašībām un šķiedru stiegrojuma ietekmi uz ilgtermiņa īpašībām, tādējādi veicinot šo kompozītu lietojumu inženiertehniskajā jomā.

## Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs ir rakstīts angļu valodā kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, kurā pētītas mehāniskās un ilglaicīgās īpašības nestiegtiem un ar šķiedru stiegrojumu stiegtiem ģeopolimēra kompozītiem, kā arī noteikta ilglaicīgo deformāciju ietekme uz ģeopolimēra kompozītu mikrostruktūru.

## Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti publicēti 22 *SCI* publikācijās (13 no tām – pilna teksta publikācijas konferenču rakstu krājumos, divi – patenti). Rezultāti ziņoti 15 starptautiskajās konferencēs.

### Publikāciju saraksts

1. **Gailītis R.**, Pudans P, Ziemeļis K, Bumanis G, Sprince A. Early-Age Creep and Shrinkage Properties of Printed and Cast Cement Composite (2023). *Materials Proceedings*. 13 (1) 35.
2. **Gailītis, R.**, Sprince, A., Kozlovskis, T., Pakrastins, L., Volkova, V. Impact of Polypropylene, Steel, and PVA Fibre Reinforcement on Geopolymer Composite Creep and Shrinkage Deformations (2023) *Journal of Physics: Conference Series*, 2423 (1).
3. Radina, L., Sprince, A., Borodinecs, A., Pakrastins, L., **Gailītis, R.**, Sakale, G. Foamed Geopolymers: A Review of Recent Studies (2023) *Journal of Physics: Conference Series*, 2423 (1).

4. **Gailitis, R.**, Pakrastins, L., Sprince, A., Radina, L., Sakale, G., Miernik, K. Different Fiber Reinforcement Effect on Fly Ash Based Geopolymer Long-Term Deflection in Three-Point Bending and Microstructure (2022) *Materials*, 15 (23).
5. Pupure, L., Varna, J., **Gailitis, R.**, Al-Maqdasi, Z., Pakrastins, L. Development of Methodology for Experimental Parameter Identification for Inelastic 3D Material Model (2022) *ECCM 2022 – Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials: Composites Meet Sustainability*, 6, pp. 282–289.
6. **Gailitis, R.**, Figiela, B., Abelkalns, K., Sprince, A., Sahmenko, G., Choinska, M., Guigou, M. D. Creep and shrinkage behaviour of disintegrated and non-disintegrated cement mortar (2021) *Materials*, 14 (24).
7. Sprince, A., Kozlovskis, T., **Gailitis, R.**, Valivonis, J., Korniejenko, K., Castel, A. Tensile creep of cement and concrete composites: Monitoring by means of 2D-digital image correlation (2021) *Applied Sciences (Switzerland)*, 11 (18).
8. Kozub, B., Bazan, P., **Gailitis, R.**, Korniejenko, K., Mierzwiński, D. Foamed geopolymer composites with the addition of glass wool waste (2021) *Materials*, 14 (17).
9. **Gailitis, R.**, Sprince, A., Kozlovskis, T., Radina, L., Pakrastins, L., Vatin, N. Long-term properties of different fiber reinforcement effect on fly ash-based geopolymer composite (2021) *Crystals*, 11 (7).
10. Sprince, A., **Gailitis, R.**, Pakrastins, L., Kozlovskis, T., Vatin, N. Long-term properties of cement mortar under compression, tension, and 3-point bending (2021) *Magazine of Civil Engineering*, 105 (5).
11. **Gailitis, R.**, Sprince, A., Pakrastins, L., Bazan, P., Korniejenko, K. Plain and PVA fibre-reinforced geopolymer compact tension specimen critical area surface composition assessment (2021) *Vide. Tehnologija. Resursi – Environment, Technology, Resources*, 3, pp. 72–77.
12. **Gailitis, R.**, Sprince, A., Pakrastins, L., Korniejenko, K., Kozlovskis, T. Plain Geopolymer Concrete Cross-Section Surface Analysis After Creep and Shrinkage Tests in Compression and Tension (2021) *RILEM Bookseries*, 31, pp. 13–24.
13. **Gailitis R.**, Sprince A., Pakrastins L., Korniejenko K., Kozlovskis T. Reinforced and Plain Geopolymer Concrete Specimen Cross-section Composition Influence on Creep Strains (2021) *Proceedings of 4th International RILEM conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites (Microdurability2020)*.
14. **Gailitis, R.**, Korniejenko, K., Sprince, A., Pakrastins, L. Comparison of the long-term properties of foamed concrete and geopolymer concrete in compression (2020) *AIP Conference Proceedings*, 2239.
15. **Gailitis, R.**, Sliseris, J., Korniejenko, K., Mikula, J., Lach, M., Pakrastins, L., Sprince, A. Long-Term Deformation Properties of a Carbon-Fiber-Reinforced Alkali-Activated Cement Composite (2020) *Mechanics of Composite Materials*, 56 (1), pp. 85–92.

16. Sprince, A., Pakrastins, L., **Gailītis, R.** Long-Term Parameters of New Cement Composites (2020) RILEM Bookseries, 24, pp. 85–94.
17. **Gailītis, R.**, Kornijejenko, K., Łach, M., Sliseris, J., Morán, J., Rodriguez, E., Miķuļa, J. Mechanical Properties of Geopolymer Concretes Reinforced with Waste Steel Fibers (2019) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 660 (1).
18. **Gailītis, R.**, Sprince, A., Pakrastins, L., Sahmenko, G., Kozlovskis, T. Drying Shrinkage Deformation Comparison between Foam Concrete, Geopolymer Concrete, Disintegrated, and Non-disintegrated Cement Mortar (2019) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 660 (1).
19. **Gailītis R.**, Sprince A., Pakrastins L., Shakhmenko G., Kozlovskis T., Radina L. Long-Term Properties of Foamed Concrete (2019) proceeding of 13th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques (MBMST 2019).
20. **Gailītis, R.**, Sprince, A., Pakrastins, L., Shakhmenko, G., Kozlovskis, T. Comparison of the long-term properties in compression of different size foamed concrete (2019) Vide. Tehnologija. Resursi – Environment, Technology, Resources, 3, pp. 41–44.

#### **Nacionālie patenti**

1. Sprince A., Pakrastins L., Radina L., **Gailītis R.**, Kozlovskis T. Paņēmiens betona un cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai dažādos sprieguma stāvokļos/ Method for Determination of Long-Term Properties of Concrete and Cement Composites in Various Stress Conditions/ Latvian patent application No. **15659B**.
2. **Gailītis R.**, Sprince A., Pakrastins L. Paņēmiens ārējo iedarbju ietekmes noteikšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos/ Technique for Outside Effect Determination on Concrete and Cement Composite Microstructure in Various Stress-Strain States Latvian patent application No. **LVP2023000039 (iesniegts LR patentu valdē)**.

#### **Darba rezultāti prezentēti 15 zinātniskajās konferencēs.**

1. 10th Scientific-Technical Conference on Material Problems in Civil Engineering MatBud'2023, Cracow, Poland, 19–21 April, 2023.
2. 5th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IMST 2022; Riga; Latvia; 28 September 2022 through 30 September 2022.
3. 2022 Global Conference on Polymers, Plastics and Composites (PPC2022) Budapest, Hungary, March 21–22 2022.
4. RTU 62. starptautiskā zinātniskā konference apakšsekcija «Būvniecība», tiešsaiste, 28. oktobris 2021.
5. World Symposium on Mechanical – Materials Engineering & Science (WMMES2021) Prague, Czech Republic, 9–11 September, 2021.
6. 13th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources; online, 17th of June–18th of June 2021.

7. The Biot-Bažant Conference on Engineering Mechanics and Physics of Porous Materials (A One-time Fusion of Concreep and the Biot Conference on Poromechanics); online, 1st of June–3rd of June 2021.
8. 4th International RILEM conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites (Microdurability2020); online, 29th of April–25th of May 2021.
9. International RILEM Conference on Early-age and Long-term Cracking in RC Structures (CRC2021); online, 9th of April–10th of April 2021.
10. RTU 61. starptautiskā zinātniskā konference apakšsekcija «Būvniecība», tiešsaiste, 2020. gada 22. oktobris.
11. 1st International Scientific Conference Advanced Construction and Architecture 2020 (ACA2020).; online, 23rd of September–25th of September 2020.
12. 4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IMST 2019; Riga; Latvia; 25 September 2019 through 27 September 2019.
13. 4th Polish Congress of Mechanics, PCM 2019 and the 23rd International Conference on Computer Methods in Mechanics, CMM 2019; Krakow; Poland; 8 September 2019 through 12 September 2019.
14. 12th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, RTA, Rezekne, June 20–22, 2019 (Plenary Session).
15. 13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, Vilnius, Lithuania, May 16–17, 2019.

#### **Autora apliecinājums par aizstāvamām publikācijām**

Rihards Gailītis veica lielāko daļu eksperimentu, novērtēja un analizēja rezultātus. Viņš ir patstāvīgi uzrakstījis visas darbā pievienotās publikācijas, II patentu un piedalījies I patenta metodikas testēšanā. Līdzautori piedalījās eksperimentu plānošanā, materiāltehniskā nodrošinājuma sagādē, SEM apmācību procesā un atsevišķu paraugu sagatavošanā, kā arī sniedza konstruktīvu kritiku par iegūtajiem rezultātiem un vērtīgus ieteikumus, kas paaugstināja publikāciju zinātnisko kvalitāti.

Raksta Nr.	Publikācijas dati	Korespondējošais autors	R. Gailīša ieguldījums publikācijā
I raksts	<b>Gailītis, R.</b> , Korniejenko, K., Łach, M., Sliseris, J., Morán, J., Rodriguez, E., Mikuła, J. Mechanical Properties of Geopolymer Concretes Reinforced with Waste Steel Fibers (2019) IOP Conference Series: Materials	R. Gailītis	R. Gailītis veica 95 % mehānisko īpašību testēšanu un novērtēšanu, oriģināl manuskripta rakstīšanu un rezultātu noformēšanu un analīzi.

	Science and Engineering, 660 (1), art. no. 012007, Open Access, SNIP 0.344.		
II raksts	<b>Gailītis, R.</b> , Sliseris, J., Korniejenko, K., Miķuļa, J., Lāch, M., Pakrastins, L., Sprince, A. Long-Term Deformation Properties of a Carbon-Fiber-Reinforced Alkali-Activated Cement Composite (2020) Mechanics of Composite Materials, 56 (1), pp. 85–92, SNIP 0.832.	R. Gailītis	R. Gailītis veica 95 % paraugu sagatavošanu ilglaicīgajiem un mehāniskajiem testiem, kā arī veica testus un rezultātu apkopošanu un analīzi, manuskripta sagatavošanu, kā arī apguva SEM analīzes iespējas.
III raksts	<b>Gailītis, R.</b> , Sprince, A., Kozlovskis, T., Radina, L., Pakrastins, L., Vatin, N. Long-term properties of different fiber reinforcement effect on fly ash-based geopolymer composite (2021) Crystals, 11 (7), art. no. 760, Open Access, SNIP 0.821.	R. Gailītis	R. Gailītis sagatavoja ģeopolimēra paraugus, veica 80 % ilglaicīgo īpašību testu testēšanas, veica pilnu rezultātu apkopošanu, apstrādi analīzi un formatēšanu, kā arī sagatavoja rakstu un veica visus recenzēšanas procesā konstatētos labojumus un ieteikumus.
IV raksts	<b>Gailītis R.</b> , Sprince A., Pakrastins L., Korniejenko K., Kozlovskis T. Reinforced and Plain Geopolymer Concrete Specimen Cross-section Composition Influence on Creep Strains (2021) Proceedings of 4th International RILEM conference on Microstructure Related Durability of Cementitious	R. Gailītis	R. Gailītis veica pilnu paraugu sagatavošanu un 85 % ilglaicīgo īpašību testēšanu, izstrādāja un eksperimentāli patstāvīgi veidoja mikrostrukturāras paraugu sagatavošanas metodiku un tālāku pētniecību ar SEM un kvantitatīvo analīzi, kā arī patstāvīgi sagatavoja rakstu.

	Composites (Microdurability2020), Open Access.		
V raksts	<b>Gailitis, R.</b> , Sprince, A., Pakrastins, L., Kornijejenko, K., Kozlovskis, T. Plain Geopolymer Concrete Cross-Section Surface Analysis After Creep and Shrinkage Tests in Compression and Tension (2021) RILEM Bookseries, 31, pp. 13–24, SNIP 0.320.	R. Gailitis	R. Gailītis veica visu paraugu sagatavošanu, 65 % ilglaicīgo īpašību un mehānisko īpašību testu, pilnu mikrostruktūras paraugu sagatavošanu, pētīšanu un analīzi, kā arī rezultātu apstrādi, raksta sagatavošanu, iesniegšanu un labošanu atbilstoši recenzenta norādījumiem.
VI raksts	<b>Gailitis, R.</b> , Sprince, A., Pakrastins, L., Bazan, P., Kornijejenko, K. Plain and PVA fibre-reinforced geopolymer compact tension specimen critical area surface composition assessment (2021) Vide. Tehnologija. Resursi – Environment, Technology, Resources, 3, pp. 72–77, Open Access.	R. Gailitis	R. Gailītis veica 80 % paraugu sagatavošanu, 80 % ilglaicīgo īpašību testēšanu, 100 % mikrostruktūras paraugu sagatavošanu, pētīšanu rezultātu apkopošanu, kā arī apkopēja, apstrādāja visus iegūtos rezultātus, analizējot un atspoguļojot tos rakstā.
VII raksts	<b>Gailitis, R.</b> , Pakrastins, L., Sprince, A., Radina, L., Sakale, G., Miernik, K. Different Fiber Reinforcement Effect on Fly Ash Based Geopolymer Long-Term Deflection in Three-Point Bending and Microstructure (2022) Materials, 15 (23), Open Access, SNIP 1.137.	R. Gailitis	R. Gailītis veica 100 % paraugu sastāvu izveidi un sagatavošanu, 60 % paraugu ilglaicīgo un mehānisko īpašību testēšanu, 100 % mikrostruktūras paraugu sagatavošanu, pētīšanu, analīzi, kā arī 100 % manuskripta sagatavošanu, iesniegšanu, labošanu atbilstoši recenzentu ieteikumiem.



I patents	Sprince A., Pakrastins L., Radina L., <b>Gailītis R.</b> , Kozlovskis T., Paņēmiens betona un cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai dažādos sprieguma stāvokļos/ Method for Determination of Long-Term Properties of Concrete and Cement Composites in Various Stress Conditions/ Latvian patent No. 15659B.	A. Sprince	R. Gailītis piedalījās izstrādātās metodikas validācijā laboratorijas apstākļos, testējot paraugu ilglaicīgās īpašības spiedē, stiepē un trīs punktu liecē.
II patents	<b>Gailītis R.</b> , Sprince A., Pakrastins L., Paņēmiens ārējo iedarbju ietekmes noteikšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos/ Technique for Outside Effect Determination on Concrete and Cement Composite Microstructure in Various Stress-Strain States/ Latvian patent application No. LVP2023000039.	R. Gailītis	R. Gailītis izstrādāja konceptu paņēmienam, kam atbilstoši izstrādāja metodi pulēto virsmas paraugu sagatavošanai, to virsmu analīzei un novērtēšanai, kā arī validēja izstrādāto metodi un publicēja rezultātus. Viņš sagatavoja patenta pieteikuma tekstu un pilnveidoja to atbilstoši RTU patenta specialistes ieteikumiem.

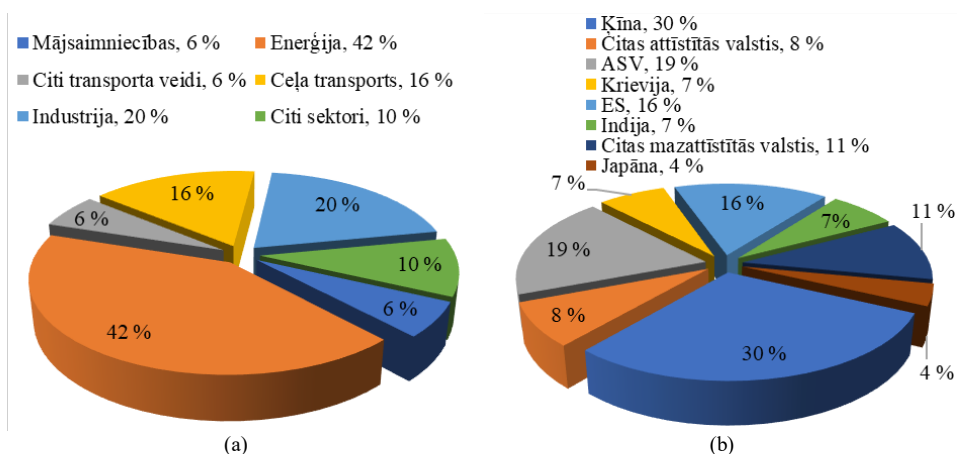
### Aizstāvamās tēzes

1. Polipropilēna šķiedru 1–5 % apjomā un 5 % automašīnas riepu kordu pievienošana ģeopolimēra matricā samazina šļūdi spiedē; 1 % tērauda šķiedru iestrādāšana samazina šļūdi trīs punktu liecē, salīdzinot ar nestiegotu ģeopolimēra kompozīta šļūdes deformācijām. Pievienojot 1 % oglekļa šķiedras vai 1 % tērauda šķiedras spiedē, 1 % *PVA* šķiedru stiepē un 0,5 % *PVA*/0,5 % tērauda un 1 % *PVA* šķiedru liecē, testētiem paraugiem palielinās šļūdes deformācijas, salīdzinot ar nestiegotiem paraugiem. Tas galvenokārt ir saistīts ar ievērojami lielāku polipropilēna šķiedru īpatnējo virsmas laukumu un labāku saisti starp ģeopolimēra matricu un tērauda šķiedrām.
2. Šķiedru iestrādāšana ģeopolimēra kompozītā samazina rukuma deformācijas spiedes paraugiem tikai gadījumos ar 1–5 % polipropilēna šķiedru, 1 % tērauda šķiedru un 5 % automašīnu riepu kordu stieģojuma apjomu, stiepes paraugiem – ar 1 % polivinilspirta šķiedru pievienošanu, salīdzinot ar nestiegotiem paraugiem. Pievienojot 1 % oglekļa šķiedru, rukums nesamazinās vērā ņemamās vērtībās. Tas ir tāpēc, ka šķiedru pievienošana maisīšanas laikā maisījumā iesaista vairāk gaisu un atbilstoši palielinās porainība un mikroplaisu apjoms paraugā.
3. Izstrādāts un patentēts “Paņēmiens betonu un cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai dažādos sprieguma stāvokļos” No. 15659B.
4. Izstrādāts un iesniegts patenta valdē patenta pieteikums “Paņēmiens ārējo iedarbju ietekmes noteikšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos” No. LVP2023000039.
5. Analizējot lineārā stadijā testētu šļūdes un žūšanas rukuma paraugu mikrostruktūru, konstatēts, ka stiepes laikā ilglaicīgās īpašības būtiski ietekmē mikroplaisas. Stiepes paraugiem, kuriem noteiktas gan šļūdes, gan rukuma deformācijas, šo plaisu apjoms ir tuvs. Tādi paši rezultāti ir redzami paraugiem, kas pakļauti trīs punktu lieces slogojumam. Paraugiem, kuriem noteiktas ilgstošās deformācijas spiedē, mikroplaisas nav atklātas. Mikroplaisu daudzuma atšķirības ir saistītas ar paraugu virsmas laukumu un izmēru atšķirībām.

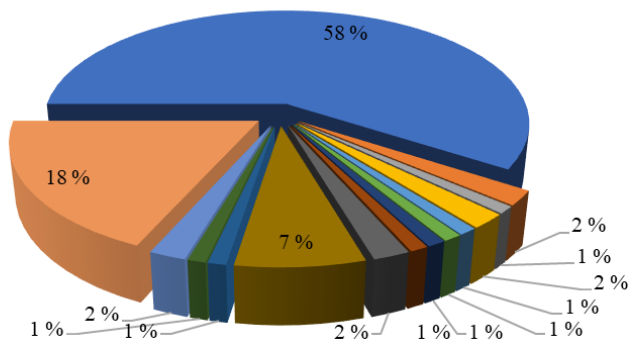
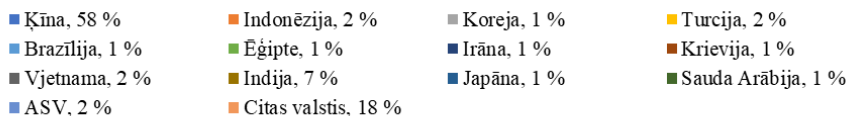
## 1. IEVADS

Portlandcementu (*OPC*) izmanto kā saistvielu lielākajā daļā betona konstrukciju. No betona būvētās ēkas un infrastruktūra ir drošas un izturīgas. Turklāt *OPC* kompozītu īpašības un to attīstība ir labi zināma [1]. Tāpēc pieprasījums pēc *OPC* ir liels, un paredzams, ka tuvākajos gados tas pieaugs straujās urbanizācijas un lielā dzīvojamo ēku pieprasījuma dēļ [2]. Paredzams, ka nākamo 30 gadu laikā ikgadējais saražotā *OPC* apjoms palielināsies par 50 % [3], [4]. Neraugoties uz visām *OPC* pozitīvajām īpašībām, lielākais tā trūkums ir augstā energoietilpība, kas nozīmē arī lielas CO<sub>2</sub> emisijas ražošanas procesā.

