

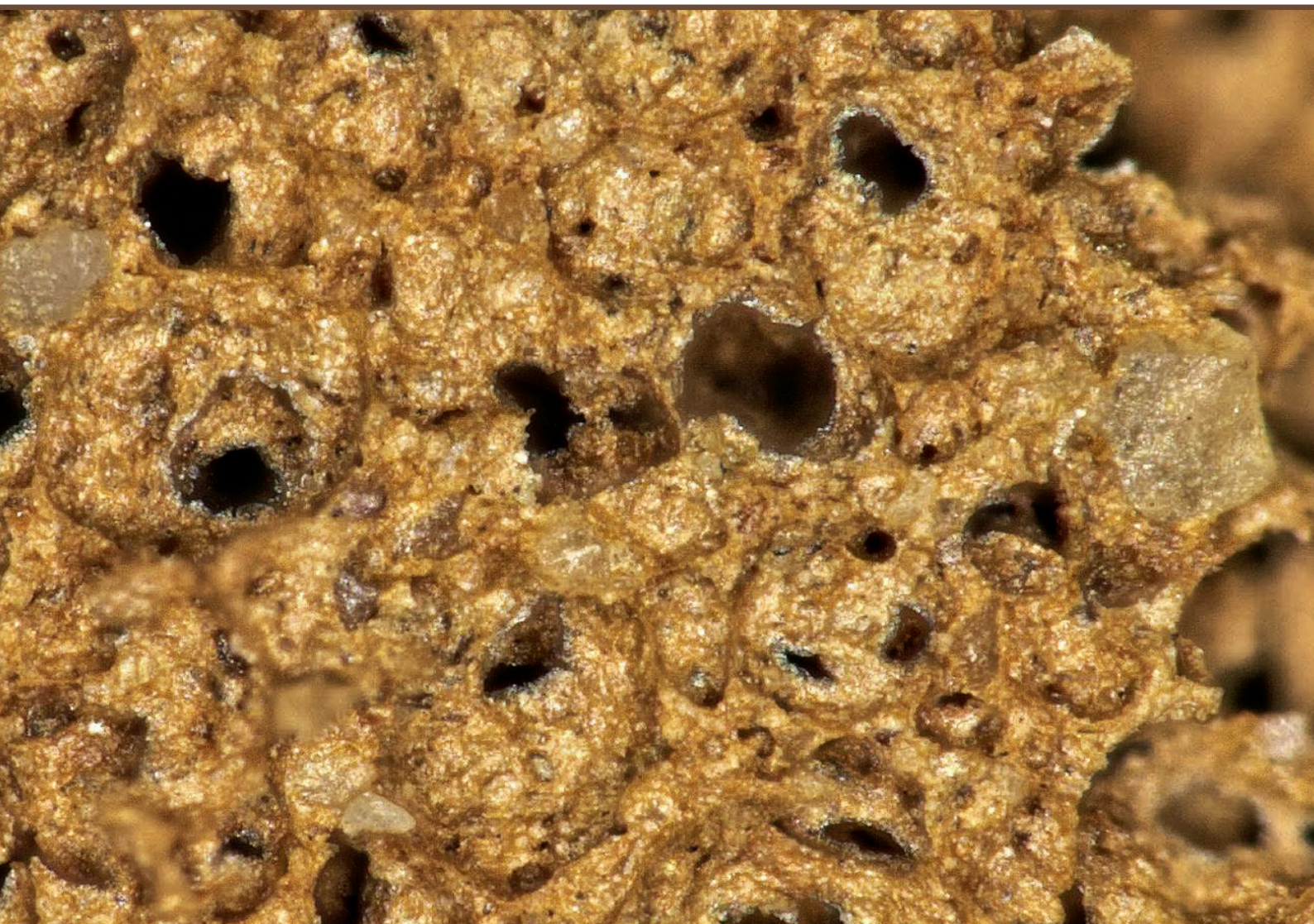


RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Andrejs Šiškins**

## **DAUDZFUNKCIONĀLU PORAINU MATERIĀLU IZSTRĀDE UZ MĀLU UN STIKLA ATKRITUMU BĀZES UN TO ĪPAŠĪBU IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte

Vispārīgās ķīmijas tehnoloģijas institūts

**Andrejs Šiškins**

Doktora studiju programmas “Ķīmijas tehnoloģija” doktorants

## DAUDZFUNKCIONĀLU PORAINU MATERIĀLU IZSTRĀDE UZ MĀLU UN STIKLA ATKRITUMU BĀZES UN TO ĪPAŠĪBU IZPĒTE

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. sc. ing.*  
JURIJS OZOLIŅŠ

profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
VIKTORS MIRONOVŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2021

Šiškins, A. Daudzfunkcionālu porainu materiālu izstrāde uz mālu un stikla atkritumu bāzes un to īpašību izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 39 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes “RTU P-01” 2021. gada 19. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 04030-9.1/21.

<https://doi.org/10.7250/9789934226335>

ISBN 978-9934-22-633-5 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 29. jūnijā plkst. 14.00 tiešsaistē <https://rtucloud1.zoom.us/j/9352086644>.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks *Dr. habil. sc. ing.* Visvaldis Švinka,  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesore *Dr. Danutė Vaičiukynienė*,  
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. ing. Paolo Colombo*,  
Padujas Universitāte, Itālija

## 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.

Andrejs Šiškins ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 79 attēli, 23 tabulas, kopā 126 lappuses. Literatūras sarakstā ir 216 atsauces uz literatūras avotiem.