Oglekļa dioksīds un citi piesārņotāji ir galvenais globālās sasilšanas cēlonis. 1. a attēlā, kur parādītas CO<sub>2</sub> emisijas pasaulē, redzams, ka no izmantošanas viedokļa galvenais CO<sub>2</sub> emisiju avots ir enerģijas ražošana, kas rada divas reizes vairāk CO<sub>2</sub> nekā otrais avots, proti, rūpniecība. No valstu viedokļa (1. b att.) redzams, ka lielākais piesārņotājs ir Ķīna, kas emitē par 1/3 vairāk CO<sub>2</sub> nekā ASV un gandrīz divas reizes vairāk nekā ES. Saskaņā ar Amerikas Savienoto Valstu Ģeoloģiskā dienesta datiem (2. att.) pasaulē ir nevienmērīga *OPC* ražošana. Lielākie ražotāji atrodas Austrumāzijā [5].



1. att. CO<sub>2</sub> globālās emisijas: (a) tautsaimniecības sektors; (b) valsts [6].



2. att. Portlandcimenta globālais ražošanas sadalījums [5].

Atkarībā no avota tiek ziņots, ka cementa un betona ražošanas CO<sub>2</sub> radītās emisijas ir 5–30 %. Avotā [7] ziņots, ka cementa ražošana rada 5 % no visām CO<sub>2</sub> emisijām, citi lēš, ka cementa klinkera ražošana 2017. gadā radīja 8 % no pasaules CO<sub>2</sub> emisijām [8], [9], kas 2019. gadā ir samazinājušās līdz 4 % [10]. Vēl citi apgalvo, ka kopumā betona ražošana rada līdz pat 30 % no visām CO<sub>2</sub> emisijām [11].

Kā galvenie siltumnīcefekta gāzu emisijas avoti tiek norādīti kalcinēšanas process un izejvielu dedzināšana [12], [13]. CO<sub>2</sub> emisiju apjoms ir satraucošs, un to samazināšanos pēdējā laikā galvenokārt izraisa *Covid-19* pandēmija un turpmākie traucējumi pasaules piegādes ķēdēs, nevis pieprasījuma samazināšanās vai jaunu materiālu lietojuma ieviešana būvniecības vidē. Tāpēc ir ļoti svarīgi veikt pasākumus un krasi samazināt CO<sub>2</sub> emisijas, veicot jēgpilnus pasākumus, izvēloties būvmateriālus.

Betona un OPC CO<sub>2</sub> emisijas var samazināt, izmantojot dažādas pieejas:

- cementa aizstāšana ar otrreizējām izejvielām un/vai otrreizējiem cementa materiāliem;
- alternatīvu kurināmā un enerģijas resursu izmantošana klinkera cementa ražošanā;
- alternatīvu saistvielu izmantošana cementa ražošanā;
- ražošanas procesu un metožu izmaiņas [14].

Viens no iespējamiem risinājumiem ir ģeopolimēra materiāls, ko var ražot no tādiem otrreizēji pārstrādātiem materiāliem kā elektrofiltru putekļi, kvarca izmijas, dažādi izdedži, metakaolīna un citiem, kas pilnībā vai daļēji aizstātu cementu betonā [15], [16]. Tiek lēsts, ka sārnu aktivizētam betonam ir līdz pat 60 % mazāks enerģijas patēriņš nekā portlandcimenta betonam [17]. Turklāt tiek apgalvots, ka ģeopolimēru kompozītiem ir tādas pašas vai pat labākas mehāniskās īpašības nekā OPC kompozītiem. Lai gan ģeopolimēru plašāka komerciāla lietojuma nolūkos ir veikti daudzi pētījumi, ir nepieciešami vairāk pētījumu par tā ilgtermiņa uzvedību un izturību [18]. Ir

konstatēts, ka ģeopolimēru kompozītiem ir lielāks rukums polimerizācijas laikā, kā arī šķīdes vērtības paaugstinātā temperatūrā un citās specifiskās situācijās [19]–[27]. Taču trūkst informācijas, kādas ir polimerizēto ģeopolimēru kompozītmateriālu elementu šķīdes un rukuma īpašības un vai tiem ilgtermiņā būtu līdzīgas ilglaicīgās īpašības kā kompozītiem uz *OPC* bāzes.

## 2. ĢEOPOLIMĒRA KOMPOZĪTI

1978. gadā Davidovits atklāja jaunu cieta aluminosilikāta reakciju ar sārma šķīdumu, lai iegūtu ģeopolimēru (*GP*). Ģeopolimērs ir saistviela, ko iegūst, reaģējot alumīnija oksīdam ( $Al_2O_3$ ) un silīcija dioksīdam ( $SiO_2$ ). Šī saistviela savā pamatformā atšķiras no *OPC*, jo satur nelielu daudzumu Ca. Šai saistvielai ir tetraedriskā struktūra, kas veidota ar garām kovalentajām saitēm [28]. Ir konstatēts, ka *GP* veidošanās efektivitāti un ātrumu ievērojami ietekmē hidroksīds vai hidroksīda bāze kopā ar silikātu [29]. Līdz šim *GP* izgatavošanai ir izmantoti dažādi silikātu un aluminosilikātu materiāli, piemēram, sarkanās dūņas, rīsu graudapvalku pelni, malti granulēti domnu sārņi, elektrofiltru putekļi un metakaolīns [30]–[32].

Literatūrā par ģeopolimēriem tiek apgalvots, ka vairumā gadījumu ģeopolimēru kompozīti uzrāda tādas pašas vai labākas īpašības kā portlandcements kompozīti. Pamatīpašību atšķirības starp ģeopolimēru betonu un parasto portlandcements betonu apkopotas 1. tabulā.

1. tabula

Ģeopolimēra un portlandcements betona īpašību salīdzinājums [1], [33]–[41]

Īpašība	Ģeopolimēra betons	<i>OPC</i> betons	Komentārs
Spiedes stiprība	Augstāka	Zemāka	Agrīnā vecumā <i>GPC</i> iegūst lielāku izturību, salīdzinot ar <i>OPC</i> . Galvenie faktori, kas ietekmē <i>GPC</i> stiprību, ir aluminosilikāta avots, aktivatora veids, sacietēšanas apstākļi un ilgums, kā arī prekursoru reaktivitāte
Ūdens absorbcija	Vidēja	Nedaudz zemāka	<i>GPC</i> matricas iekšējā porainība nedaudz palielina tās ūdens absorbciju atšķirībā no <i>OPC</i>
Saistīšanās laiks	Ātrāks	Lēnāks	Kopumā <i>GPC</i> tiek uzskatīts par ātrāk sacietējušu, bet <i>GPC</i> sacietēšanas laiku atšķirībā no <i>OPC</i> vairāk ietekmē tādi faktori kā aktivatora veids, izejmateriāla īpašības, temperatūras iedarbība
Rukums	Vidējs	Mazāks	Cietināšanas apstākļi un maisījuma mitruma saturs būtiski ietekmē ar saraušanos saistīto plaisu veidošanos līdz <i>GPC</i>
Stiepes stiprība	Augstāka	Zemāka	<i>GPC</i> uzrāda lielāku stiepes izturību, kā arī spiedes izturību
Izturība	Augstāka	Zemāka	Silikātu un alumīnija oksīda produktu klātbūtnē nodrošina labāku <i>GPC</i> izturību
Izturība pret skābēm	Augstāka noturība	Zemāka noturība	<i>GPC</i> sastāvā esošie aluminosilikāti nodrošina labāku izturību pret skābēm nekā <i>OPC</i>
Ugunsizturība	Parasti augstāka	Limitēta	Pateicoties tā ķīmiskajam sastāvam, <i>GPC</i> uguns klātbūtnē degradējas mazāk, savukārt <i>OPC</i> uzrāda mazāku ugunsizturību
Sasalšanas un atkuššanas cikli	Mazāk uzņēmīgs	Vairāk uzņēmīgs	<i>GPC</i> ir izturīgāks pret agresīvu vidi, kā arī pret straujām vides temperatūras izmaiņām
CO <sub>2</sub> emisijas	Zemas	Augstas	Kopumā <i>GPC</i> aprites cikla laikā potenciālās CO <sub>2</sub> emisijas ir mazākas nekā <i>OPC</i>
Porozitāte	Vidēja	Zema	<i>GPC</i> šķērsgriezumā ir lielāks poru skaits
Siltumizolējošās īpašības	Augstākas	Limitētas	Atkarībā no sacietēšanas apstākļiem <i>GPC</i> prekursoru un aktivatoru veidi uzrāda labākas izolācijas īpašības nekā <i>OPC</i>

Nākamajās nodaļās tiks aplūkotas ģeopolimēru īpašības, kā arī to mikrostruktūra un vides ietekme. Apakšnodaļās sīkāk tiks aplūkotas ģeopolimēru sastāvdaļas, īpašības, mikrostruktūra un tās ietekme, kā arī aprites cikla novērtējums.

## 2.1. Izejmateriāli

### 2.1.1. Aluminosilikāti

Aluminosilikāti jeb materiāli, kas sastāv no alumīnija, silīcija un skābekļa, ir *GP* materiālu pamatsastāvdaļas. Tos iegūst no atkritumiem vai ražošanas pārpalikumiem. Tie ir neaizstājami *GP* matricas izgatavošanā. Elektrofiltru putekļi (*FA*) pašlaik ir plašāk izmantotais atkritumu materiāls *GP* ražošanā. Ir ziņots arī par citiem aluminosilikātu avotiem gan savstarpējā kombinācijā, gan kā patstāvīgiem aluminosilikātiem. Aluminosilikātu materiāli, kā arī piedevas *GP* izgatavošanai norādītas 2. tabulā.

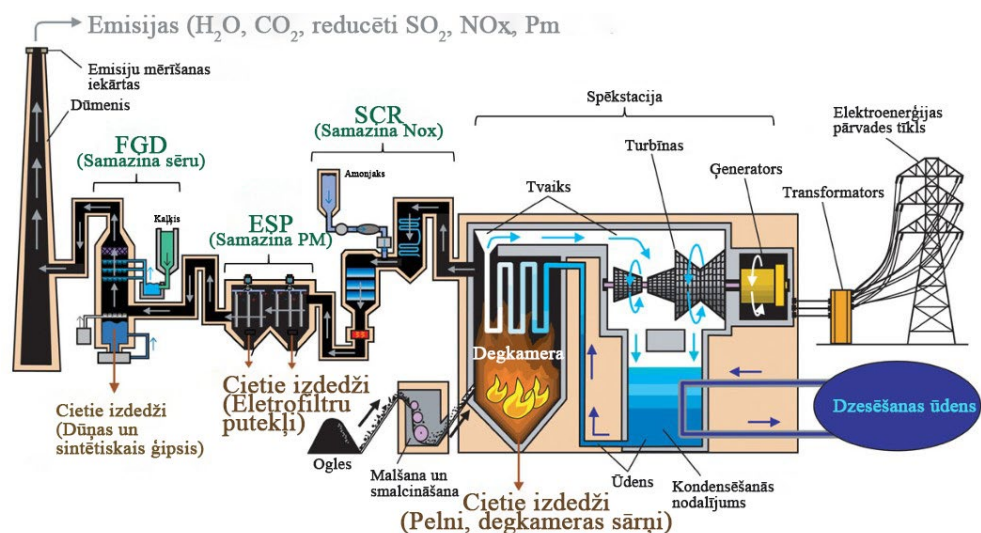
2. tabula

Ģeopolimēra kompozītu izveidē lietojamie aluminosilikātu avoti [42]

Tips	Abreviatūra
<b>(a) Aluminosilikāti kā izejmateriāls</b>	
Elektrofiltru putekļi	<i>FA</i>
Smagie pelni	<i>BA</i>
Granulēti domnu krāsns izdedži	<i>GBFS</i>
Meta kaolīns	<i>MK</i>
Dabisks ceolīts	
Kaolīns	<i>KL</i>
Palmu eļļas pelni	<i>POFA</i>
Granulēti svina kausēšanas izdedži	<i>GLSS</i>
Rīsu graudapvalku pelni	<i>RHA</i>
Ferrohroma izdedži	<i>FS</i>
Augstas veiktspējas ultrasmalki kaolīta pelni	<i>KHFA</i>
Biomases elektrofiltru putekļi	<i>BFA</i>
Silīcija-mangāna izgarojumi	<i>SMF</i>
<b>(b) Piedevas kā izejmateriāls</b>	
Kalcija aluminātu cements	<i>CAC</i>
Nanosilika	<i>NS</i>
Kalcija hidroksīds	$\text{Ca(OH)}_2$
Portlandcements	<i>OPC</i>
Mikrosilika	<i>SF</i>

#### 2.1.1.1. Elektrofiltru putekļi

Elektrofiltru putekļi rodas sadegšanas procesā rūpniecības nozarēs, kurās kā enerģijas avotu vai ražošanas sastāvdaļu izmanto ogles. Galvenokārt tās ir elektrostacijas un metalurģijas rūpnīcas. Ogļu spēkstacijas darbības shēma, kurā iegūst elektrofiltru putekļus, redzama 3. attēlā.



3. att. Akmeņogļu termoelektrostacijas darbības shēma [43].

Elektrostacijās ogles tiek sasmalcinātas un kopā ar gaisu ievadītas sadedzināšanas kamerā. Šeit sasmalcinātās ogles sadeg, radot siltumu un izkausētu minerālu. Katla caurules aizvada visu siltumu no krāsns. Rezultātā kurināmā gāze kļūst vēsāka, minerālvielu atlikums sacietē un veido pelnus. Rupjie pelni nokrīt uz degkameras apakšā un tālāk tiek raksturoti kā izdedži. Pelnu daļiņas paliek kurināmā gāzē. Gāzei paceļoties, pelnu daļiņas tiek uztvertas elektrostatiskajos uztvērējos vai auduma filtros, kas ir izvietoti atbilstoši daļiņu emisijas prasībām.

Elektrofiltru putekļi satur  $Al_2O_3$  un  $SiO_2$ , kas ir galvenās sastāvdaļas, no kurām var veidot cementējošu vielu. Ūdens klātbūtnē elektrofiltru putekļi reaģē ar kaļķi  $Ca(OH)_2$ , veidojot savienojumus, kas ir identiski cementam. Tā izmantošana betonā dod ievērojamu efektu, un ir konstatēts, ka tam ir liels potenciāls kā *GP* palīgmateriālam. Betons, kas satur elektrofiltru putekļus, ir ar lielāku stiprību un izturīgāks, salīdzinot ar parasto betonu. Izmantojot elektrofiltru putekļus, samazinās betona izmaksas un palielinās izturība pret sulfātu iedarbību [44].

Izmantojot elektrofiltru putekļus, var saglabāt un pat samazināt poligonu platības, samazināt ūdens patēriņu un enerģijas patēriņu, kā arī līdz minimumam samazināt siltumnīcas efekta gāzu emisijas. Izmantojot elektrofiltru putekļus, tiek samazināts nepieciešamais *OPC* daudzums, tādējādi ievērojami samazinās arī  $CO_2$  emisijas. Uz katru izmantoto elektrofiltru pelnu tonnu  $CO_2$  emisijas samazinās par tonnu. Visā gada vieglo pelnu krājumu izmantošana betonā būtu līdzvērtīga 25 %  $CO_2$  izmešu likvidēšanai, ko rada transportlīdzekļi visā pasaulē [45].

Autora **I–VII rakstā** [46]–[52] *GP* izgatavošanai tika izmantoti elektrofiltru putekļi no ogļu elektropēkstācijas, kas atrodas Skavinā, Polijā. Tika konstatēts, ka šie elektrofiltru putekļi ir īpaši piemēroti ģeopolimēram, jo tajos ir augsts  $SiO_2$  (47,81 %) un  $Al_2O_3$  (22,80 %) saturs.



### 2.1.2. Stiegrojums

Praksē betona ražošanā betonam tiek pievienotas šķiedras, lai samazinātu vai pat pilnībā novērstu plaisāšanu, ko izraisa rukums un šļūde, agrīnā vecumā. Šķiedras palielina arī betona stiepes stiprību un izturību pret plaisāšanu vēlākajos tā kalpošanas posmos [53]. Bieži vien ar šķiedrām stiegrota ģeopolimēru kompozīta īpašībās dominē šķiedru materiāla īpašības, nevis saistvielas īpašības [54]. Labs piemērs ir polipropilēna šķiedras, kurām neatkarīgi no saistvielas veida (uz *OPC* bāzes vai ģeopolimēra) ir vāja sasaiste ar matricu un slikta mijiedarbība ar to, kas vēl vairāk samazina kompozīta spiedes stiprību [55]–[59]. Par stiegrojumu izmantoto šķiedru fizikālās un mehāniskās īpašības apkopotas 3. tabulā.

## Šķiedru stiebrojuma fizikālās un mehāniskās īpašības [60]–[65]

Materiāla kategorija			Blīvums (g/cm <sup>3</sup> )	Stiepes stiprība (MPa)	Elastības modulis (GPa)	Maksimālais pagarinājums (%)
Metāliskās		Tērauda	7,65–7,85	345–2850	200–210	0,5–3,5
Oglekļa bāzes	Sintētiskās	<i>PAN</i>	1,8–1,9	2500–7000	250–500	0,6–2,5
		<i>Rayon</i>	1,4–1,7	500–1500	35–60	2,5
		<i>Mesophase patch</i>	1,6–2,2	1500–3500	200–900	0,3–0,9
		Grafēna		130000	1000	
		Oglekļa nanocaurulītes		11000–63000	1000–1800	
		Polivinilspirta	1,2–1,3	800–2500	29–42	5,7–7
		Polipropilēna	0,9–0,95	240–760	1,5–10	15–80
		Polietilēna	0,92–0,97	80–3500	5–113	3–100
		Aramīda	1,38–1,47	2300–3500	63–120	2–4,5
		Akrīla	1,16–1,18	270–1000	13,8–19,3	
		Polietilēntereftalāta	1,3–1,4	420–450	3,1–10	11,2
		Poliestera	1,22–1,38	580–1100	15	35,0
		Neilona	1,13–1,41	440–1000	4,1–5,2	16–20
		Dabiskās	Dzutas	1,3–1,5	250–350	26–32
	Sizala		1,34–1,45	280–750	13–26	3,0–5,0
	Kokosrieksta		0,87–1,4	120–200	19–26	10,0–25,0
	Bambusa		0,6–1,1	140–800	11–32	2,5–3,7
	Kokvilnas		1,5–1,6	390–600	5,8–11	6,0–10,0
	Palmu		1,3–1,46	21–60	0,6	
	Vilnas		1,3	160	3,5	
	Kaņepes		1,4–1,5	270–900	23,5–90	1,0–3,5
	Kenafa		1,4	223–930	14,5–53	1,5–2,7
	Kokšķiedras		1,15–1,46	95–230	2,8–6	15–51,4
	Banāna šķiedras		1,4	500	12,0	1,5–9
	Lina auduma		1,5	500–1500	50–70	
	<i>Bagasse</i>	1,3	222–290	17–27	1,1	
<i>Abaca</i>	1,5	400–980	6,2–20	1–10		
Neorganiskās	E-glass	2,5–2,62	3100–3800	72,4	4,8	
	S-glass	2,46–2,49	4020–4650	86,9	5,4	
	C-glass	2,6	3310	69	4,8	
	AR-glass	2,7	3240	73	4,4	
	Bazalta	2,65–2,80	3000–4840	89–110	3,00–3,15	
	Azbesta	2,55	620	160		
	Alumīnija oksīda	3,3–3,95	1700–2000	300–380	0,4	
	Aluminosilikāta	3,4	1590–2550	200–248	0,8–1	
	Silkanitrīda		2500–4800	195–300		
	Silīkarskābes	2,5–2,7	2200–3450	221–250		
	Bora nitrīda	7,65–7,85	2100	345		

Turpmākajās apakšnodaļās aprakstītas rūpnieciski visbiežāk izmantotās šķiedras.

### 2.1.2.1. Tērauda šķiedras

Tērauda šķiedras tiek izmantotas galvenokārt to lielās mehāniskās izturības, elastības un plašās pieejamības dēļ. Saskaņā ar *ASTM A820-16* tērauda šķiedras var iedalīt piecās grupās atkarībā no to izmantošanas un mērķiem. Tās ir: (1) gludi vai deformēti auksti velmētas stieples gabali;

(2) gluda vai deformēta sagriezta loksne; (3) karsti velmēta stieple; (4) frēzēta stieple; (5) modificētas auksti velmētas tērauda stieples šķiedras. Šīm šķiedrām ir plašs stiepes izturības (310–2850 MPa) un galīgā pagarinājuma (0,5–3,5 %) diapazons, kas atšķiras atkarībā no izejmateriāla un izgatavošanas procesa [66]–[68].

Galvenais tērauda šķiedru izmantošanas trūkums ir korozija. Lai ierobežotu korozijas ietekmi, galvenokārt tiek izmantoti divi risinājumi: (1) nerūsējošā tērauda sakausējumu izmantošana, piemēram, austenīta, ferīta, martensīta, rūdīts tērauds [69]; (2) aizsargpārklājums uz šķiedrām, piemēram, varš un cinks [70], [71].

**I, III, IV un VII rakstā** [46], [48], [49], [52] analizētajos sastāvos tika izmantotas tērauda šķiedras. **I un IV rakstā** [46], [49] aprakstītajos pētījumos izmantoti tērauda šķiedru atkritumi, kas iegūti no automobiļu riepu pārstrādes. Riepu tērauda kordi nav izmantojami metalurģijā, tāpēc tie lielākoties nonāk izgāztuvēs. Sagatavojot paraugus, tika novērots, ka atšķirīgo šķērsgriezuma izmēru un garuma dēļ bija grūti vai cilindrisko paraugu sagatavošanas gadījumā gandrīz neiespējami iestrādāt riepu kordus ģeopolimēra sastāvā maisīšanas laikā, kā tas būtu parastā tērauda šķiedru stiegrojuma gadījumā. Tāpēc piemērotāks veids, kā iestrādāt tērauda šķiedru armatūras atkritumus, ir ievietot tos veidnē un pēc tam iepildīt un vibrēt matricu. **III un VII rakstā** [48], [52] aprakstītajos pētījumos izmantotas *La Gramigna gold* (0,3 x 20 mm) tērauda šķiedras. Tika novērots, ka neliels tērauda šķiedru daudzums būtiski neietekmē ģeopolimēra kompozīta plūstamību un konsistenci.

#### **2.1.2.2. Neorganiskās šķiedras**

Neorganiskās šķiedras sastāv no silīcija dioksīda un alumīnija oksīda maisījuma. Šīm šķiedrām ir augsts kušanas punkts, tāpēc tās ir piemērotas termiskai izmantošanai. Šīm šķiedrām ir zemas izmaksas, augsta stiepes izturība un ķīmiskā stabilitāte, kā arī labas izolācijas īpašības [60]. Visplašāk izmantotās neorganiskās šķiedras ir silīcija dioksīda šķiedras, aluminosilikāta, alumīnija oksīda, bazalta šķiedras.

#### **2.1.2.3. Oglekļa šķiedras**

Armatūras šķiedras, kas pazīstamas ar augstāko īpatnējo stiprību un vieglumu, ir oglekļa šķiedras. Oglekļa šķiedrām piemīt izcila stiepes stiprība un elastības modulis paaugstinātās temperatūrās, ķīmiskā un termiskā stabilitāte, zema termiskā izplešanās un augsta elektriskā un siltuma vadītspēja. Oglekļa šķiedras uzrāda arī labas elastīgās īpašības, ko neietekmē noguruma deformācijas, kad notiek sloģošanas-atsloģošanas cikli. Pēc šķiedru ģeometriskajām īpašībām tās var iedalīt divās grupās: (1) šķiedras, kas ir nepārtrauktas garumā; (2) oglekļa nanošķiedras [72], [73].

**II rakstā** tika noteiktas ar oglekļa šķiedru stiegrotu ģeopolimēra paraugu mehāniskās un ilglaicīgās īpašības [47]. Tika novērots, ka 1 % oglekļa šķiedru stiegrojuma ievietošana matricā nedaudz samazina ģeopolimēra kompozīta plūstamību un attiecīgi samazina konsistenci maisījumam, bet būtiska ietekme nav novērota.

#### 2.1.2.4. Polimēra šķiedras

Kā zināms, polimēri ir garas, multiplicējošas monomēru ķēdes. Tās turas kopā ar spēcīgām starpmolekulārajām saitēm [74]. Atkarībā no ķēžu sakārtojuma polimērus iedala kristāliskos (kristāliskums vairāk nekā 80 %), puskristāliskos (kristāliskums no 10 % līdz 80 %) un amorfos (kristāliskums ir mazāks par 10 %) [64], [75]. Ja polimēriem palielina kristāliskumu, tas var uzlabot arī mehāniskās īpašības, stingumu, stabilitāti pret ārējās vides ietekmi un virsmas raupjumu. Pēc izejmateriālu un ražošanas procesu specifiskas polimēru šķiedras var iedalīt sintētiskajās un dabiskajās.

Sintētiskās polimēru šķiedras var ražot no izejvielām vai pārstrādātiem plastmasas atkritumiem. Tiek apgalvots, ka šķiedru stiegrājums ir tas materiāls, kas paver noietu tādām pārstrādājamām plastmasām kā polietilēntereftalāts (*PET*) un polipropilēns (*PP*) un attiecīgi lietojumu būvniecībā [74]. Cementa materiālu stiegrošanai visplašāk izmantotās šķiedras ir *PP*, polivinilspirts (*PVA*), polietilēns (*PE*) un *PET* [76]. *PP* šķiedru galvenās priekšrocības ir zema cena, inertās īpašības cementa kompozīta vidē ar augstu pH līmeni, spēja kontrolēt plaisāšanu betonā, ko izraisa plastiskais rukums, un viegla dispersija [77]. Šo šķiedru trūkumi ir zema termiskā pretestība, zems elastības modulis un vāja sasaiste ar cementa matricām to raksturīgo hidrofobisko īpašību dēļ [59], [78]–[80]. *PET* ir līdzīgas mehāniskās īpašības kā *PP* un neilona šķiedrām. Atšķirībā no iepriekš minētajām šķiedrām *PET* šķiedru ražošana ir rentablāka un videi draudzīgāka. Nesenie sasniegumi *PET* pudeļu pārstrādes jomā ir daudzsoļi *PET* šķiedru lietojumam būvniecības nozarei [81]. *PVA* šķiedrām ir lielāka stiepes stiprība un elastības modulis nekā iepriekš minētajām šķiedrām. Šīm šķiedrām ir arī spēcīgāka ķīmiskā sasaiste ar cementa matricu, jo to molekulārajās ķēdēs ir hidroksilgrupas [82], [83].

**III, IV un VII rakstā** apskatīti ar *PP* un *PVA* šķiedrām pastiprināta ģeopolimēra kompozīta mehānisko un ilgtermiņa īpašību pētījumi [48], [49], [52].

#### 2.1.2.5. Dabiskās šķiedras

Par dabīgām šķiedrām uzskata džutu, kaņepes, kenafu, bagasu un sizalu. Šīs šķiedras ir plaši izplatītas, plaši pieejamas un tām ir zema cena. Turklāt tām ir zems blīvums, samazināta siltumvadītspēja un labas mehāniskās īpašības. Galvenie šo šķiedru trūkumi ir to zemā izturība, pie lielās šķiedru koncentrācijas šķiedras ievērojami samazina maisījuma iestrādājamību, padara materiālu neviendabīgu un šīs anizotropijas dēļ cementa kompozītam ir slikta saistīšanās un negatīva šķiedru mijiedarbība ar matricu [84]–[86].

## 2.2. Ģeopolimēra kompozītu īpašības

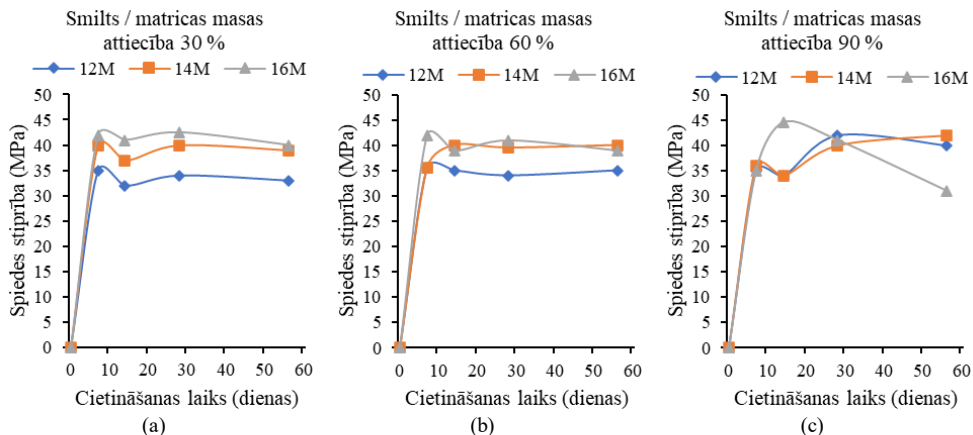
### 2.2.1. Mehāniskās īpašības

Viena no svarīgākajām un sākotnēji noteicošajām betona īpašībām ir spiedes stiprība. Būvmateriāliem ir ļoti svarīga augstāka sākotnējā spiedes stiprība. Tāpēc lieces stiprība, stiepes stiprība un elastības modulis ir cieši saistīti ar spiedes stiprību. Mehāniskās īpašības lielā mērā ietekmē izmantotā izejmateriāla īpašības. Ir konstatēts, ka *GPC* spiedes stiprību būtiski ietekmē

maisījuma sastāvs, elektrofiltru putekļu daļiņu forma un virsmas laukums [87]. *GP* kompozītu stiprību ietekmē daudzi faktori. Galvenie faktori ir kalcija saturs, sārmu šķīduma (NaOH, KOH) molaritāte, saistvielas / pildvielas attiecība, aktivizācijas šķīduma / saistvielas attiecība, silikātu / hidroksīdu attiecība. Turklāt stiprības attīstību vienlīdz ietekmē arī izejmateriāla īpašības, cietināšanas (polimerizācijas) apstākļi un pildvielas daļiņu izmēru sadalījums [88]. Ir ziņots, ka termiski polimerizēts elektrofiltru putekļu *GP* kompozīts sasniedz pilnu spiedes stiprību vienas dienas laikā. Citi ziņo, ka gandrīz 90 % spiedes stiprības var sasniegt pāris stundu laikā, ja *GP* polimerizēts temperatūra ir aptuveni 80 °C līdz 90 °C. **II rakstā** noteikta ģeopolimēru kompozīta elastības moduļa attīstība visā testēšanas laikā. Paraugi tika polimerizēti 24 stundas 75 °C temperatūrā. Sārma šķīduma koncentrācija bija 12 mol. Tika konstatēts, ka, testējot paraugus 28 dienu vecumā, elastības modulis no 28. dienas līdz 62. dienai vidēji palielinājās par 0,8 % katru dienu un no 62. līdz 150. dienai samazinājās līdz 0,4 % dienā. Turklāt spiedes stiprība palielinājās par 7 % un 27 % (attiecīgi nestiegrotiem un ar oglekļa šķiedrām stiegrotiem paraugiem) no testu sākuma līdz beigām. Tika konstatēts arī fakts, ka, ja ģeopolimēra paraugs tiek piesūcināts ar ūdeni 24 stundas, tā spiedes stiprība ievērojami samazinās. Nestiegrotiem paraugiem spiedes stiprība samazinājās par 2,2 %, ar oglekļa šķiedrām stiegrotajiem paraugiem – par 14,3–35,1 % [47]. *GPC*, kas polimerizēti apkārtējās vides temperatūrā, stiprības attīstība ir ļoti tuva *OPC* stiprības attīstībai. Tomēr visi polimerizācijas apstākļi rezultēsies ar tā paredzēto stiprību, un papildu karsēšana pret apkārtējās vides temperatūru tikai paātrina stiprības attīstību un galīgās spiedes stiprības sasniegšanu konkrētam *GPC* maisījumam.

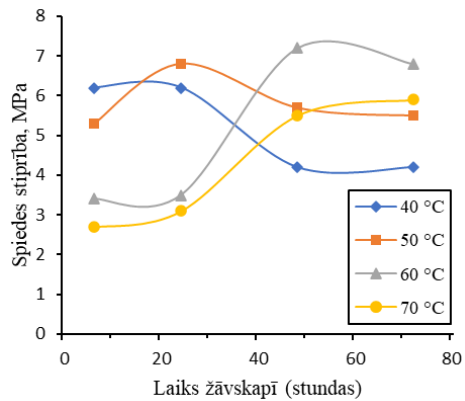
Daži pētnieki ir atklājuši, ka, izmantojot 8- 12 M NaOH aktivizācijas šķīdumus un vienu dienu polimerizējot paraugus 85 °C temperatūrā, tiek iegūti paraugi, kuru spiedes stiprība ir no 35 MPa līdz 40 MPa. Spiedes stiprību var ievērojami palielināt, ja NaOH pievieno nātrija silikātu ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,23$ ). Šādā veidā spiedes stiprība sasniedz 90 MPa [89]. **IV un V rakstā** cilindriskiem paraugiem, kas izgatavoti, izmantojot 10 M NaOH šķīdumu, un sacietējuši 24 stundas 75 °C temperatūrā, spiedes stiprības vērtības bija no 30,37 MPa līdz 36,33 MPa vienkāršiem paraugiem un 44,52 MPa ar pārstrādātu riepu kordiem stiegrotiem paraugiem [49], [50]. Ar tādu pašu NaOH aktivizācijas šķīdumu un polimerizēšanas apstākļiem **III rakstā** spiedes stiprība 28 dienu vecumā ir attiecīgi 52,5 MPa, 55,1 MPa, 33,9 MPa un 48,4 MPa nestiegrotam ģeopolimēra kompozītam, ģeopolimēra kompozītam ar 1 % un 5 % PP šķiedras stiegrojumu un 1 % tērauda šķiedras stiegrojumu [48]. Nestiegrotiem un ar 1 % oglekļa šķiedrām stiegrotiem paraugiem, kas izgatavoti ar 12 M NaOH aktivizācijas šķīdumu, 28 dienu vecumā tika konstatēta spiedes stiprība 48,16 MPa un 45,48 MPa (**II raksts**). Šo paraugu polimerizācija tika veikta 24 stundas 75 °C temperatūrā [47]. **I rakstā** minētajiem kubiskajiem ģeopolimēru kompozītu paraugiem ir 113,97 MPa, 81,07 MPa un 85,2 MPa spiedes stiprības vērtības, kas ir atbilstoša ar 3,5 %, 2 % tērauda kordiem stiegrotiem un nestiegrotiem ģeopolimēru kompozītiem. Šie paraugi tika izgatavoti, izmantojot 10 M NaOH šķīdumu, tos polimerizējot 24 stundas 75 °C temperatūrā [46].

Arī ūdens/saistvielas attiecībai ir būtiska nozīme *GPC* spiedes stiprībā. Ir aprēķināts, ka optimālai  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  attiecībai jābūt 15,9, lai iegūtu maksimālo spiedes stiprību elektrofiltru putekļu saturošam *GP* kompozītam [90]. Citi ir konstatējuši, ka spiedes stiprību ietekmē aktivācijas šķīduma molaritāte. Viņi novēroja spiedes stiprības palielināšanos pēc 7, 14, 28 un 56 dienām, izmantojot 12–14 M aktivācijas šķīdumus. Spiedes stiprības samazināšanās tika novērota, izmantojot aktivācijas šķīdumus ar 14 M un lielāku molaritāti. Spiedes stiprības attiecības redzamas 4. attēlā [91].



4. att. Ģeopolimēra javu spiedes stiprība atkarībā no cietināšanas ilguma, NaOH koncentrācijas un pildvielas/saistvielas attiecības [91].

*GP* kompozītmateriālu izpētes pirmsākumos tika pētīti no kaolinīta, elektrofiltru putekļiem, NaOH, ūdens un nātrija silikāta maisījuma veidoti *GP* kompozīti. Tika konstatēts, ka spiedes stiprību ietekmē ne tikai polimerizācijas laiks, bet arī polimerizācijas temperatūra. Tika novērots, ka vislielāko stiprību iegūst paraugi, kas polimerizēti 60 °C temperatūrā 48 stundas, kā redzams 5. attēlā [92].



5. att. Dažādās temperatūrās cietināta elektrofiltru putekļu saturoša ģeopolimēra kompozīta spiedes stiprības attiecība [92].

4. tabulā ir apkopota mainīgo daļu būtiskā ietekme uz pastas, javas un betona spiedes stiprību.

Ģeopolimēra kompozītu spiedes stiprības atkarība no mainīgajiem faktoriem [42]

Kategorija	Izejmateriāls	Molaritāte	$t$ (°C)	Cietināšanas ilgums (h)	Spiedes stiprība (MPa)
<b>Pasta</b>	<i>FA</i>	12	70	24	65,0
	Uz mitrināta slāņa <i>FA-MK</i>	10	40	24	72,0
	<i>FA</i> un <i>SD</i>	10	40	24	67,0
	<i>RHA</i> un <i>WTS</i>	10	60	24	24,0
	<i>FA</i> un kokšķiedras	8	75	24	31,4
	<i>FA-MK</i> -sepolīta	10	20	24	52,0
	<i>FA</i> un <i>POFA</i>	14	65	48	72,7
	Nano $TiO_2$ uz mitrināta slāņa <i>FA-MK</i>	10	40	72	77,0
<b>Java</b>	<i>FA</i> un <i>IOT</i>	10	7 termiskie cikli 200 °	N/A	36,0
	<i>MK</i> ar <i>CG</i>	N/A	22	24	97,0
	<i>GGBFS</i> , <i>MK</i> un <i>RHA</i>	14	65	24	47,9
	<i>FA</i>	16	65	24	56,0
<b>Betons</b>	<i>FA</i>	14	75	22	80,0
	<i>FA</i>	12	75	24	62,3
	<i>FA</i>	15	80	24	48,7
	<i>FA</i>	16	60	24	53,6
	<i>FA</i>	14	25	24	34,3
	<i>BA</i>	14	25	24	0,6
	<i>FA</i> un <i>BA</i>	14	25	24	8,4
	<i>FA</i>	14	46	24	42,5
	<i>FA</i>	14	46	24	40,6
	<i>FA</i> un <i>LWA</i>	12	70	24	17,0
	<i>FA</i> un <i>KL</i>	14	100	72	54,0
	<i>FA</i> un <i>SF</i>	14	100	72	51,2
	<i>FA</i> un nano-silika	12	25	24	46,4
	<i>FA</i> un nano-silika	8	80	24	47,0
	<i>FA</i> un <i>LS</i>	8	60	24	32,0
	<i>FA</i> un <i>GGBFS</i>	12	75	18	53,2
	<i>FA</i> ar <i>SSD</i>	8	60	24	62,0
	<i>FA</i> , <i>POFA</i> un <i>OPS</i>	14	65	48	30,1
	<i>PCFA</i> , <i>GGBFS</i> un <i>LWA</i>	3	20	24	9,0
	<i>POFA</i> , <i>MK</i> , <i>OPS</i> un tērauda šķiedras	14	65	48	31,9
	<i>POFA</i> , <i>GGBFS</i> , un <i>MK</i>	14	65	24	41,5



Attiecībā uz ģeopolimēru kompozītmateriālu stiepes stiprību **V** un **VI rakstā** analizētie nestiegotie un ar 1 % PVA šķiedru stiegotie paraugi sasniedza 5,13 MPa un 4,95 MPa stiepes stiprību. Šie paraugi izgatavoti, izmantojot 10 M NaOH aktivizācijas šķīdumu un polimerizējot 75 °C temperatūrā 24 stundas [49], [51].

Līdzīgi kā 7. rakstā [52], elektrofiltru putekļu ģeopolimēru lieces stiprība bez un ar dažādām šķiedrām parāda līdzīgas īpašības. Nestiegotie un ar polimēru šķiedrām stiegotie paraugi uzrāda vislabāko lieces izturību atšķirībā no paraugiem, kas stiegoti ar nelielu daudzumu tērauda šķiedru vai ar tērauda un PVA šķiedru kombināciju. Nestiegotu GP lieces stiprība ir 8,07 MPa, tam seko ar 1 % PVA šķiedrām, 0,5 % PVA / 0,5 % tērauda šķiedrām un 1 % tērauda šķiedrām stiegoti paraugi ar attiecīgi 7,32 MPa, 6,93 MPa un 6,20 MPa lieces stiprību. Iepriekš minētajām GP kompozītiem ar labāko sākotnējo lieces stiprību ir arī vislielākā lieces stiprības samazināšanās ilglaicīgo īpašību testa laikā. Nestiegotajam un ar 1 % PVA šķiedru stiegotajam sastāvam lieces stiprība samazinās par 13 % un 15,15 % pēc ilglaicīgo īpašību testa. Pārējiem kompozītiem lieces stiprības samazinājums ir mazāks par 1 %. Turklāt vislielākās mērījumu kļūdas ir nestiegotajiem un ar 1 % PVA šķiedru stiegotajiem GP. Kļūdas svārstās no  $\pm 0,49$  MPa līdz  $\pm 0,86$  MPa nestiegotajiem GP un no  $\pm 0,50$  MPa līdz  $\pm 0,70$  MPa ar 1 % PVA šķiedru stiegotajiem GP.

### 2.2.2. Ģeopolimēra kompozītu izturība

Jebkuram konstrukcijas elementam ir būtiska izturība pret atmosfēras iedarbību, noārdīšanos, nodilumu un ķīmisko vielu izturība. Absorbcijas spēja, porozitāte, ūdens un hlorīdu absorbcija, sulfātu un/vai citu skābju ietekme ir svarīgi parametri, kas parāda GPC stabilitāti un piemērotību izmantošanai konstrukcijās. GP kompozītmateriāli parasti uzrāda lielāku izturību pret agresīvas vides iedarbību nekā OPC.

Vislielākās problēmas ar izturību ir saistītas ar materiāla ūdens uzsūci. Liela ūdens absorbcija ievērojami samazina GP kompozītu spiedes stiprību [93]. Salīdzinoši mazāku ietekmi uz izturību atstāj skābju ietekme, šķīduma uzsūkšanās, stiprības degradācija un masas zudums, hlorīdu iekļūšana, pārtrauktas poras un tukšumi, kā arī samitrināšanas un žāvēšanas cikli. GP kompozīti tiek uzskatīti par skābes izturīgiem. Tomēr skābes var būtiski ietekmēt GP kompozītus, to izturību un sastāva stabilitāti. GP izturība pret skābēm galvenokārt ir atkarīga no skābju īpašībām un GPC parauga fizikālā stāvokļa un ķīmiskā sastāva [94]. Absorbcijas koeficienti ir ļoti svarīgi, jo, ja tie ir augstāki, tad GPC maisījumā ir augstāks kapilārā ūdens līmenis [95]. Stiprības zudumi galvenokārt rastos no GP ķīmiskā sastāva nepilnības un samazinātā blīvuma, un tā rezultātā samazinās parauga stiepes stiprība, lieces stiprība un spiedes stiprība [96]. Ievērojams parauga svāra zudums izraisa izturības zudumu. Tas galvenokārt notiek, kamēr paraugi ir iegremdēti šķīdumos, kuros ir nātrijs un magnija sulfāti, sērskābe, NaCl. Sākumā šķiet, ka parauga svārs palielinās, ķīmiskajām vielām iesūcoties paraugā. Pēc tam tiek novērots, ka šķīdumu uzsūkšanās ir izraisījusi arī parauga izplešanos, kas tālāk izraisa ievērojamu daudzumu mikroplaisu, kas vēl vairāk samazina izturību [97]. Hlorīdu iekļūšana paraugā radītu tāds pašus rezultātus kā masas zudums. Paraugi tiek pakļauts hlorīda šķīduma iedarbībai, tāpēc tas iekļūst paraugā un izplešas tajā, radot gan mikroplaisas, gan makroplaisas, kas vēl vairāk samazina parauga izturību [98].

Pārtrauktas poras palielina *GPC* iestrādājamību sarežģītos vides apstākļos [99]. Karsēšana un atdzesēšana, kā arī mitruma ciklu iedarbība ietekmē parauga mikrostruktūru un papildus ietekmē mehāniskās īpašības. Jo lielāks ir masas zudums šo ciklu laikā, jo vairāk samazinās šī parauga izturība [100].

Rukuma radītajām plaisām vairumā gadījumu ir mazāka ietekme uz izturību nekā iepriekš minētajās situācijās. Tās var rasties polimerizācijas procesā, kā arī mitruma ciklu laikā. Lielākajā daļā gadījumu rukums neradīs lielu daudzumu plaisu, bet, ja ir liels daudzums rukuma plaisu, tas var būtiski ietekmēt parauga izturību un samazināt mehāniskās īpašības [101].

### **2.2.3. Ģeopolimēra kompozītu termiskā izturība**

Atšķirībā no *OPC*, kas, karsējot 800–1000 °C temperatūrā, zaudē 20–30 % stiprības, *GPC* paaugstinātā temperatūrā uzrāda atšķirīgas termiskās īpašības. Ģeopolimēru kompozītiem augstā temperatūrā piemīt labas ugunsizturība, jo mikrostruktūrā ir nanoporas. *GP* kompozītu kušanas temperatūra ir aptuveni 1200 °C, šajā temperatūrā nav novērojama nodrupumi [102]. Mikroporas ļauj iztvaikot un migrēt ūdens tvaikiem *GP* struktūrā, nenodarot kaitējumu alumīnosilikātu tīklam. Paaugstinātu temperatūru iedarbībā uz paraugiem notiek dažādi procesi, piemēram, iztvaiko N-A-S-H gēla absorbētais ūdens, veidojas bezūdens produkti, kūst un kristalizējas stabilas bezūdens fāzes, kas izraisa turpmāku *GP* matricas destrukciju. Ir novērots, ka, pakļaujot *GP* pastu, kas satur elektrofiltru putekļus, 800 °C temperatūrai, stiprība palielinās par 6 %, savukārt metakaolīnu saturošajai *GP* pastai stiprība samazinās par 34 % [103].

### **2.2.4. Ģeopolimēra kompozītu ilglaicīgās īpašības**

Laika gaitā šļūde un rukums var izraisīt ievērojamu deformācijas palielināšanos. Tāpēc, lai materiālu varētu izmantot ilgtermiņā, ir ļoti svarīgi izpētīt šīs īpašības. Bieži vien šļūdi un rukumu uzskata par neatkarīgām parādībām, bet ir daži pētījumi, kuros apgalvots, ka šīm parādībām ir spēcīgas poromehāniskas (pētījumi par porainiem materiāliem, ko caurvij savstarpēji savienots poru tīkls) sakarības [104]–[106].

Tomēr joprojām trūkst informācijas un pētījumu par ģeopolimēru kompozītmateriālu šļūdi un rukumu dažādos spriegumstāvokļos, īpaši stiepē un trīs punktu liecē.

Darba izstrādes gaitā tika izstrādāta un pārbaudīta metodika betona un cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai dažādos spriegumstāvokļos (**I patents**), lai ne tikai mērītu šļūdes deformācijas, bet arī reģistrētu rukuma deformācijas un elastības moduļa izmaiņas [107]. Tajā arī reglamentēts, kā veikt ilglaicīgos testus spiedē, stiepē un trīs punktu liecē. Izstrādātā metode reglamentē paraugu sagatavošanu, sloģošanas un atsloģošanas procedūras, kā arī ilgumu un vides prasības ilglaicīgo īpašību laboratoriskai testēšanai.

#### **2.2.4.1. Šļūdes īpašības**

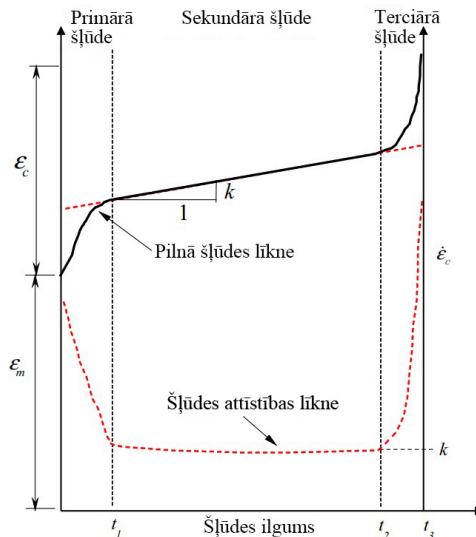
Šļūde ir parādība, kad deformācija laika gaitā palielinās, bet pieliktais spriegums paliek nemainīgs [108]. Šļūde ir ļoti svarīgs faktors jebkuram cementu saturošam kompozītmateriālam. Šļūde ietekmē spriegumu sadalījumu un deformācijas visā parauga vai konstrukcijas elementu šķērsgriezumā. Pētījumā par betona tiltiem 2011. gadā [109] parādīts, cik svarīgi ir ticami novērtēt betona pamata šļūdes atbilstības funkciju, lai precīzi prognozētu tilta ilgtermiņa deformācijas

20 gadu periodā. Betona šļūdes raksturojums ir svarīgs arī, prognozējot iepriekš saspiesto trošu atslābumu kodolreaktoros [110].

Ir pieņemts, ka cietējumam betonam šļūde izpaužas divās savstarpēji saistītās šļūdes deformācijās:

- (1) pamata šļūde, kas notiek, kamēr paraugam ir nemainīgs mitrums (šis process ir neatgriezenisks);
- (2) žūšanas šļūde (saukta arī par Piketa efektu vai sprieguma izraisītu saraušanos) notiek žāvēšanas dēļ un ir daļēji atgriezeniska [111].

Turklāt žūšanas šļūde ir saistīta ar mikroplaisu efektu, ko izraisa rukuma deformācijas gradients starp parauga ārējo un iekšējo slāni pēc žūšanas [112]. Pamata šļūdi var iedalīt īstermiņa un ilgtermiņa šļūdē, ņemot vērā tās atšķirīgo kinētiku [112]–[114]. Ir ziņots, ka galvenie faktori, kas ietekmē šļūdi OPC bāzes materiāliem, ir maisījuma proporcijas, saistīšanās vecums, apkārtējās vides temperatūra un mitrums, kā arī pieliktā sprieguma līmenis [115]. Paredzams, ka ģeopolimēru kompozītmateriālu gadījumā tie paši faktori ietekmē šļūdes attīstību. Šļūdes līkni parasti iedala pārejošās elastīgās deformācijas stadijā (momentānā šļūde), primārās šļūdes stadijā (pieauguša šļūde), vienmērīgās šļūdes stadijā (sekundārā šļūde jeb izokinētiskā šļūde) un paātrinātās šļūdes stadijā (terciārā šļūde jeb sabrukšanas šļūde). Tās ir atkarīgas no šļūdes ātruma un šļūdēšanas laika sakarībām (6. att.) [116]. Ģeopolimēru polimerizācijas procesa īpatnību dēļ faktori, kas ietekmē OPC kompozītu šļūdi, atšķirīgi ietekmē ģeopolimēru kompozītus.



6. att. Šļūdes deformāciju raksturlīkne [116].

Tā kā ģeopolimēru saistviela ir samērā nesen izstrādāts materiāls, pēdējos gados ir palielinājusies interese par ģeopolimēru šļūdes īpašībām. Ir pierādīts, ka elektrofiltru putekļu

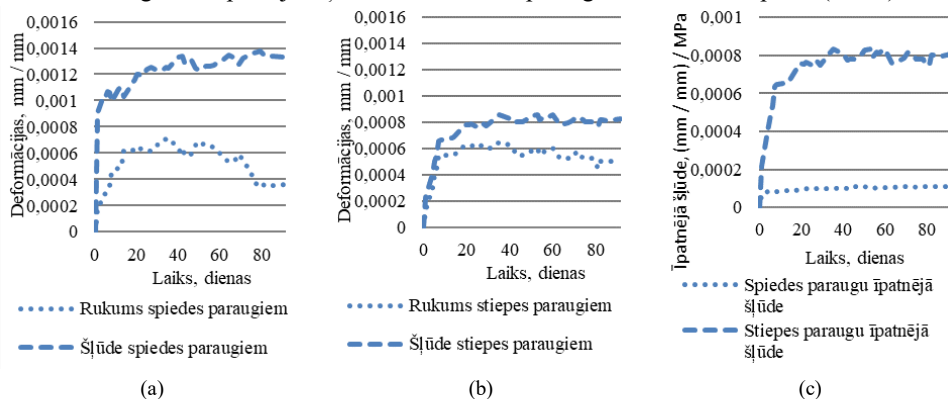
ģeopolimēra betonam 12 nedēļu testēšanas laikā ir zemas šļūdes vērtības [19]. Turklāt ir konstatēts, ka elektrofiltru putekļu ģeopolimēram ir zemāka īpatnējās šļūdes deformācija (šļūdes deformācija pret pielikto spriegumu) [20] un šļūdes koeficients (attiecība starp šļūdes deformāciju un elastīgo deformāciju) [20], [21] nekā *OPC* betonam. Tas atbilst **II–VII rakstos** apskatīto pētījumu [47]–[52] iegūtajiem rezultātiem. Tur tika novērots, ka nestiegroto paraugu šļūdes īpašības ir zemas, un **II rakstā** [47] parādīts, ka tās ir zemākas par *OPC* par aptuveni 13 % līdz 23 %. Turklāt **II un III rakstā** [47], [48] secināts, ka nepietiekams šķiedru iestrādes daudzums ģeopolimēru kompozītā radītu lielākas šļūdes deformācijas. Tomēr, ja stiegrojums ir pietiekamā daudzumā un tam ir konkrētajam ekspluatācijas stāvoklim nepieciešamās īpašības, tad šļūde ir ierobežota. **IV rakstā** [49] aplūkotajos pētījumos pārstrādātu riepu kordu šķiedru stiegrojums samazināja šļūdes deformācijas par 30 %. Tika apgalvots [22], ka šīs zemās šļūdes deformācijas ir saistītas ar nereaģējušo elektrofiltru putekļu mikroagregāciju saistvielā.

Lielākajā daļā pētījumu, kuros pētītas ģeopolimēru kompozītu šļūdes īpašības, ir noteikta šļūdes deformācija spiedē [23]–[25], [101]. Kopumā elektrofiltru putekļu *GP* kompozītam ir zemāka šļūde nekā betonam uz portlandcements bāzes. Tiek apgalvots, ka *GP* betonam, kas polimerizēts 60 °C temperatūrā 24 stundas, ir līdz pat 50 % mazāka šļūde spiedē nekā betonam uz *OPC* bāzes [22]. Līdzīgas deformāciju īpašības novērotas arī paraugiem, kas polimerizēti sešas stundas 60 °C temperatūrā [101]. Citi pētnieki ir veikuši šļūdes mērījumus dažādos testu ilgumos no 40 °C līdz 80 °C temperatūrā polimerizētiem *GP* kompozītmateriāliem. Viņi novēroja, ka *GP*, kas polimerizēti 40 °C temperatūrā trīs dienas, ir nenozīmīgas vai tādas pašas šļūdes īpašības kā paraugiem uz *OPC* bāzes, savukārt *GP* paraugiem, kas polimerizēti septiņas dienas 80 °C temperatūrā, deformācijas šļūdē spiedē ir ievērojami samazinājušās un kļuvušas niecīgas [20]. **II rakstā** aprakstīts novērojums, ka ģeopolimēru kompozītam, kas 24 stundas polimerizēts 75 °C temperatūrā, šļūdes deformāciju samazinājums ir līdz 23 % [47].

Šļūde stiepē ir citāda nekā šļūde spiedē. Šļūdes deformācijām stiepē ir izšķiroša nozīme, novērtējot agrīnas vecuma plaisāšanas risku [117]. Šļūdes deformācijas stiepē laika gaitā uzrāda lineārāku uzvedību nekā šļūdes deformācijas spiedē. Šļūdes deformācijas attīstības ātrums spiedē laika gaitā samazinās. Daži pētnieki apgalvo, ka šļūdes koeficientus, kas izmērīti pie spiedes spriegumiem, var reizināt ar koeficientu no 1 līdz 3, lai iegūtu šļūdes koeficientu stiepes spriegumos [118]. Šļūdes darbības mehānismi stiepē atšķiras no mehānismiem, kas darbojas spiedē. Šļūdes deformāciju ātrums stiepē nesamazinās ar tādu pašu ātrumu kā šļūdes deformācijas ātrums spiedē [119]. Šļūdes stiepes deformācijas noteikšanu betonam agrīnā vecumā var veikt, izmantojot tiešās stiepes eksperimentu vai netiešās stiepes testu [120], [121]. Gredzenveida tests ir vienkāršota netiešās stiepes metode, kas ir diezgan populāra, lai noteiktu šļūdi stiepē un rukuma plaisu risku [122].

Daži pētnieki [123] apgalvo, ka agrīnā vecumā cementa kompozītmateriālu šļūde spiedē ir lielāka nekā šļūde stiepē, savukārt citi [124] apgalvo pretējo. **V rakstā** [50] noteikts, ka nestiegotam ģeopolimēra kompozītam šļūdes deformācijas spiedē ir aptuveni par 35,8 % lielākas nekā stiepē. Turklāt šļūdes deformācijas spiedē attīstās un palielinās visā testēšanas laikā, savukārt

šļūdes deformācijas stiepē neuzrāda būtisku pieaugumu visā testa laikā. Attiecībā uz īpatnējām šļūdes vērtībām šeit ievērojami augstākas vērtības uzrāda paraugi, kas testēti stiepē. Tiem ir vidēji par 85,92 % augstākas īpatnējās šļūdes vērtības nekā paraugiem, kas testēti spiedē (7. att.).



7. att. Šļūdes un rukuma deformācijas spiedē (a), stiepē (b) un īpatnējā šļūde (c) nestiegotriem ģeopolimēra kompozītu paraugiem [50].

**VI rakstā** [51] aplūkotajos pētījumos konstatēts, ka ar 1 % *PVA* šķiedru stiegotrs ģeopolimēru kompozīts uzrāda līdzīgas šļūdes deformācijas kā nestiegotrs *GP*. Arī stiepes stiprība ir līdzīga. Jāatzīmē arī tas, ka ar 1 % *PVA* šķiedrām stiegotriem *GP* paraugiem ir lielākas šļūdes deformācijas sākuma posmā, bet pēc 40 dienu testēšanas šļūdes deformācijas ir vienādas ar nestiegotru un 1 % *PVA* šķiedrām stiegotru paraugu šļūdes deformācijām.

Tāpat kā *OPC* betonam, arī *GP* betonam ir zema stiepes stiprība. Autori apgalvo, ka stiegotām *GP* konstrukcijām plaisas eksploataācijas laikā ir neizbēgamas [119]. Konstrukciju kalpošanas sākuma posmā viens no faktoriem, kas izraisa plaisāšanu agrīnā vecumā, ir ierobežots rukums. Ierobežotā rukuma attīstība pirmajās dienās var radīt stiepes spriegumu attīstību betonā [125]. Betona elementā, kas ir stiegotrs, rukums palielina stiepes spriegumus, savukārt šļūde stiepē relaksē stiepes spriegumus. Visos iepriekš minētajos pētījumos galvenā uzmanība pievērsta eksperimentālo datu kvantitatīvai analīzei, taču informācija par šļūdi un rukumu *GP* ir ierobežota.

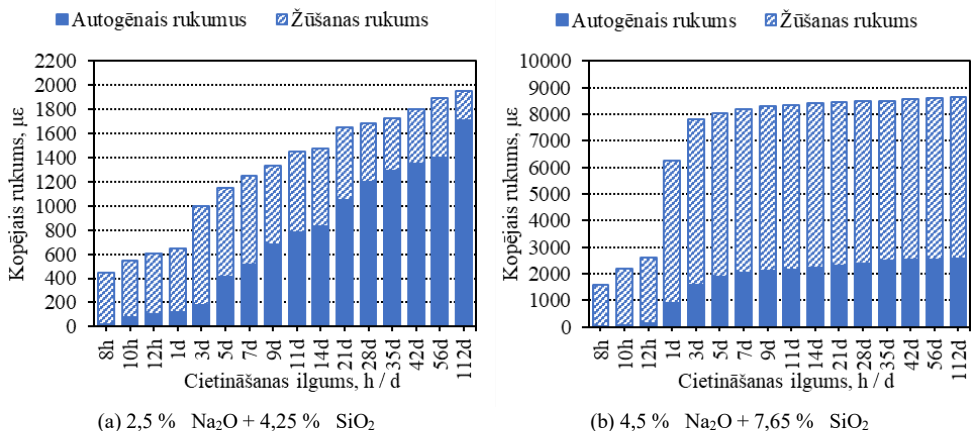
Ģeopolimēru kompozītu ilglaicīgās īpašības nav plaši pētītas. Daži pētījumi [126], [127], kuros aplūkotas liecē testētu paraugu ilglaicīgās īpašības, liecina, ka ģeopolimēru kompozītiem ir cieša korelācija ar portlandcements bāzes kompozītu ilglaicīgajām īpašībām. **VII rakstā** [52] parādīta līdzība ar [126] iegūtajām lieces ilglaicīgajām deformācijām. Attiecībā uz kvantitatīvo salīdzinājumu nav iespējams salīdzināt **VII rakstā** parādītos rezultātus ar citiem, piemēram, [126] publicētajiem rezultātiem, jo šļūdes deformāciju grafikos ir attēloti absolūto deformāciju mērījumi, nevis relatīvās (mērījumi nav atkarīgi no izmērītā parauga izmēra un pieliktās slodzes ietekmes) deformācijas. Apskatot **VII rakstā** [52] analizētos pētījumu rezultātus kļūst skaidrs, ka tērauda šķiedras ir izdevīgākas nekā *PVA* šķiedras vai kombinēta *PVA* un tērauda šķiedru stiegtroja izmantošana. Turklāt, lai gan ar 1 % tērauda šķiedru stiegotro ģeopolimēru kompozītmateriālu

šļūdes īpašības un īpatnējā šļūde spiedē un stiepē uzrāda vislielākās un tādējādi sliktākos rezultātos, tomēr liecē tie uzrāda viszemāko ilglaicīgo deformāciju apjomu, kas ir par 39 % mazāks nekā nākamais *GP* sastāvs.

**I patentā** aprakstītas testa iekārtas un procedūras, kas nepieciešamas, lai veiktu deformācijas testus spiedē un stiepē.

#### 2.2.4.2. Rukuma īpašības

Betona materiālos rukums parasti rodas pastas (matricas) sarukšanas rezultātā. Tas ir saistīts ar pildvielu lielo ģeometrisku stabilitāti [128], [129]. Materiālu rukšanu var iedalīt grupās, pamatojoties uz mehānismiem, kas ietekmē rukuma attīstību. Tie ir plastiskā rukšana, karbonizācijas rukšana, autogēnā jeb ķīmiskā rukšana un žūšanas rukšana. Plastiskais rukums notiek uzreiz, kad maisījumu ielej veidnē. Karbonizācijas rukšana notiek,  $\text{CO}_2$  no apkārtējās vides iekļūstot parauga ārējā virsmā un reaģējot ar hidratācijas produktu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Tālāk veidojas  $\text{CaCO}_3$  un ūdens molekulas. Autogēno rukumu izraisa kompozītu saistīšanās un ķīmisko savienojumu savstarpējā izveide. Tas ir neizbēgams process, kas samazina elementa tilpumu, un tas ir ļoti iespējams kompozītiem ar zemu ūdens/cementa attiecību [130]. Žūšanas rukums ir parauga tilpuma samazināšanās, ko izraisa ūdens iztvaikošana no gēla poru virsmas. Lielākoties tas notiek paraugu sacietēšanas procesā [131]. Ģeopolimēru kompozītmateriāliem un sārnu aktivētiem kompozītmateriāliem kopumā galvenās rukuma deformācijas rodas autogēnā un žūšanas rukuma dēļ. Ģeopolimēriem autogēnais rukums nozīmē iekšējā ūdens zudumu polimerizācijas laikā, kas tālāk rada kapilāros spriegumus. Žūšanas rukums notiek ūdens iztvaikošanas dēļ, un tas ir proporcionāls mitruma zudumam no kompozīta [128], [132]–[134]. Atšķirībā no autogēnā rukuma žūšanas rukumu vairāk ietekmē sārnu koncentrācija un ārējās vides ietekme. Avotā [26] veiktie testi parādīja, ka, palielinoties sārnu ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) koncentrācijai, ģeopolimēru saistvielas žūšanas rukums palielinās. Tajā pašā laikā autogēnais rukums saglabājās relatīvi nemainīgs (8. att.).



8. att. Autogēnais un žūšanas rukums ģeopolimēru kompozītiem, kas aktivizēti ar dažādas koncentrācijas aktivizācijas šķīdumiem [26].

Citi pētnieki apgalvo, ka ir grūti precīzi noteikt autogēnā un žūšanas rukuma līmeni kompozītmateriāliem galvenokārt tāpēc, ka, ja paraugs nav noslēgts, autogēnā un žūšanas rukšana notiek vienlaikus. Tāpēc izmērītā žūšanas rukuma vērtība bieži vien ir arī daļa no autogēnā rukuma. Rukums, jo īpaši sārmu aktivētiem kompozītiem, ir cieši saistīts ar polimerizācijas procesu un izmantoto izejvielu īpašībām, kas būtiski ietekmē mitruma zudumus un poru struktūras attīstību kompozītmateriālos [27], [128], [135].

**II–VI rakstā** [47]–[51] apskatītas izmērītās žūšanas rukuma deformācijas. Konstatēts, ka šķiedru stiegrojumam ir būtiska nozīme rukuma samazināšanā paraugiem, kas testēti spiedē un stiepē. Piemēram, **IV rakstā** paraugiem, kas bija stiegroti ar pārstrādātu riepu tērauda kordiem, ir vidēji par 50 % mazāks rukums nekā nestiegrotiem ģeopolimēru kompozītiem [49]. Turklāt **VI rakstā** ar 1 % PVA šķiedru stiegrotiem paraugiem, kas testēti stiepē, konstatēts vidēji par 54,21 % mazāks rukums nekā nestiegrotiem paraugiem [51]. Arī **V rakstā** tika noteiktas rukuma deformācijas spiedē un stiepē [50]. Tur rukuma deformācijas starp spiedes un stiepes paraugiem vidēji ir par 15,8 % mazākas stiepē testētajiem paraugiem.

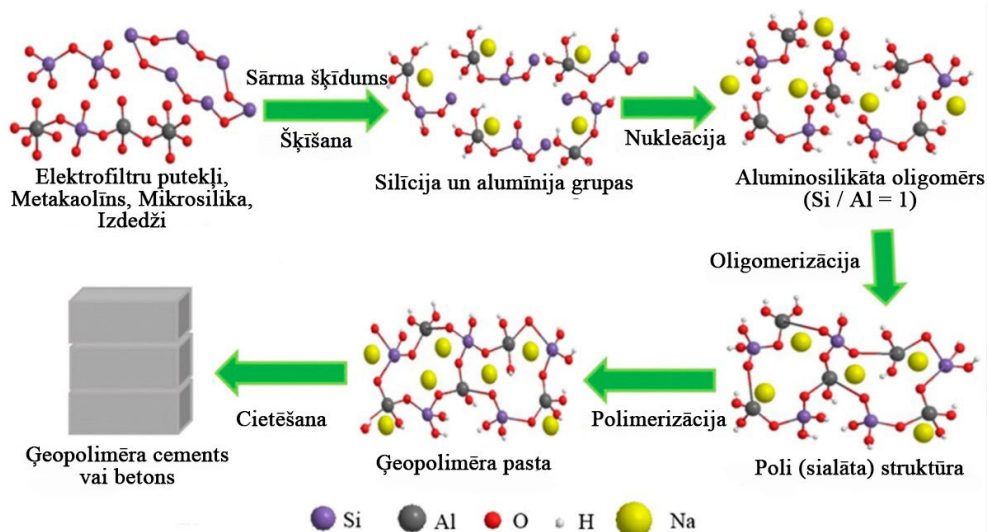
Mehānismus, kas ietekmē rukumu, var iedalīt četrās grupās: kapilārais spriegums; starpslāņa ūdens zudums; sadalīšanās spiediens; virsmas enerģija [133]. Tāpat kā cementa bāzes materiāliem, šie rukuma mehānismi ietekmē arī sārmu aktivizētus cementa bāzes kompozītmateriālus. Lai gan mehānismi ir vienādi, rukuma vērtības kompozītiem uz *OPC* bāzes un ģeopolimēru kompozītiem atšķiras galvenokārt polimerizācijas reakcijas mehānismu atšķirību dēļ [136]. Kopumā sārmu aktivētā cementa kompozītiem, īpaši kompozītiem uz izdedžu bāzes, ir lielākas rukuma deformācijas nekā kompozītiem uz *OPC* bāzes. Šīs ģeopolimēru rukuma paaugstinātās vērtības galvenokārt ir saistītas ar atšķirībām poru izmēru sadalījumā un reakcijas produktiem pastas maisījumā. Šie iepriekš minēto pētījumu rezultāti balstīti eksperimentālo datu kvantitatīvajā analīzē.

**I patentā** aprakstītas testa iekārtas un procedūras, kas nepieciešamas žūšanas rukuma testēšanai spiedē, stiepē un liecē.

### 3. ĢEOPOLIMĒRA MIKROSTRUKTŪRA

#### 3.1. Sārma aktivizācijas reakcijas raksturs un īpašības

Pētījumos ir noteikts, ka sārnu aktivizācijas reakciju elektrofiltru putekļus saturošā *GP* ietekmē dažādi faktori, piemēram, elektrofiltru putekļu daļiņu smalkums, polimerizācijas apstākļi un sārnu aktivizācijas šķīduma koncentrācija [137]–[141]. Alumīnija un silīcija (Al un Si) izšķīšanas process notiek, kad elektrofiltru putekļi tiek sajaukti ar sārnu šķīdumu. Lielākās molekulas kondensējas želejā (polimerizācija un nukleācija), un, turpinoties sārnu iedarbībai uz elektrofiltru putekļiem, lielākas daļiņu lodītes atveras, lai atklātu iekšpusē mazākas lodītes. Tad mazākās lodītes gandrīz pilnībā izšķīst, veidojoties reakcijas produktiem lielo sfēru iekšpusē un ārpusē.  $\text{AlO}_4$  un  $\text{SiO}_4$  veidojas, elektrofiltru putekļiem ar silīciju un alumīniju to saturā savienojoties ar skābekļa atomiem; veidojas trīs veidu monomēri, kas veido gēlu ar vienkāršu struktūru. Pēc tam gēls pārstrukturējas, polimerizējas un sacietē, veidojot ķermeni ar nesakārtotu struktūru un augstu mehānisko stiprību, kas rezultātā ir sārnu aktivizēts cementa materiāls [142]–[147] (9. att.).



9. att. Elektrofiltru putekļu ģeopolimēra cementa/betona ķīmiskās struktūras attīstība [148].

Elektrofiltra putekļu daļiņu izmēra ietekme uz polimerizācijas reakciju ir nozīmīga, ja reakcijas temperatūra ir zema. Elektrofiltru putekļiem ar mazāku daļiņu izmēru ir lielāka šķīdība un spēcīgāka reaktivitāte.



### 3.2. Elektrofiltru putekļu ģeopolimēra kompozītu poru struktūra

Kopumā elektrofiltru putekļu *GP* kompozītu poru struktūru ietekmē polimerizācijas apstākļi. Ģeopolimēru poras galvenokārt ir mazo poru izmēra diapazonā. Tās atšķiras no kompozītiem uz *OPC* bāzes, tur hidratācijas produktiem nav kompaktizācijas vai optimizācijas ietekmes uz porām. Daži pētnieki [149] novērojuši elektrofiltru putekļu *GP* gēla poras un kapilārās poras, kas ir cietējušas septiņas un 28 dienas, un secinājuši, ka poras ir koncentrētas mazo poru izmēru diapazonā. Tās atšķiras no *OPC* kompozītu porām. Turklāt attiecīgo *GP* C-A-S-H gēls bija vienmērīgi sadalīts, un tajā netika konstatētas kapilārās poras. Taču tika novērots neliels daudzums lielu dobumu, kas radušies daļējas elektrofiltru putekļu daļiņu izšķīšanas rezultātā. Kompozītos uz *OPC* bāzes C-S-H gēls bija koncentrēts, un tajos veidojās kapilārās poras. Citi [150] novēroja, ka poru tilpums palielinājās un morfoloģija ievērojami atšķīrās, kad *OPC* kompozītiem tika palielināts cietēšanas laiks. Pētnieki secināja, ka galvenais faktors varētu būt silīcija gēla piebriešana un poru saplūšana. Kompozītiem uz elektrofiltru putekļu bāzes tika konstatēta pelnu daļiņu un gēla aizpildīšanas efekts. Tas veicina nenozīmīgas poru tilpuma un morfoloģijas izmaiņas. Turklāt mikroporu diametra un tilpuma izmaiņas bija saistītas ar elektrofiltru putekļu polimerizācijas līmeni polimerizācijas laikā.

Arī silīcija saturam sārnu aktivizācijas šķīdumā ir izšķiroša nozīme elektrofiltru putekļus saturoša *GP* poru struktūras attīstībā. Lielāks silīcija daudzums veicina lielāku gēla daudzumu un sekmē vienmērīgu gēla sadalījumu ar poru aizpildīšanas efektu mikromērogā [151], [152]. Sārnu aktivizācijas šķīdums ar augstu silīcija saturu veicina vienmērīgas un blīvas mikrostruktūras veidošanos [149]. Neraugoties uz to, [153] konstatēts, ka augsts silīcija saturs sārnu šķīdumā neietekmē poru struktūras izlīdzināšanos elektrofiltru pelnus saturošiem *GP*. Viņi norādīja, ka poru izmēru sadalījums ir koncentrēts submezoporainā apgabalā (0,22–3,6 nm) un poru tīkls ir vienmērīgāks un stabilāks, ja silīcija saturs sārma šķīdumā ir zems. Poru sadalījums bija mezoporainā apgabalā (3,6–50 nm), un poru tīkls degradējās, ja silīcija daudzums sārma šķīdumā bija liels. Turklāt ilgāks cietēšanas laiks var veicināt N-A-S-H gēla veidošanos ar poru aizpildīšanas efektu un vēl vairāk samazināt porainību [154], [155]. Pieaugot cietēšanas temperatūrai, zināmā mērā samazinās kapilāro poru tilpums [155].

Materiāla porainības noteikšanai ir vairākas metodes. Visbiežāk izmantotās ir šādas [156]:

- dzīvsudraba porozimetrija;
- hēlija piknometrija;
- attēlu analīze;
- ūdens absorbcija.

Lai noteiktu porainību, **IV–VII rakstā** izstrādāta un izmantota metode ārējo iedarbju ietekmes noteikšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos (**II patents**) [157]. Šī metode balstās pulētu virsmu paraugos, kas tiek pētīti skenējošā elektronu mikroskopā (SEM) vai optiskajā mikroskopā ar speciālu attēlu reģistrēšanas iekārtu. Iegūtie attēli no pulētiem paraugu šķērsgriezumiem tiek apkopoti un apstrādāti, tiem tiek veikta kvantitatīva

attēlu analīze. Šo metodi (**II patents**) var izmantot ne tikai porainības noteikšanai, bet galvenokārt parauga šķērsgriezuma īpašību noteikšanai un raksturošanai. Metodē ir aprakstīti un reglamentēti arī paraugu iegūšanas un uzglabāšanas veidi. Tajā reglamentētas arī paraugu sagatavošanas procedūras, attēlu iegūšanas secība un ieteikti labākie veidi, kā apstrādāt un kvantitatīvi analizēt attēlus un to saturu.

**IV–VI rakstā** konstatēts, ka šķiedru iestrādāšana ģeopolimēra kompozītā palielina porainību. Paraugiem, kas stiegroti ar pārstrādātu automašīnu riepu tērauda kordiem, porainība palielinājās par 0,61 % un 2,26 %. Tika konstatēts arī fakts, ka paraugiem, kas tikuši pakļauti slodzei (pārbaudītas šļūdes īpašības), ir par aptuveni 1,17 % mazāk poru nekā paraugiem, kas nav bijuši pakļauti slodzei (pārbaudītas rukuma īpašības). Spiedē testētiem paraugiem bez stiegrojuma būtisks poru samazinājums slodzes ietekmes dēļ netika konstatēts. **V rakstā** konstatēts, ka stiepes testēšanai paredzētajiem paraugiem ir ievērojami lielāks poru daudzums nekā spiedes testos izmantotajiem paraugiem [50]. Stiepes testos izmantotajiem paraugiem poru daudzums ir par 2,14 % un 3,01 % lielāks nekā spiedes testos izmantotajiem paraugiem. Turklāt nestiegrotiem paraugiem nav novērota atšķirīga porainība atkarībā no tā, vai tie ir bijuši pakļauti slodzes iedarbībai, vai nav bijuši pakļauti slodzei. Paraugiem, kas izmantoti stiepes testos, ir novērojamas atšķirības porainībā. Paraugiem, kas pakļauti slodzei, ir par 0,69 % mazāka porainība. Turklāt **VI rakstā** konstatēts, ka stiepes testēšanā izmantotajiem paraugiem šķiedru pievienošana ievērojami palielina poru daudzumu [51]. Paraugiem ar 1 % *PVA* šķiedrām poru daudzums palielinās par 1,88 % un 2,50 %. Trīs punktu liecē ilglaicīgo īpašību testētajiem paraugiem poru daudzuma atšķirības, salīdzinot ar nestiegrotiem 1 % *PVA*, 0,5 % *PVA*/0,5 % tērauda un 1 % tērauda šķiedru stiegrotiem paraugiem, ir 1,37 % robežās, kā tas redzams **VII rakstā** [52]. Vislielākais poru daudzums ir konstatēts nestiegrotiem paraugiem kur tās sastāda 5,02 % no analizēto attēlu kopējā virsmas laukuma, savukārt vismazākais – 0,5 % *PVA*/0,5 % tērauda šķiedru stiegrotiem paraugiem, kur 3,65 % no kopējā virsma laukuma aizņem poras. Ievērojamas atšķirības parādās, ja parauga šķērsgriezuma virsmas analīze tiek veikta paraugiem, kuriem noteikta lieces stiprība. Tad poru un plaisu laukums variē no 14,50 % un 16,48 % paraugiem ar 0,5 % *PVA*/0,5 % tērauda šķiedrām un 1 % tērauda šķiedru stiegrotiem paraugiem – līdz 18,57 % un 22,00 % atbilstoši nestiegrotiem un 1 % *PVA* šķiedru stiegrotiem paraugiem. No tā var secināt, ka plāniem paraugiem ar lielu virsmas laukumu šķiedru pievienošana ļauj atbrīvoties no veidņošanas procesā iestrādātā gaisa apjoma.

### 3.3. Ģeopolimēra un portlandcements kompozītu mikrostruktūru atšķirības

Kā minēts iepriekšējā apakšnodaļā, polimerizētam *GP* kompozītam ir blīvāka struktūra nekā sacietējušiem *OPC* kompozītiem. *GP* sistēmā *C-A-S-H* matricas ķēdes ir garākas nekā *OPC* sistēmas *C-S-H* gēla ķēdes. Tas galvenokārt ir tāpēc, ka  $Al^{3+}$  aizstāj  $Si^{4+}$  tiltiņu pozīcijās. *C-A-S-H* gēlos bija zemāka *Ca/Si* attiecība un augstāka *Al/Si* attiecība nekā *C-S-H*. Tika konstatētas

tobermorīta 1,4 nm klātbūtnes pazīmes ar ķēdes garumu 11 nm un tobermorīta 1,1 nm ar ķēdes garumu 14 nm tetraedru. Turklāt tobermorīta 1,1 nm elastības modulis bija 77,3 MPa, savukārt tobermorīta 1,4 nm – 49,9 MPa. Tas ir saistīts ar augstāku konservatīvo slāņu starpslāņa saišu kohēziju starp tiltu tetraetriem [158].

Ja salīdzina *GP* un *OPC* kompozītmateriālu sistēmu gēla sastāva atšķirības, galvenā atšķirība ir tāda, ka C-S-H veidošanās *OPC* kompozītmateriālā uzrāda zemāku Al un augstāku Ca saturu nekā C-A-S-H veidošanās *GP* kompozītmateriālos uz izdedžu bāzes. Ja *GP* sistēmā pievieno elektrofiltru putekļus, N-(C)-A-S-H gēls var tikt identificēts ar zemu Ca saturu, taču N-A-S-H var būt stabils tikai pie pH, kas mazāks par 12 [159], [160].

Izdedžus saturošam *GP* poru lielums variē mezoporu raksturlieluma apjomā (poru lielums < 50 nm). Šiem *GP* ir arī mazāka porainība nekā kompozītiem uz *OPC* bāzes. Ja salīdzina poru lieluma sadalījumu *OPC* bāzes pastai un *GP* pastai uz izdedžu bāzes, kļūst skaidrs, ka lielākā daļa poru *OPC* bāzes pastai ir robežās no 10 nm līdz 100 nm, savukārt *GP* pastai lielākā daļa poru bija mazākas par 20 nm. [161]–[163].

### **3.4. Uz kaļķa un silīcija bāzētu ģeopolimēra kompozītu mikrostruktūras attīstība**

Tā kā derīgu elektrofiltru putekļu pieejamība nākotnē samazināsies un paaugstinātas temperatūras nepieciešamība šādai *GP* polimerizācijai var būt liels šķērslis, lai šādu materiālu efektīvi izmantotu komerciālā līmenī, kā piemērotāki izejmateriāli *GP* ir pārbaudīti citi alternatīvi izejmateriāli. Pievienojot kaļķi un mikrosiliku *GP* matricā [164], ir noteikta spiedes stiprība un mikrostruktūras īpašības septiņus, 14 un 28 gadus veciem paraugiem. Pētnieki daļēji aizstāja elektrofiltru putekļus ar kaļķi un mikrosiliku attiecīgi 5–10 % un 1–3 % robežās. Viņi konstatēja, ka, daļēji aizvietojoš elektrofiltru putekļus ar kaļķi, samazinās šāda materiāla sacietēšanas laiks un iestrādājamība, savukārt mikrosilikas izmantošana šīs īpašības palielina. Šo paraugu spiedes stiprība palielinās, ja tiek pievienots 7,5 % kaļķa un 2 % mikrosilikas. Pētnieki novēroja arī faktu, ka paraugiem pēc septiņām dienām ir mazāk viendabīga mikrostruktūra ar dažām nereaģējušām elektrofiltru putekļu daļiņām. Viņi secināja, ka elektrofiltru putekļi reaģē visu laiku, turpinoties polimerizācijai. Pēc 28 dienām mikrostruktūra bija viendabīga un kompakta. Paraugu mikrostruktūra tieši ietekmēja spiedes stiprības vērtības.

## 4. ĢEOPOLIMĒRA KOMPOZĪTU LIETOJUMS BŪVNICĪBĀ

Augsta spiedes izturība, augstāka noturība pret skābju iedarbību un termiskā izturība, zemas oglekļa emisijas, zems pārstrādes enerģijas patēriņš un citas īpašības, kas aktualizē *GP* izmantošanu būvniecībā un liek nopietni apsvērt alternatīvas klasiskajiem cementējošajiem materiāliem atšķirībā no parastā portlandcimenta un citiem cementam līdzīgiem materiāliem, kuru sastāvā ir kaļķi.

### 4.1. Ģeopolimēra lietošana grunts pastiprināšanā

Tiek apgalvots, ka *GP* izmantošana augsnes stabilizācijā īpaši ir iespējama vietās, kur ir mīksta vai vāja augsne [165]. Daži autori [166] ir konstatējuši, ka ļoti efektīvs līdzeklis dziļas grunts stabilizācijā ir elektrofiltru putekļu suspensija. Jāuzsver, ka šī suspensija ir *GP* uz kalcija bāzes. Citi autori [167] ir secinājuši, ka sārmu aktivizēts metakaolīns uzrāda daudzsoļus rezultātus grunts stabilizācijā atšķirībā no cementa izmantošanas grunts stabilizēšanai un pastiprināšanai. Viņi konstatēja, ka spiedes stiprības testā 28 dienu vecumā metakaolīna (15 %) stabilizētās grunts stiprība bija 4 MPa, cementa (5 %) stabilizētās grunts stiprība – 3,5 MPa, neapstrādātās grunts stiprība – 0,5 MPa. Ar metakaolīnu pastiprinātas grunts ir elastīgākas [168]. Šīm gruntīm ir mazāks rukums. Tas ir novērojams pie 11 % metakaolīna koncentrācijas.

Citi ir izmantojuši F klases elektrofiltru putekļus (ar zemu Ca saturu) kopā ar sārmu aktivizācijas šķīdumu (ar nātrija hidroksīdu un nātrija silikātu). Sārnu šķīdums tika sagatavots 10 M, 12,5 M un 15 M koncentrācijā. Agrīnā vecumā 15 M šķīduma aktivizētie paraugi uzrādīja lielāku stiprību, savukārt 90 un 365 dienu vecumā ar 12,5 M koncentrāciju aktivizētiem paraugiem spiedes stiprība bija labāka. Paraugi ar 15 M sārmu šķīduma koncentrāciju iestrādes procesā vairākas reizes bija pārāk viskozi un kristalizējās zemākā temperatūrā. Turklāt, ņemot vērā to, ka nātrija silikāts un nātrija hidroksīds ir dārgas ķīmiskās vielas, 12,5 M koncentrācijas aktivizācijas šķīdums no šī viedokļa šķiet piemērotāks [166].

Tika secināts, ka ar sārmu aktivizētu savienojumu injicēšana gruntī ir piemērota grunts stabilizācijai un ir salīdzināma ar tradicionālajām cementa injektāžas metodēm, bet stiprības attīstība ir jāturpina pētīt [169].

### 4.2. Ģeopolimēra lietošana civilajās būvēs un infrastruktūras objektos

Ir bijušas vairākas ēkas, par kurām apgalvots, ka tā ir pirmā ēkā pasaulē, kuras konstrukcija pilnībā veidota no *GP*. Daži autori apgalvo, ka tā ir Kvīnslendas Universitātes Globālo pārmaiņu institūta ēka (10. att.), ko 2013. gadā uzbūvēja *HASSEL* kopā ar *Bligh Tanner un Wagners* [170]. Ēka ir veidota no saliekamiem elementiem. Tie tika izgatavoti no *GP* uz izdedžu/elektrofiltru putekļu bāzes, ko paši komersanti sauc par *Earth Friend Concrete (EFC)*, kas ir *Wagners* zīmols viņu komerciālajai *GP* betona variantam.



(a)



(b)

10. att. Viena no 33 pārseguma paneļiem montāžas process Kvīnslandas Universitātes Globālo pārmaiņu institūta ēkai (a) un pabeigtā ēka (b) [170].

Citi apgalvo, ka pirmās divas ēkas tika uzceltas 1960. gados Ukrainā, Mariupolē. Divas deviņstāvu dzīvojamās ēkas tika būvētas no ukraiņu zinātnieka V.D. Gluhovska izstrādātā sārmu aktivizētā materiāla. Šajā materiālā bija neliels daudzums portlandcements. Atsevišķi autori apgalvo, ka pirmā ēka, kas patiešām tika uzbūvēta no sārmu aktivizēta betona bez portlandcements, tika uzbūvēta 1989. gadā Ļipetskā, Krievijā, un tai bija 20 stāvi [171].

Izņemot iepriekš minētos gadījumus, nav bijis citu apgalvojumu par citām dzīvojamām ēkām, kas uzbūvētas vai izgatavotas no GP kompozītmateriāliem.

Atšķirībā no lietošanas dzīvojamās ēkās GP kompozītu izmantošana infrastruktūras vajadzībām ir daudz izplatītāka. Piemēram, Austrālijā *Rocla* pētniecības centrs ir izgatavojis un veiksmīgi realizējis kanalizācijas caurules, dzelzceļa gulšņus, kapsētu kapenes, caurtekas elementus un sienu paneļus [172]. *Wagners Australia* un *Glasby* 2015. gadā dokumentēja liela mēroga GP betona komerciālu lietojumu Brisbenas Rietumu *Wellkamps* lidostā. Lai izveidotu 435 mm biezu augstas nestspējas segumu skrejceļam ziemeļu galā, lidmašīnu apgriešanās laukumos, rietumu puses manevrēšanas ceļos, kā arī zem angāriem skrejceļa austrumu pusē, tika izmantoti aptuveni 40000 kubikmetru elektrofiltru putekļu GP betona [169]. Indijā ir bijusi veiksmīga pieredze ar bruģakmens izstrādi un izmantošanu bruģētiem ceļu segumiem [173]. Viņi secināja, ka GP kompozītmateriāla īpašības (nosēduma un izplūduma) ir līdzvērtīgas portlandcements betona raksturvērtībām. Turklāt stiprības vērtības bija lielākas par aprēķinātajām.

GP kompozītu blīvā mikrostruktūra nodrošina zemu caurlaidību, kas vēl vairāk samazina un kavē jūras ūdens iekļūšanu, tādējādi padarot GP kompozītus piemērotus lietošanai hidrobūvēs [174]. Autori [175] apgalvo, ka alumīnosilikātu ģeopolimēru gēli ir ķīmiski stabili jūras ūdenī un var būt ilgtspējīga alternatīva ostu konstrukcijām uz portlandcements bāzes. Daži pētnieki [176] kā izejmateriālus augsta blīvuma GP kompozītam piekrastes aizsardzības konstrukcijām ir ierosinājuši izmantot elektrofiltru putekļus un domnu sārņus. Kompozītiem tika sasniegta spiedes stiprības vērtība līdz 37 MPa, un tika ierosināts samazināt viļņlaužu konstrukciju izmērus par 30 % līdz 40 %, neapdraudot konstrukcijas īpašības. Tas ļāva samazināt nepieciešamā materiāla apjomu konstrukcijām, kas vēl vairāk samazina kopējo oglekļa dioksīda emisiju, veidojot šīs konstrukcijas.

Citi autori [177] ir līdzīgi ziņojuši par *GP* kompozītu uz elektrofiltru putekļu bāzes augstajām īpašībām, kas pakļauti skarbai videi, piemēram, jūras ūdenim un skābai videi.

Panākumi *GP* betona ceļu izveidē ir bijuši arī Indijas pētniekiem. 2017. gadā Zinātnisko un rūpniecisko pētījumu padomē – Centrālajā būvniecības pētniecības institūtā *Roorkee* tika uzklāts 50 m garš un 3 m plats ceļa posms. *Utar* Pradešas pilsētā *NTPC* Enerģētikas tehnoloģiju pētniecības aliansē tika uzklāts 100 m garš un 6,5 m plats ceļa posms. Bhubanesvārā 2017. gadā tika ierīkoti vairāki kravu ceļi smago kravu pārvadāšanai no raktuvēm. Lanjigarhā *Sesa Sterlite Ltd* sadarbībā ar *IMMT* ierīkoja 40 m garu *GP* ceļu. Ramagundamā 2019. gada beigās *NTPC* sadarbībā ar *NETRA* ieklāja 500 m garu elektrofiltru putekļu saturoša *GP* betona ceļu [178].

Kopumā *GP* tehnoloģija ir progresīvāka un tehniski labāk piemērojama saliekamajās konstrukcijās. Galvenais faktors ir tas, ka *GP* ir diezgan jutīgi, kamēr tie sacietē (polimerizējas). Viegļāk ir nodrošināt augstas temperatūras un drošu sārnu apstrādes vidi konkrētā vietā nekā būvlaukumā, turklāt visi nepieciešamie tehnoloģiskie līdzekļi ir pārvietojami. To var secināt pēc **I–VII rakstā** izveidotajiem un testētajiem ģeopolimēru sastāviem. Visi testētie ģeopolimēru paraugi tika izstrādāti, sagatavoti un testēti laboratorijas apstākļos, tāpēc iegūtās īpašības ir iespējamās tikai noteiktos apstākļos. Šajos apstākļos ir veidnoti un polimerizēti elementi kontrolētā vidē. Tāpēc iepriekš minētajos darbos izstrādātie ģeopolimēru kompozītu sastāvi būtu piemēroti saliekamo konstrukciju izveidei. Arī veselības un vides prasības būtu ievērojami vieglāk ievērot saliekamo elementu rūpniecā, nevis būvlaukumā, jo sārnu šķīdums ir kodīgs un bīstams videi.

Ja mūsdienu *GP* ražošanas tehnoloģija būtu jāizmanto mobilā veidā, *GP* būvniecības izmaksas būtu nepieejamas un *GP* izmantošana būtu finansiāli nepamatota. Vienīgās vietas, kur zema kalcija *GP* kompozītu izmantošana būvlaukumos šķiet iespējama, ir valstis, kur diennakts vidējā temperatūra ir augsta, lai uzturētu *GP* kompozīta polimerizācijas reakciju.

### 4.3. Ģeopolimēra lietošana javu formātā

Ģeopolimēru javai piemīt līdzīgas īpašības kā dabiskajiem iežiem, piemēram, granītam un marmoram. Ģeopolimēru kompozītu izturības īpašības, jo īpaši skarbā vidē, padara tos par alternatīvu parastajai cementa javai ēku atjaunošanā. Pētnieki [179] ir ziņojuši, ka *GP* uz metakaolīna bāzes ar kalcija karbonāta ( $\text{CaCO}_3$ ) un kalcija hidroksīda ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) saturu var izmantot kā javu vēsturisko ēku restaurācijai.

2012. gadā *Zeobond* ziņoja par komerciāla *GP* betona gatavā maisījuma ar tērauda stiegrojumu izmantošanu pārseguma plātņu un gājēju ceļu izveidei Melburnā (Austrālijā). *Zeobond* un *Rocla* attiecīgi 2012. un 2011. gadā atbilstoši Austrālijas standartiem ir ražojuši un testējuši saliekamās caurules, dzelzceļa gulšņus, bruģakmeņus un uzstādījuši tos vairākos būvniecības projektos [169].

#### 4.4. Ģeopolimēra kā uguns ietekmi aizturošā slāņa lietošana

Nesen veiktajos pētījumos zinātnieki ir pētījuši *GP* veiktspēju paaugstinātā temperatūrā, salīdzinot to ar *OPC* betona paraugiem. Viņi izmantoja C klases elektrofiltru putekļus, kas tika aktivizēti ar nātrija hidroksīda un nātrija silikāta šķīdumu. Gan *GP*, gan *OPC* betona paraugi tika pakļauti temperatūrai līdz 1200 °C. Uz *OPC* bāzes izgatavotajiem paraugiem tika konstatētas ievērojamas plaisas temperatūrā virs 800 °C, savukārt *GP* paraugiem bija ļoti maz redzamu plaisu, un pat augstās temperatūrās no tiem neatdalījās parauga daļas. Spiedes stiprība paraugiem uz *OPC* bāzes (49 MPa) bija mazāka nekā *GP* paraugiem (54 MPa). Ņemot vērā šos rezultātus, pētnieki secināja, ka *GP* ir piemērots izmantošanai kā ugunsizturīgs pārklājums vai kā konstrukciju materiāls, kur ugunsizturība un konstrukcijas īpašības ir ļoti svarīgas [38].

#### 4.5. Ģeopolimēra kā siltumizolējoša materiāla lietošana

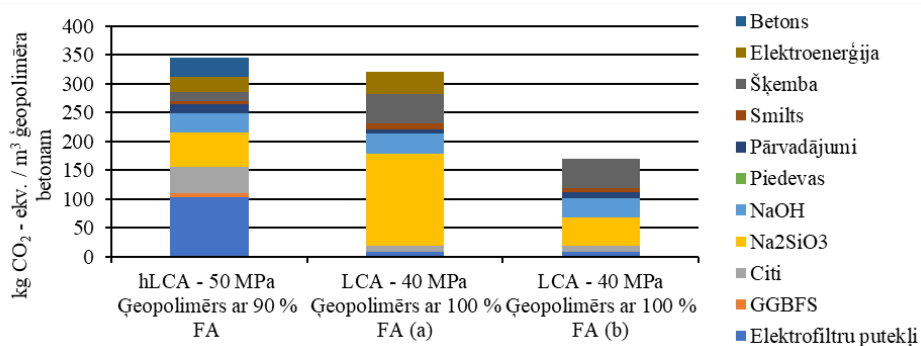
Pētnieki [180] ir konstatējuši, ka, ja *GP* matricu uz metakaolīna bāzes sajauc kopā ar zāģu skaidām, iegūtais materiāls var kalpot kā efektīvs ēku izolācijas materiāls. Ja ūdens un biomasas savstarpējā attiecība ir līdz 2, tad materiāls uzrāda zemu siltumvadītspēju (0,118–0,125 W/m·K). Šo materiālu ir iespējams praktiski izmantot kā ēku izolāciju.

Visiem ģeopolimēru sastāviem, kas tika pakļauti mikrostruktūras novērtējumam (**IV–VII raksts**), ir porainība un tukšumu apjoms, kas nesaplaisājušajā stāvoklī ir mazāks par 10 %, tāpēc tie nav piemēroti izmantošanai par izolācijas materiālu. Tāpēc ir veikti dažādi pētījumi ar līdzīgiem bāzes sastāviem, pievienojot putu ģeneratoru, kuros konstatēts, ka tie ir piemēroti izolācijas mērķiem.

## 5. ĢEOPOLIMĒRA KOMPOZĪTU ILGTERMIŅA VIDES IETEKME

### 5.1. Ģeopolimēra ilgtermiņa ietekmes uz vidi novērtējums, pamatojoties uz dzīves cikla novērtējumu

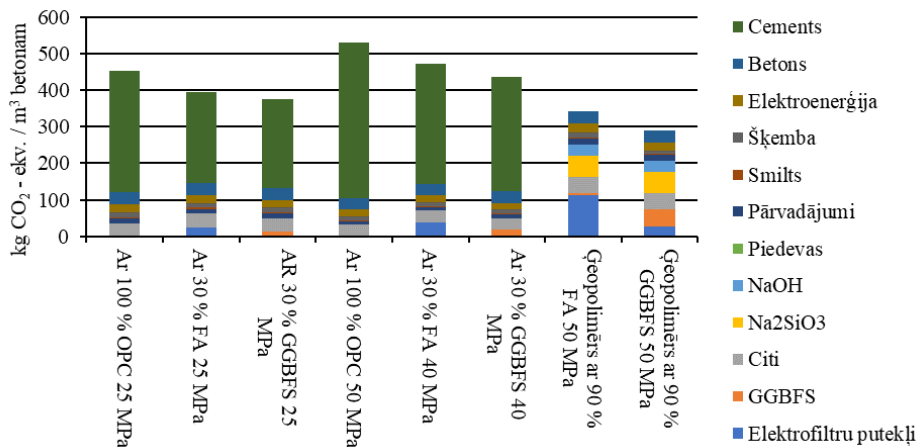
Dzīves cikla novērtējums ir bijis galvenais analītiskais mehānisms, kas līdz šim ir apstiprinājis un pamatojis apgalvojumus, ka *GP* ir videi draudzīgāks materiāls nekā kompozīti uz *OPC* bāzes. Austrālijā veiktajā pētījumā [181] tika aplūkots portlandcements, betona un *GP* betona radīto siltumnīcefekta gāzu emisiju hibrīda dzīves cikla novērtējums (*hLCA*).



11. att. Elektrofiltro bāzēta ģeopolimēra betona oglekļa emisiju intensitātes salīdzinājums *hLCA* un *LCA*, kas pētīts publikācijā [7] un [182], balstoties [7] metodoloģijā.

Pētnieki secināja, ka atšķirībā no dzīves cikla (*LCA*) novērtējuma pētījumiem, ko iepriekš veica Davidovits un Grants (11. att.), *hLCA* rezultāti (12. att.) liecina par pieaugumu siltumnīcefekta gāzu emisijās 50 MPa *OPC* betonam, 25 MPa *OPC* betonam, 25 MPa cementu maisījuma betonam un 50 MPa *GP* betonam attiecīgi par 29 %, 22 %, 11–50 % un 48–103 % (atkarībā no emisiju sadalījuma ar *FA* avotu) pret *LCA* vērtībām (12. att.).





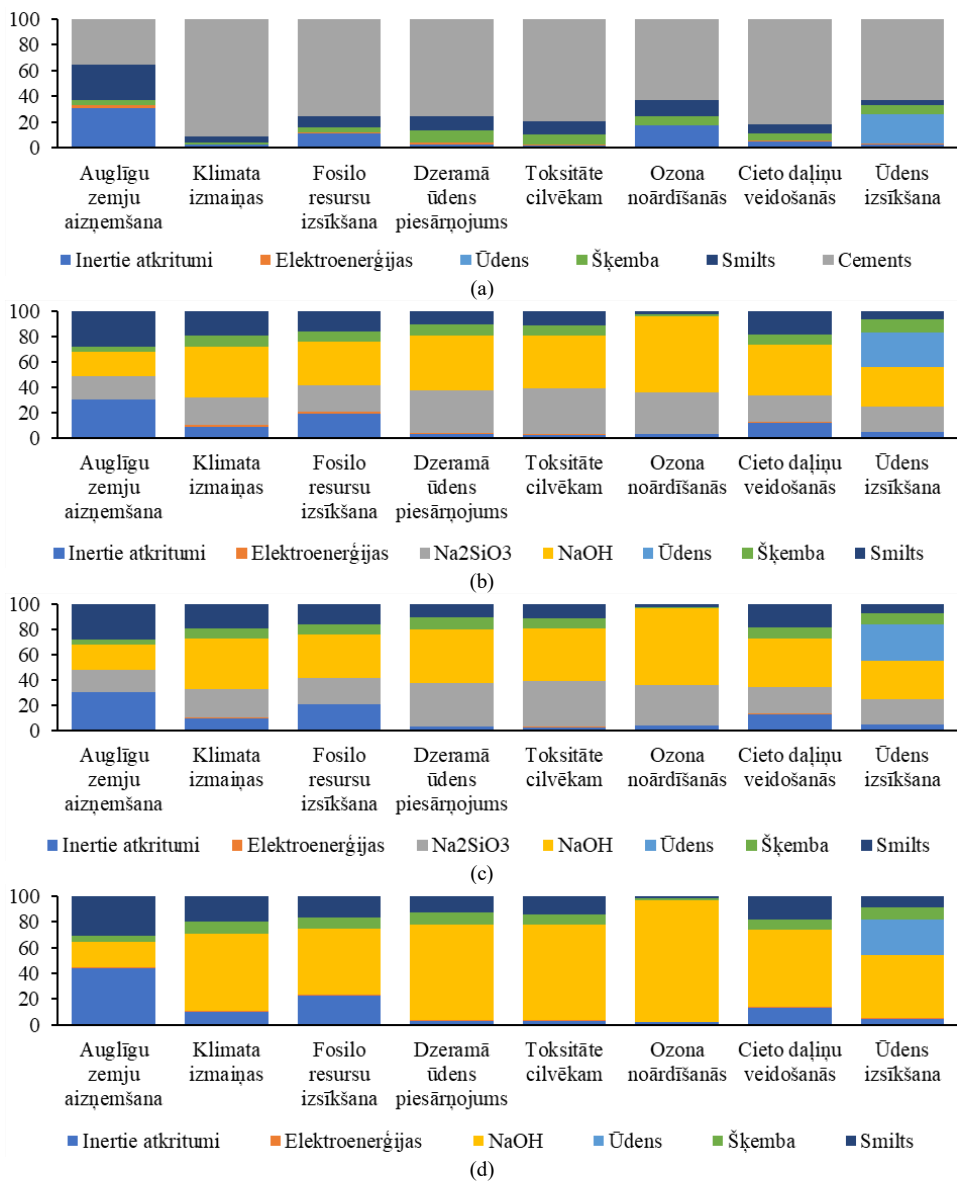
12. att. Astoņu dažādu betonu oglekļa emisiju salīdzinājums pēc *hLCA* [181].

Turklāt viņi konstatē, ka šie secinājumi saskan ar citiem dzīves cikla novērtēšanas pētījumu rezultātiem. Citiem vārdiem sakot, *GP* betonam ir vislielākā iespēja samazināt siltumnīcas efekta gāzu emisijas, salīdzinot ar *OPC* un cementu maisījumu betoniem. Izmantojot ekonomiskā sadalījuma metodi, ar *GP* betonu, kura pamatā ir elektrofiltru putekļi un granulēti domnu sārņi, var ievērojami samazināt siltumnīcas efekta gāzu emisijas – attiecīgi par 32 % un 43 %, salīdzinot ar *OPC* betonu, nezaudējot spiedes stiprību. Salīdzinot ar cementu maisījumu betonu, siltumnīcas efekta gāzu emisijas vairāk samazinās uz zemes granulētu domnu sārņu bāzes izgatavotam *GP* (16 %), savukārt uz elektrofiltru putekļu *GP* – tikai par 9 %. Citos pētījumos [183] ir līdzīgs secinājums, ka *GP* ir par 37 % mazāks globālās sasilšanas veicināšanas potenciāls nekā *OPC*. Pētnieki secināja arī to, ka *GP* betons ir sliktāks attiecībā uz enerģijas patēriņu tā ražošanai. Šajā gadījumā *GP* betonam fosilā kurināmā resursi tiek izmantoti par 287 % vairāk nekā *OPC* bāzes betonam. Jāatzīmē, ka šajā jautājumā literatūras dati nav konsekventi, jo daži autori [184] apgalvo, ka enerģijas patēriņš *GP* betona ražošanai ir par 48 % lielāks nekā *OPC* betona ražošanai, savukārt citi [40] norāda, ka abiotiskā fosilā kurināmā izsmelšana (*ADPF*) *GP* betonam ir par 26 % mazāka nekā *OPC* bāzes betonam.

Citi pētnieki [185] ir snieguši līdzīgus *GP* betona un *OPC* betona izmantošanas dzīves cikla novērtējumus. Viņi secināja, ka, ņemot vērā tādus faktoros kā ekosistēma, cilvēku veselība un resursi, *GP* betona negatīvā ietekme uz vidi ir mazāka nekā portlandcimenta betonam. Situācija redzama 13. attēlā. No visām betona sastāvdaļām vislielākā ietekme (76,42 %) ir cementam, savukārt nātrija hidroksīda un nātrija silikāta ietekme *GP* ir tikai 59,97 % no visām *GP* sastāvdaļām kopā. Ja nātrija silikātu aizstāj ar mikrosiliku, ietekme vēl vairāk samazinās. *GP* betona globālās sasilšanas veicināšanas potenciāls samazinās līdz 148 kg, 135 kg un 133 kg CO<sub>2</sub>-e attiecīgi *GP* bez mikrosilikas, *GP* ar mikrosiliku un *GP* ar mikrosiliku un nātrija silikāta samazinājumu par 47,61 %. Tajā pašā laikā portlandcimenta betonam ir 597,54 kg CO<sub>2</sub>-e ietekme. Viņi arī konstatēja, ka *GP*

betona ietekmi uz vidi vairāk rada izejvielu transportēšana nekā portlandcements betonam. *GP* betona gadījumā tā svārstās no 20,83 % līdz 29,01 %, portlandcements betonam – 9,71 %. Pētnieki apgalvo arī to, ka portlandcements aizstāšana ar *GP* betonā var samazināt betona izmaksas par 10,87–17,77 %.

Kopumā vides ieguvumi, izmantojot *GP* kompozītmateriālus, nevis *OPC* kompozītmateriālus, ir saistīti ar materiāla atrašanās vietu. **I–VII rakstā** pārbaudītie *GP* būtu mazāk kaitīgi videi, ja tos izmantotu netālu no elektrofiltru putekļu un sārnu ražošanas vietām. Pretējā gadījumā visi ieguvumi no elektrofiltru putekļu izmantošanas *GP* tiek zaudēti, jo videi tiek nodarīts kaitējums, kas rodas izejmateriālu transportēšanas rezultātā. Ņemot vērā to, ka elektrofiltru putekļi tiek uzskatīti par atkritumiem, tie jāizmanto vietās, kur šie atkritumi atrodas, vai pēc iespējas tuvāk to atrašanās vietai. Vienīgais veids, kā *GP* kompozītu izmantošana ārpus to lokācijas vietas būtu attaisnojama, būtu konstrukcijās, kur nepieciešama papildu izturība pret skābu vai skarbu ārējās vides ietekmi. Pretējā gadījumā *GP* kompozītu izmantošana radītu lielāku negatīvo ietekmi uz vidi nekā kompozīti uz *OPC* bāzes.



13. att. Cementa bāzes betona (a), ģeopolimēra betona (b), ģeopolimēra betona ar mikrosilīku un nātrija silikātu (c) un ģeopolimēra betona ar mikrosilīku bez nātrija silikāta (d) ietekmes uz vidi novērtējums [185].

## SECINĀJUMI

Promocijas darbs veltīts metodoloģijas izstrādei ilglaicīgo deformāciju ietekmes novērtēšanai uz ģeopolimēra kompozītu mikrostruktūru.

### Galvenie secinājumi

1. Elektrofiltru putekļu ģeopolimēra kompozītmateriāli uzrāda labas mehāniskās īpašības. Nestiegoti ģeopolimēru kompozīti septiņu dienu vecumā uzrāda spiedes stiprību, kas līdzvērtīga C30/37 klases portlandcementsa betonam. Toties 28 dienu vecumā nestiegoti ģeopolimēru kompozīti uzrāda spiedes stiprību, kas nav mazāka par C40/45 klases portlandcementsa betona spiedes stiprību un sasniedz 61,44 MPa cilindriskajiem paraugiem un 92,0 MPa kubveida paraugiem.
2. Ģeopolimēra kompozītu stieģošana ar šķiedru stieģojumu nav izdevīga visos gadījumos. Stieģes paraugiem 1 % PVA apjoma šķiedru pievienošana rezultējas ar 3,7 % zemāku stieģes stiprību, salīdzinot ar nestieģotiem paraugiem. Trīs punktu liecē 1 % PVA šķiedru, 0,5 % PVA/0,5 % tērauda šķiedru un 1 % tērauda šķiedru stieģrotajiem paraugiem novērota 9 %, 14,2 % un 23,2 % lieces stiprības samazināšanās, salīdzinot ar nestieģotiem paraugiem.
3. Šķiedru stieģojuma pievienošana ģeopolimēru kompozītmateriāliem uzlabo šļūdes īpašības trīs punktu lieces gadījumā. Ģeopolimēru kompozīti ar 1 % tērauda un 0,5 % PVA/0,5 % tērauda šķiedru stieģojumu uzrāda 51,7 % un 2,7 % šļūdes deformāciju samazinājumu, salīdzinot ar nestieģotiem paraugiem. Šļūdes deformācijas stieģes paraugiem pie 1 % PVA šķiedru iesaistes būtiski nesamazinās, savukārt spiedes gadījumā 1 % un 5 % PP šķiedru pievienošana samazina šļūdes deformācijas atbilstoši par 21,2 % un 49,7 %.
4. Ģeopolimēru kompozītmateriālu īpatnējā šļūde spiedē vidēji ir par 85,92 % mazāka nekā stieģē. Tas liecina, ka stieģē ģeopolimēru kompozītmateriāli ir 7,5 reizes lielāka īpatnējā šļūde nekā spiedē, kas nozīmē, ka par šādu vērtību stieģē ģeopolimēra kompozītiem ir lielāka iespēja šļūdēt un tiem būs lielākas šļūdes deformācijas nekā spiedē. Trīs punktu lieces gadījumā 1 % tērauda šķiedru stieģrotie paraugi uzrāda par 37,1 % mazāku īpatnējo šļūdi nekā nestieģoti ģeopolimēra kompozīti. Ģeopolimēru kompozītiem trīs punktu lieces gadījumā īpatnējā šļūde ir par 99,18 % mazāka nekā spiedē un par 99,88 % mazāka nekā stieģē. Turklāt spiedē ģeopolimēru kompozītmateriāli uzrāda par 13–23 % mazāku īpatnējo šļūdi nekā portlandcementsa kompozītmateriāli.
5. Šķiedru pievienošana ļauj samazināt rukuma deformācijas. Stieģes ģeopolimēra kompozītu paraugiem ar 1 % PVA šķiedrām rukuma deformācijas ir par 54,21 % zemākas nekā nestieģotiem paraugiem.

6. Balstoties ilglaicīgo īpašību testos un tajos iegūtajos rezultātos, tika izstrādāta un patentēta ilglaicīgo īpašību noteikšanas metodika dažādos sprieguma stāvokļos (**I patents**).
7. Analizējot mikrostruktūru paraugiem, kas pakļauti ilgstošo īpašību testiem spiedē, tika novērots, ka šķiedru iestrādāšana ģeopolimēra matricā ievērojami palielina gaisa iesaisti maisījumā. Tērauda šķiedru pievienošana paraugiem 1 % apjomā palielina gaisa iesaisti par 0,61–2,26 %, 1 % *PVA* šķiedru iesaiste palielina gaisa apjomu par 1,88–2,50 %, savukārt pārstrādātu riepu kordu iesaiste rezultējas ar 1–2,26 % palielinājumu porainībā. Papildus tika noteikts, ka paraugu šķērsriezuma centrā un vidējās daļās poru apjoms ir 4,7–10,3 % zemāks nekā šķērsriezuma ārējās daļās.
8. Porainība stiepes paraugos ir vidēji par 5,15 % lielāka nekā spiedes paraugos. Turklāt ar *PVA* šķiedrām stiegtiem stiepes paraugiem tā ir vidēji par 19,85–26,29 % lielāka nekā paraugiem bez šķiedru stiegrojuma.
9. Ir skaidras indikācijas par ilglaicīgo īpašību izpaušmju saistību ar parauga mikrostruktūras stāvokli – rukuma radītajām plaisām ir milzīga nozīme, un šajā gadījumā šķiedru stiegrojums uzlabo gan mehāniskās, gan ilglaicīgās īpašības, kā arī mazina rukuma efektu.
10. Vērtējot slodzes ietekmi uz paraugu šķērsriezuma mikrostruktūru pie slodzes līmeņa, kas ir 20 % no graužošās slodzes, spiedē netiek novērota paraugu šķērsriezuma mikrostruktūras degradācija vai sabrukums. Stiepē un trīs punktu liecē slogotajiem paraugiem tika novērotas plaisas. No tā var secināt, ka parauga formai, jo īpaši termiski cietinātiem ģeopolimēra kompozītiem, ir liela nozīme. Atkarībā no formas rukuma iespaidā tiek ierosināti iekšējie spriegumi, kas rada mikroplaisas. Savukārt spiedē mikroplaisām nav vērā ņemama tūlītēja iespaids uz ilglaicīgajām īpašībām stiepē un trīs punktu liecē, kur viss vai daļa no šķērsriezuma ir pakļauti stiepes spriegumiem, ietekme uz ilglaicīgajām īpašībām ir tūlītēja.
11. Ņemot vērā iegūtos kvantitatīvās attēlu analīzes, kas veikta ilgstošo īpašību testēto paraugu pulētās virsmas paraugiem, rezultātus, tika izstrādāta un patentam pieteikta metode ārējo faktoru ietekmes noteikšanai uz betona un cementa kompozītu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos (**II patents**).

## IZMANTOTĀ LITERĀTŪRA

- [1] Z. Li, B. Delsaute, T. Lu, A. Kostiuhenko, S. Staquet, and G. Ye, "A comparative study on the mechanical properties, autogenous shrinkage and cracking proneness of alkali-activated concrete and ordinary Portland cement concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 292, p. 123418, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123418.
- [2] B. A. Tayeh, D. M. A. Saffar, and R. Alyousef, "The Utilization of Recycled Aggregate in High Performance Concrete: A Review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 8469–8481, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.05.126.
- [3] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, and S. K. Bhattacharyya, "Geopolymer concrete: A review of some recent developments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78–90, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.
- [4] D. Suescum-Morales, D. Cantador-Fernández, J. R. Jiménez, and J. M. Fernández, "Mitigation of CO2 emissions by hydrotalcites of Mg3Al-CO3 at 0 °C and high pressure," *Appl. Clay Sci.*, vol. 202, no. December 2020, 2021, doi: 10.1016/j.clay.2020.105950.
- [5] J. A. Ober, "Mineral commodity summaries 2018," Reston, VA, 2018. doi: 10.3133/70194932.
- [6] Y. H. M. Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and M. El-Zeadani, "Clean production and properties of geopolymer concrete; A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 251, p. 119679, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119679.
- [7] L. K. Turner and F. G. Collins, "Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 125–130, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023.
- [8] J. G. J. Olivier, K. M. Schure, and J. A. H. W. Peters, "TRENDS IN GLOBAL CO2 AND TOTAL GREENHOUSE GAS EMISSIONS Summary of the 2017 report," no. 2983, 2017, [Online]. Available: <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2017-summary-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2983.pdf>.
- [9] R. M. Andrew, "Global CO2 emissions from cement production," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, no. 1, pp. 195–217, 2018, doi: 10.5194/essd-10-195-2018.
- [10] J. G. Olivier and J. A. H. w. Peters, "TRENDS IN GLOBAL CO 2 AND TOTAL GREENHOUSE GAS: 2020 Report," *PBL Netherlands Environ. Assess. Agency, Hague.*, no. December, 2020.
- [11] H. Li, Q. Deng, J. Zhang, B. Xia, and M. Skitmore, "Assessing the life cycle CO2 emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China," *J. Clean. Prod.*, vol. 210, no. 38, pp. 1496–1506, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.102.
- [12] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, and E. Byars, "Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 781–788, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.004.
- [13] C. Valderrama, R. Granados, J. L. Cortina, C. M. Gasol, M. Guillem, and A. Josa, "Implementation of best available techniques in cement manufacturing: A life-cycle assessment study," *J. Clean. Prod.*, vol. 25, pp. 60–67, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.11.055.
- [14] A. R. G. Azevedo *et al.*, "Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW)," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 5942–5952, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.03.122.
- [15] P. Zhang, Y. Zheng, K. Wang, and J. Zhang, "A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar," *Compos. Part B Eng.*, vol. 152, no. June, pp. 79–95, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.031.
- [16] B. A. Tayeh, A. M. Zeyad, I. S. Agwa, and M. Amin, "Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. August, p. e00673, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00673.
- [17] B. C. Lippiatt and S. Ahmad, *Measuring the Life-Cycle Environmental and Economic Performance of Concrete: the Bees Approach*. 2004.
- [18] P. Duxson, S. W. Mallicoat, G. C. Lukey, W. M. Kriven, and J. S. J. van Deventer, "The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 292, no. 1, pp. 8–20, 2007, doi: 10.1016/j.colsurfa.2006.05.044.
- [19] S. E. W. Djwantoro Hardjito Dody M. J. Sumajouw, and B. Vijaya Rangan, "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 101, no. 6, doi: 10.14359/13485.
- [20] A. Castel, S. J. Foster, T. Ng, J. G. Sanjayan, and R. I. Gilbert, "Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer Concrete," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, no. 5, pp. 1619–1628, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0599-1.

- [21] K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, and A. Taylor, "Drying shrinkage and creep performance of geopolymer concrete," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–42, 2013, doi: 10.1080/21650373.2013.764963.
- [22] W. S. E., "Creep Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *Civ. Eng. Dimens.*, vol. 12, no. 2, 2010, doi: 10.9744/ced.12.2.73-78.
- [23] S. E. Wallah and B. V. Rangan, "Low-Calcium Fly Ash Based," pp. 1–107, 2006, [Online]. Available: <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/34322>.
- [24] S. Chen, C. Wu, and D. Yan, "Binder-scale creep behavior of metakaolin-based geopolymer," *Cem. Concr. Res.*, vol. 124, no. July, p. 105810, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105810.
- [25] I. Khan, T. Xu, A. Castel, R. I. Gilbert, and M. Babae, "Risk of early age cracking in geopolymer concrete due to restrained shrinkage," *Constr. Build. Mater.*, vol. 229, p. 116840, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116840.
- [26] A. A. Melo Neto, M. A. Cincotto, and W. Repette, "Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 4, pp. 565–574, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.11.002.
- [27] F. Puertas, T. Amat, A. Fernández-Jiménez, and T. Vázquez, "Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 12, pp. 2031–2036, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00222-9.
- [28] K. Pimraksa, P. Chindaprasirt, A. Rungchiet, K. Sagoe-crentsil, and T. Sato, "Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 21, pp. 6616–6623, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.04.044.
- [29] M. T. Marvila, A. R. G. de Azevedo, and C. M. F. Vieira, "Reaction mechanisms of alkali-activated materials," *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 14, no. 3, pp. 1–26, 2021, doi: 10.1590/s1983-41952021000300009.
- [30] J. He, Y. Jie, J. Zhang, Y. Yu, and G. Zhang, "Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, no. 1, pp. 108–118, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010.
- [31] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer," *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 12, pp. 1073–1078, 2009, doi: 10.1016/j.mineng.2009.03.022.
- [32] J. Temuujin, W. Rickard, M. Lee, and A. Van Riessen, "Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 357, no. 5, pp. 1399–1404, 2011, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.09.063.
- [33] M. L. Kumar and V. Revathi, "Microstructural Properties of Alkali-Activated Metakaolin and Bottom Ash Geopolymer," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 5, pp. 4235–4246, 2020, doi: 10.1007/s13369-020-04417-6.
- [34] S. Pilehvar *et al.*, "Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 200, pp. 94–103, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.057.
- [35] R. H. Haddad and O. Alshbuol, "Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 699–707, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.011.
- [36] M. Olivia and H. Nikraz, "Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method," *Mater. Des.*, vol. 36, pp. 191–198, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.10.036.
- [37] A. E. Kurtoğlu *et al.*, "Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete," *Advances in Concrete Construction*, vol. 6, no. 4, pp. 345–362, 2018, doi: 10.12989/acc.2018.6.4.345.
- [38] X. Jiang, R. Xiao, M. Zhang, W. Hu, Y. Bai, and B. Huang, "A laboratory investigation of steel to fly ash-based geopolymer paste bonding behavior after exposure to elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, p. 119267, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119267.
- [39] S. Luhar, I. Luhar, and R. Gupta, "Durability performance evaluation of green geopolymer concrete," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 10, pp. 4297–4345, 2022, doi: 10.1080/19648189.2020.1847691.
- [40] D. A. Salas, A. D. Ramirez, N. Ulloa, H. Baykara, and A. J. Boero, "Life cycle assessment of geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 170–177, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.123.
- [41] A. Hassan, M. Arif, and M. Shariq, *Influence of microstructure of geopolymer concrete on its mechanical properties—A review*, vol. 35. Springer Singapore, 2020, doi: 10.1007/978-981-13-7480-7\_10.
- [42] F. Farooq *et al.*, "Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 306, no. March, p. 124762, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124762.
- [43] "Coal Combustion Byproducts, Kentucky Geological Survey, University of Kentucky." <https://www.uky.edu/KGS/coal/coal-for-combustionbyproducts.php> (accessed Feb. 03, 2022).
- [44] G. Couto Mantese and D. Capaldo Amaral, "Comparison of industrial symbiosis indicators through agent-based modeling," *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1652–1671, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.142.

- [45] P. Poudenx, "The effect of transportation policies on energy consumption and greenhouse gas emission from urban passenger transportation," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 42, no. 6, pp. 901–909, 2008, doi: 10.1016/j.tra.2008.01.013.
- [46] R. Gailitis *et al.*, "Mechanical Properties of Geopolymer Concretes Reinforced with Waste Steel Fibers," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 660, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/660/1/012007.
- [47] R. Gailitis *et al.*, "Long-Term Deformation Properties of a Carbon-Fiber-Reinforced Alkali-Activated Cement Composite," *Mech. Compos. Mater.*, vol. 56, no. 1, pp. 85–92, 2020, doi: 10.1007/s11029-020-09862-w.
- [48] R. Gailitis, A. Sprince, T. Kozlovskis, L. Radina, and L. Pakrastins, "Long-Term Properties of Different Fiber Reinforcement Effect on Fly Ash-Based Geopolymer Composite," pp. 1–8, 2021.
- [49] R. Gailitis, A. Sprince, L. Pakrastins, K. Korniejenko, and T. Kozlovskis, "REINFORCED AND PLAIN GEOPOLYMER CONCRETE SPECIMEN CROSS-SECTION COMPOSITION INFLUENCE ON CREEP STRAINS," no. 1, pp. 739–746.
- [50] R. Gailitis, A. Sprince, L. Pakrastins, K. Korniejenko, and T. Kozlovskis, *Plain Geopolymer Concrete Cross-Section Surface Analysis After Creep and Shrinkage Tests in Compression and Tension*, vol. 31. Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-72921-9\_2.
- [51] R. Gailitis, A. Sprince, L. Pakrastins, P. Bazan, and K. Korniejenko, "Plain and PVA fibre-reinforced geopolymer compact tension specimen critical area surface composition assessment," *Vide. Tehmol. Resur. – Environ. Technol. Resour.*, vol. 3, pp. 72–77, 2021, doi: 10.17770/etr2021vol3.6569.
- [52] R. Gailitis, L. Pakrastins, A. Sprince, L. Radina, G. Sakale, and K. Miernik, "Different Fiber Reinforcement Effects on Fly Ash-Based Geopolymer Long-Term Deflection in Three-Point Bending and Microstructure," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 23, 2022, doi: 10.3390/ma15238512.
- [53] W. Meng and K. H. Khayat, "Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers," *Compos. Part B Eng.*, vol. 107, pp. 113–122, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.069.
- [54] N. Ranjbar and M. Zhang, "Fiber-reinforced geopolymer composites: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 107, no. February 2019, p. 103498, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103498.
- [55] M. Mastali, A. Dalvand, A. R. Sattarifard, Z. Abdollahnejad, and M. Illikainen, "Characterization and optimization of hardened properties of self-consolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers," *Compos. Part B Eng.*, vol. 151, no. May, pp. 186–200, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.021.
- [56] P. Sukontasukkul, P. Pongsopha, P. Chindaprasirt, and S. Songpiriyakij, "Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 37–44, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.122.
- [57] A. Bhutta, P. H. R. Borges, C. Zanotti, M. Farooq, and N. Banthia, "Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 80, pp. 31–40, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.11.014.
- [58] M. Farooq, A. Bhutta, and N. Banthia, "Tensile performance of eco-friendly ductile geopolymer composites (EDGC) incorporating different micro-fibers," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 103, no. January, pp. 183–192, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.004.
- [59] N. Ranjbar *et al.*, "A comprehensive study of the polypropylene fiber reinforced fly ash based geopolymer," *PLoS One*, vol. 11, no. 1, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0147546.
- [60] T. F. Cooke, "Inorganic Fibers—A Literature Review," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 74, no. 12, pp. 2959–2978, 1991, doi: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb04289.x.
- [61] L. Yan, B. Kasal, and L. Huang, "A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering," *Compos. Part B Eng.*, vol. 92, pp. 94–132, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.02.002.
- [62] R. F. Zollo, "Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 19, no. 2, pp. 107–122, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7).
- [63] S. Chand, "Carbon fibers for composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 35, no. 6, pp. 1303–1313, 2000, doi: 10.1023/A:1004780301489.
- [64] M. Mehrali *et al.*, "Blending Electronics with the Human Body: A Pathway toward a Cybernetic Future," *Adv. Sci.*, vol. 5, no. 10, 2018, doi: 10.1002/advs.201700931.
- [65] A. Bentur and S. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites*. Crc Press, 2006.
- [66] R. S. Olivito and F. A. Zuccarello, "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 246–255, 2010, doi: 10.1016/j.compositesb.2009.12.003.
- [67] M. H. Al-Majidi, A. Lampropoulos, and A. B. Cundy, "Steel fibre reinforced geopolymer concrete (SFRGC)



- with improved microstructure and enhanced fibre-matrix interfacial properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 139, pp. 286–307, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.045.
- [68] R. Wang, X. Gao, J. Zhang, and G. Han, “Spatial distribution of steel fibers and air bubbles in UHPC cylinder determined by X-ray CT method,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 39–47, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.030.
- [69] A. J. Sedriks, “Corrosion of stainless steel, 2,” 1996.
- [70] C. A. Schunemann, “Copper coated steel.” Google Patents, Mar. 28, 1967.
- [71] N. C. Hosking, M. A. Ström, P. H. Shipway, and C. D. Rudd, “Corrosion resistance of zinc-magnesium coated steel,” *Corros. Sci.*, vol. 49, no. 9, pp. 3669–3695, 2007, doi: 10.1016/j.corsci.2007.03.032.
- [72] D. D. L. Chung, *Carbon composites: composites with carbon fibers, nanofibers, and nanotubes*. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [73] A. Pregoletti, M. Traina, and A. Bunsell, “Handbook of tensile properties of textile and technical fibers.” Cambridge: Woodhead Publishing Limited) p, 2009.
- [74] R. Siddique, J. Khatib, and I. Kaur, “Use of recycled plastic in concrete : A review,” vol. 28, pp. 1835–1852, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.
- [75] Y. Ko, “Investigation of Polymorphism for Amorphous and Semi-Crystalline Poly (-Ethylene Terephthalate-) Using High-Pressure Brillouin Spectroscopy,” vol. 70, no. 4, pp. 382–388, 2017, doi: 10.3938/jkps.70.382.
- [76] J. P. M. Mwangi, *Flexural behavior of sisal fiber reinforced concrete beams*. University of California, Davis, 2001.
- [77] A. Larena and G. Pinto, “The Effect of Surface Roughness and Crystallinity on the Light Scattering of Polyethylene Tubular Blown Films \*,” vol. 33, no. 12, 1993.
- [78] B. Mu, C. Meyer, and S. Shimanovich, “Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix,” vol. 32, no. January 2001, pp. 783–787, 2002.
- [79] A. E. Richardson, “Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions,” 2006, doi: 10.1108/02630800610666673.
- [80] N. Banthia and R. Gupta, “Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete,” vol. 36, pp. 1263–1267, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.010.
- [81] T. Ochi, S. Okubo, and K. Fukui, “Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber,” vol. 29, pp. 448–455, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002.
- [82] C. Redon, V. C. Li, C. Wu, H. Hoshiro, T. Saito, and A. Ogawa, “Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 6, pp. 399–406, 2001, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:6(399).
- [83] V. C. Li, C. Wu, S. Wang, A. Ogawa, and T. Saito, “Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC),” *ACI Mater. J.*, vol. 99, no. 5, pp. 463–472, 2002, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0036767230&partnerID=40&md5=241b9eb0215ca919c93679653a6baed4>.
- [84] J. Claramunt, R. Dias, and T. Filho, “Cellulosic fiber reinforced cement-based composites : A review of recent,” vol. 79, pp. 115–128, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.
- [85] Z. N. Azwa, B. F. Yousif, A. C. Manalo, and W. Karunasena, “A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres,” *Mater. Des.*, vol. 47, pp. 424–442, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.11.025.
- [86] R. Chen, S. Ahmari, and L. Zhang, “Utilization of sweet sorghum fiber to reinforce fly ash-based geopolymer,” pp. 2548–2558, 2014, doi: 10.1007/s10853-013-7950-0.
- [87] M. M. Al-mashhadani, O. Canpolat, Y. Aygörmez, M. Uysal, and S. Erdem, “Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 505–513, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.061.
- [88] L. N. Assi, E. Eddie Deaver, and P. Ziehl, “Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 372–380, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193.
- [89] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, “Alkali-activated fly ashes: A cement for the future,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- [90] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasit, “Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 3, pp. 236–240, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.09.002.
- [91] E. Vasconcelos, S. Fernandes, B. De Aguiar, and F. Pacheco-Torgal, “Concrete retrofitting using CFRP and geopolymer mortars,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 730–732, pp. 427–432, 2013, doi:

- 10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.427.
- [92] C. a. Strydom and J. C. Swanepoel, "Utilisation of fly ash in a geopolymeric material," *Appl. Geochemistry*, vol. 17, no. 8, pp. 1143–1148, 2002.
- [93] G. Lavanya and J. Jegan, "Durability Study on High Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/731056.
- [94] T. Bakharev, "Resistance of geopolymer materials to acid attack," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 658–670, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.
- [95] D. W. Law, A. A. Adam, T. K. Molyneaux, I. Patnaikuni, and A. Wardhono, "Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 3, pp. 721–731, 2014, doi: 10.1617/s11527-014-0268-9.
- [96] H. J. Zhuang, H. Y. Zhang, and H. Xu, "Resistance of geopolymer mortar to acid and chloride attacks," *Procedia Eng.*, vol. 210, pp. 126–131, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.11.057.
- [97] O. F. Nnaemeka and N. B. Singh, "Durability properties of geopolymer concrete made from fly ash in presence of Kaolin," *Mater. Today Proc.*, vol. 29, pp. 781–784, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.696.
- [98] C. Tennakoon, A. Shayan, J. G. Sanjayan, and A. Xu, "Chloride ingress and steel corrosion in geopolymer concrete based on long term tests," *Mater. Des.*, vol. 116, pp. 287–299, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.030.
- [99] C. Gunasekara, D. W. Law, and S. Setunge, "Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 352–362, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.121.
- [100] W. H. Lee, J. H. Wang, Y. C. Ding, and T. W. Cheng, "A study on the characteristics and microstructures of GGBS/FA based geopolymer paste and concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 807–813, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.291.
- [101] K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, and A. Taylor, "Drying shrinkage and creep performance of geopolymer concrete," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–42, Mar. 2013, doi: 10.1080/21650373.2013.764963.
- [102] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, and H. Wang, "Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 97–105, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013.
- [103] D. L. Y. Kong, J. G. Sanjayan, and K. Sagoe-Crentsil, "Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 12, pp. 1583–1589, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.08.021.
- [104] R. L'Hermite, *What do we know about plastic deformation and creep of concrete?* Waterways Experiment Station, 1960.
- [105] C. Hua, *Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante*, no. OA15. 1995.
- [106] R. Le Roy, R. L. E. Roy, and P. Acker, "Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances," 2010.
- [107] A. Sprince, T. Kozlovskis, R. Gailītis, L. Radaņa, and L. Pakraštīņš, "Paņēmiens betonu un cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai dažādos sprieguma stāvokļos," 15659B, 2023.
- [108] W. Liu, H. Zhou, S. Zhang, and S. Jiang, "Constitutive model of concrete creep damage considering the deterioration of creep parameters," *Constr. Build. Mater.*, vol. 308, no. October, p. 125047, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125047.
- [109] Z. P. Bazant, M. H. Hubler, and Q. Yu, "Excessive Creep Deflection: An Awakening," *Concr. Int.*, vol. 33, no. 8, pp. 44–46, 2011.
- [110] J. M. Torrenti and R. Le Roy, "Analysis of some basic creep tests on concrete and their implications for modeling," *Struct. Concr.*, vol. 19, no. 2, pp. 483–488, 2018, doi: 10.1002/suco.201600197.
- [111] J. Baronet, L. Sorelli, J. P. Charron, M. Vandamme, and J. Sanahuja, "A two-scale method to rapidly characterize the logarithmic basic creep of concrete by coupling microindentation and uniaxial compression creep test," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 125, no. November 2019, p. 104274, 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104274.
- [112] S. A. Altoubat and D. A. Lange, "The Pickett effect at early age and experiment separating its mechanisms in tension," *Mater. Struct.*, vol. 35, no. 4, pp. 211–218, 2002, doi: 10.1007/BF02533082.
- [113] J. Sanahuja and L. Dormieux, "Creep of a C-S-H gel: A micromechanical approach," *An. Acad. Bras. Cienc.*, vol. 82, no. 1, pp. 25–41, 2010, doi: 10.1590/s0001-37652010000100004.
- [114] L. Dormieux, J. Sanahuja, and S. Maghous, "Influence of capillary effects on strength of non-saturated porous media," *Comptes Rendus - Mec.*, vol. 334, no. 1, pp. 19–24, 2006, doi: 10.1016/j.crme.2005.11.004.
- [115] S. Liang and Y. Wei, "Methodology of obtaining intrinsic creep property of concrete by flexural deflection

- test,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 97, no. April 2018, pp. 288–299, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.01.003.
- [116] Y. Zhao *et al.*, “Creep Behavior of Intact and Cracked Limestone Under Multi-Level Loading and Unloading Cycles,” *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 50, no. 6, pp. 1409–1424, 2017, doi: 10.1007/s00603-017-1187-1.
- [117] L. Li, A. G. P. Dabarera, and V. Dao, “Basic tensile creep of concrete with and without superabsorbent polymers at early ages,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 320, no. July 2020, p. 126180, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126180.
- [118] R. I. Gilbert and G. Ranzi, *Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures*. 2010. doi: 10.1201/9781482288711.
- [119] Z. Q. Cheng, R. Zhao, Y. Yuan, F. Li, A. Castel, and T. Xu, “Ageing coefficient for early age tensile creep of blended slag and low calcium fly ash geopolymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 119855, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119855.
- [120] K. Kovler, S. Igarashi, and A. Bentur, “Tensile creep behavior of high strength concretes at early ages,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 32, no. 219, pp. 383–387, 1999, doi: 10.1007/bf02479631.
- [121] S. A. Altoubat and D. A. Lange, “Tensile basic creep: Measurements and behavior at early age,” *ACI Mater. J.*, vol. 98, no. 5, pp. 386–393, 2001, doi: 10.14359/10728.
- [122] A. B. Hossain and J. Weiss, “Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 5, pp. 531–540, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00069-6.
- [123] P. Rossi, J. L. Tailhan, and F. Le Maou, “Comparison of concrete creep in tension and in compression: Influence of concrete age at loading and drying conditions,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 51, pp. 78–84, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.04.001.
- [124] D. S. Atrushi, “Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete : Testing and Modelling,” *Sci. Technol.*, no. 3377, p. 314, 2003.
- [125] I. Khan, T. Xu, A. Castel, and R. I. Gilbert, “Early-age tensile creep and shrinkage-induced cracking in internally restrained concrete members,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 71, no. 22, pp. 1167–1179, 2019, doi: 10.1680/jmacr.18.00038.
- [126] C. H. Un, J. G. Sanjayan, R. San Nicolas, and J. S. J. Van Deventer, “Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 10–19, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.030.
- [127] M. T. Junaid, A. Elbana, and S. Altoubat, “Flexural response of geopolymer and fiber reinforced geopolymer concrete beams reinforced with GFRP bars and strengthened using CFRP sheets,” *Structures*, vol. 24, no. January, pp. 666–677, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.02.003.
- [128] R. J. Thomas, D. Lezama, and S. Peethamparan, “On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 91, pp. 13–23, 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.10.003.
- [129] B. Zhang, H. Zhu, Y. Cheng, G. F. Huscien, and K. W. Shah, “Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 318, no. November 2021, p. 125993, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125993.
- [130] M. N. Amin, J. S. Kim, T. T. Dat, and J. K. Kim, “Improving test methods to measure early age autogenous shrinkage in concrete based on air cooling,” *IES J. Part A Civ. Struct. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 244–256, 2010, doi: 10.1080/19373260.2010.522314.
- [131] Z. Abdollahnejad, M. Mastali, B. Woof, and M. Illikainen, “High strength fiber reinforced one-part alkali activated slag/fly ash binders with ceramic aggregates: Microscopic analysis, mechanical properties, drying shrinkage, and freeze-thaw resistance,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, p. 118129, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118129.
- [132] D. P. Bentz, “A review of early-age properties of cement-based materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 196–204, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.005.
- [133] H. Ye and A. Radlińska, “A Review and Comparative Study of Existing Shrinkage Prediction Models for Portland and Non-Portland Cementitious Materials,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, pp. 10–14, 2016, doi: 10.1155/2016/2418219.
- [134] C. Song, Y. C. Choi, and S. Choi, “Effect of internal curing by superabsorbent polymers – Internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 123, pp. 198–206, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.007.
- [135] Z. Y. Qu, Q. Yu, Y. D. Ji, F. Gauvin, and I. K. Voets, “Mitigating shrinkage of alkali activated slag with biofilm,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 138, no. September, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106234.

- [136] E. Adesanya, A. Aladejare, A. Adediran, A. Lawal, and M. Illikainen, "Predicting shrinkage of alkali-activated blast furnace-fly ash mortars using artificial neural network (ANN)," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 124, no. August, p. 104265, 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104265.
- [137] S. K. Nath and S. Kumar, "Reaction kinetics of fly ash geopolymerization: Role of particle size controlled by using ball mill," *Adv. Powder Technol.*, vol. 30, no. 5, pp. 1079–1088, 2019, doi: 10.1016/j.apt.2019.03.003.
- [138] S. K. Nath and S. Kumar, "Role of alkali concentration on reaction kinetics of fly ash geopolymerization," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 505, no. September 2018, pp. 241–251, 2019, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2018.11.007.
- [139] Y. Ling, K. Wang, X. Wang, and S. Hua, "Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 116763, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116763.
- [140] Z. Xie and Y. Xi, "Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 9, pp. 1245–1249, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00571-3.
- [141] M. Criado, A. Palomo, and A. Fernández-Jiménez, "Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products," *Fuel*, vol. 84, no. 16, pp. 2048–2054, 2005, doi: 10.1016/j.fuel.2005.03.030.
- [142] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [143] V. D. Glukhovskiy, G. S. Rostovskaja, and G. V. Rumyna, "High strength slag-alkaline cements," in *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*, 1980, vol. 3, pp. 164–168.
- [144] J. Davidovits, "Geopolymer chemistry and properties," in *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer*, 1988, vol. 88, pp. 25–48.
- [145] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, and L. Lorenzen, "Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash," *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 283–291, 1998, doi: 10.1007/s11663-998-0032-z.
- [146] A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, "Alkali-activated fly ashes: properties and characteristics," in *11th International Congress on the Chemistry of Cement (Durban, South Africa)*, 2003, vol. 3, pp. 1332–1340.
- [147] J. Davidovits, "Properties of geopolymer cements," in *First international conference on alkaline cements and concretes*, 1994, vol. 1, pp. 131–149.
- [148] X. Y. Zhuang *et al.*, "Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications," *J. Clean. Prod.*, vol. 125, pp. 253–267, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.019.
- [149] Y. Ma, J. Hu, and G. Ye, "The pore structure and permeability of alkali activated fly ash," *Fuel*, vol. 104, pp. 771–780, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.05.034.
- [150] M. Yang, S. R. Paudel, and E. Asa, "Comparison of pore structure in alkali activated fly ash geopolymer and ordinary concrete due to alkali-silica reaction using micro-computed tomography," *Constr. Build. Mater.*, vol. 236, p. 117524, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117524.
- [151] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, and M. Criado, "Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1204–1209, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.08.021.
- [152] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. Van Deventer, "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, 2005, doi: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060.
- [153] Sindhunata, J. L. Provis, G. C. Lukey, H. Xu, and J. S. J. Van Deventer, "Structural evolution of fly ash based geopolymers in alkaline environments," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, no. 9, pp. 2991–2999, 2008, doi: 10.1021/ie0707671.
- [154] G. Fang and M. Zhang, "The evolution of interfacial transition zone in alkali-activated fly ash-slag concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 129, no. December 2019, p. 105963, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105963.
- [155] P. Steins *et al.*, "Effect of aging and alkali activator on the porous structure of a geopolymer," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 47, no. 1, pp. 316–324, 2014, doi: 10.1107/S160057671303197X.
- [156] F. Andreola, C. Leonelli, M. Romagnoli, and P. Miselli, "Techniques used to determine porosity," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, vol. 79, no. 7, pp. 49–52, 2000.
- [157] R. Gailitis, A. Sprince, and L. Pakraštīš, "Paņēmiens ārējo iedarbju ietekmes noteikšanai uz betonu un cementa kompozītmateriālu mikrostruktūru dažādos sprieguma stāvokļos/ Technique for Outside Effect Determination on Concrete and Cement Composite Microstructure in Various Stress-Strain States," LVP2023000039, 2023.
- [158] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J. S. Dolado, A. Rico, and J. Rodríguez, "A model for the C-A-S-H gel

- formed in alkali-activated slag cements,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 31, no. 12, pp. 2043–2056, 2011, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036.
- [159] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, and D. E. MacPhee, “Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 9, pp. 923–931, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.05.006.
- [160] J. S. J. van Deventer, R. S. Nicolas, I. Ismail, S. A. Bernal, D. G. Brice, and J. L. Provis, “Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization,” *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 116–128, 2014, doi: 10.1080/21650373.2014.979265.
- [161] F. Collins and J. G. Sanjayan, “Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 9, pp. 1401–1406, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00327-6.
- [162] E. J. Garboczi, “Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: A critical review,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, no. 4, pp. 591–601, 1990, doi: 10.1016/0008-8846(90)90101-3.
- [163] T. Häkkinen, “The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete Part 1 Microstructural studies and basic mechanical properties,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 407–421, 1993, doi: 10.1016/0008-8846(93)90106-J.
- [164] S. K. Das *et al.*, “Fresh, strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash,” *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. September, p. 101780, 2020, doi: 10.1016/j.jobte.2020.101780.
- [165] C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, C. Suksiripattanapong, and A. Udomchai, “Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 127–128, pp. 134–142, 2016, doi: 10.1016/j.clay.2016.04.005.
- [166] N. Cristelo, S. Glendinning, and A. T. Pinto, “Deep soft soil improvement by alkaline activation,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Gr. Improv.*, vol. 164, no. 2, pp. 73–82, 2011, doi: 10.1680/grim.900032.
- [167] L. Zhang, S. Ahmari, and J. Zhang, “Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 9, pp. 3773–3781, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.005.
- [168] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, and M. Tao, “Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1468–1478, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017.
- [169] M. Nawaz, A. Heitor, and M. Sivakumar, “Geopolymers in construction - recent developments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 120472, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120472.
- [170] “World’s first public building with structural Geopolymer Concrete – Geopolymer Institute.” <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/> (accessed Jan. 24, 2022).
- [171] A. L. Almutairi, B. A. Tayeh, A. Adesina, H. F. Isleem, and A. M. Zeyad, “Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. August, p. e00733, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00733.
- [172] J. T. Gourley, “Geopolymers in Australia,” *J. Aust. Ceram. Soc.*, vol. 50, no. 1, pp. 102–110, 2014.
- [173] K. K. S. and R. R. Girish M. G., “Geopolymer Friendly Alternative Cement Paving Grade,” *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 7, p. 886, 2017, [Online]. Available: <http://http://www.iaeme.com/ijciyet/issues.asp?JType=IJCIET&VTtype=8&IType=7http://www.iaeme.com/IJCIET/issues>.
- [174] A. Hassan, M. Arif, and M. Shariq, “A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements- A clean technology option for sustainable development,” *J. Clean. Prod.*, vol. 245, p. 118762, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118762.
- [175] I. Ismail and S. A. Bernal, “Microstructural changes in alkali activated fly ash / slag geopolymers with sulfate exposure,” pp. 361–373, 2013, doi: 10.1617/s11527-012-9906-2.
- [176] A. Hasan, S. J. Foster, and A. Castel, “Development of high-density geopolymer concrete with steel furnace slag aggregate for coastal protection structures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 248, p. 118681, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118681.
- [177] F. Fan, Z. Liu, G. Xu, H. Peng, and C. S. Cai, “Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 66–81, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.023.
- [178] S. T., K. R. P.R., S. M., S. A., and J. R., “A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, no. September 2021, p. e00812, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00812.
- [179] Y. H. M. Amran, N. Farzadnia, and A. A. A. Ali, “Properties and applications of foamed concrete; A review,”

- Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 990–1005, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.
- [180] S. Zou *et al.*, “Experimental research on an innovative sawdust biomass-based insulation material for buildings,” *J. Clean. Prod.*, vol. 260, p. 121029, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121029.
- [181] S. H. Teh, T. Wiedmann, A. Castel, and J. de Burgh, “Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 152, pp. 312–320, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.122.
- [182] “# 24 False CO<sub>2</sub> Values Published in Scientific Papers – Geopolymer Institute.” <http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/false-co2-values-published-in-scientific-papers/> (accessed Feb. 03, 2022).
- [183] J. I. T. Garces, I. J. Dollente, A. B. Beltran, R. R. Tan, and M. A. B. Promentilla, “Life cycle assessment of self-healing geopolymer concrete,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 4, no. May, p. 100147, 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100147.
- [184] A. Mellado, C. Catalán, N. Bouzón, M. V. Borrachero, J. M. Monzó, and J. Payá, “Carbon footprint of geopolymeric mortar: Study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route,” *RSC Adv.*, vol. 4, no. 45, pp. 23846–23852, 2014, doi: 10.1039/c4ra03375b.
- [185] R. Bajpai, K. Choudhary, A. Srivastava, K. S. Sangwan, and M. Singh, “Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 254, p. 120147, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120147.



**Rihards Gailītis** dzimis 1992. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura (2017) un profesionālo maģistra (2018) grādu būvniecībā. Strādājis SIA "*Husvik*". Kopš 2019. gada ir RTU Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Būvkonstrukciju inženierzinātņu institūta pētnieks. Ir darba pieredze Latvijas Zinātnes padomes un Eiropas Reģionālā attīstības fonda projektos.