## PATEICĪBAS

Sirsnīga pateicība maniem zinātniskajiem vadītājiem – vadošajam pētniekam *Dr. habil. sc. ing.* Viktoram Mironovam un profesoram *Dr. sc. ing.* Juriyam Ozoliņam par nemitīgi sniegto atbalstu, palīdzību un pacietību!

Visdziļākā pateicība profesoram *Dr. habil. sc. ing.* Gundaram Mežinskim un *Dr. sc. ing.* Gaidai Sedmalei no RTU Silikātu materiālu institūta par maģistrantūras laikā sniegtajām zināšanām keramikas tehnoloģijās, kā arī par iedvesmu veikt turpmākos pētījumus mālu keramikas nozarē!

Esmu pateicīgs visiem maniem Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes Vispārīgās ķīmijas tehnoloģijas institūta, kā arī Rūdolfā Cimdiņa Rīgas Biomateriālu inovāciju un attīstības centra kolēģiem, jo īpaši pētniekam *Ph. D.* Kristapam Rubenim un zinātniskajai asistentei *Mg. sc. ing.* Valentīnai Stepanovai par atbalstu ar tādu eksperimentu un testu veikšanu, bez kuriem šī darba tapšana nebūtu iespējama, kā arī *Dr. phil.* Jānim Baroniņam un *Dr. phil.* Marai Plotniecei par padomiem un atbalstu promocijas darba pilnveidošanā.

Pateicības vārdi arī RTU Materiālu un konstrukciju institūta Būvmateriālu un būvizstrādājumu katedras zinātniskajiem darbiniekiem, jo īpaši *Dr. sc. ing.* Aleksandram Korjakinam, *Dr. sc. ing.* Diānai Bajārei un *Dr. sc. ing.* Ģirtam Būmanim par sadarbību un tehnisko atbalstu celtniecības bloku izgatavošanā un testēšanā.

Paldies arī *Dr. phil. Gaurav Goel* no Lielbritānijas, *Dr. phil.* Igoram Štubņam un *Dr. phil. Stefan Csaki* no Slovākijas, kā arī *Dr. phil. Aguedal Hakim* no Alžīrijas par mana promocijas darba posmu starptautisko vadīšanu, kā rezultātā ir tapušas vairākas kopīgas publikācijas, kas palīdzēja veicināt starptautisko interesi par manu zinātnisko darbību!

Un, protams, mana mūžīgā un visdziļākā pateicība manai ģimenei par dāvāto mīlestību, pacietību un beznosacījumu atbalstu ilgajā darba tapšanas laikā.

# SATURS

PATEICĪBAS.....	4
SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	6
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	7
Ievads.....	7
Promocijas darba mērķis un uzdevumi.....	7
Darba zinātniskā nozīme un novitāte .....	8
Darba praktiskā nozīme .....	8
Aizstāvamās tēzes.....	8
Darba aprobācija un publikācijas .....	9
1. LITERATŪRAS APSKATA KOPSAVILKUMS.....	11
2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA.....	13
3. EKSPERIMENTU REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS .....	15
3.1. Stikla piedevas iedarbība uz mālu keramikas īpašībām .....	15
3.1.1. Sagatavotās mālu-stikla šihtas granulometriskais sastāvs .....	15
3.1.2. Iegūtās mālu-stikla keramikas struktūra un īpašības .....	15
3.2. Keramikas dobo granulu (KDG) iegūšana un īpašības .....	18
3.3. Augsti porainas stiklu saturošas mālu putu keramikas (MPK) iegūšana un īpašības.....	21
3.3.1. MPK fizikāli mehāniskās īpašības .....	21
3.3.2. MPK sorbciju īpašību pētījumi .....	23
3.3.3. MPK izmantošana celtniecības bloku siltumizolācijas īpašību uzlabošanai .....	27
3.4. Granulētā putu mālu-stikla keramika (PKG).....	28
3.4.1. Putu keramikas granulu iegūšana un īpašības.....	28
3.4.2. Naftas produktu saistīšana ar PKG .....	29
3.4.3. PKG izmantošana augsnes mitruma uzturēšanai .....	31
3.5. Porainas keramikas izstrādājumu ražošanas tehnoloģiskā shēma .....	31
3.5.1. Izejvielu sasmalcināšana un šihtas sagatavošanas shēma .....	31
3.5.2. KDG izgatavošana .....	32
3.5.3. PKG izgatavošana.....	33
3.5.4. MPK bloka izgatavošana .....	34
SECINĀJUMI.....	36
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	37

## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

BET	– Brunauera–Emmeta–Teller metode, slāpekļa adsorbcijas porozimetrija
BTB	– krāsviela <i>Bezaktiv turquoise blue V-G</i>
$D_{50}$	– vidējais daļiņu izmērs pirms smalcināšanas, kura kumulatīvais daļiņu izmēru sadalījums ir 50 %
$d_{50}$	– vidējais daļiņu izmērs pēc smalcināšanas, kura kumulatīvais daļiņu izmēru sadalījums ir 50 %
KDG	– keramikas dobās granulas
KDG-B	– keramikas dobo granulu-betona bloks
KER-B	– keramzīta-betona bloks
MA	– modeļaugšne
MPK	– mālu putu keramika
PPS	– putu polistirols
PKG	– putu keramikas granulas
$\text{pH}_{\text{NLP}}$	– nulles lādiņa punkts
$R^2$	– determinācijas koeficients
SEM	– skenējošais elektronu mikroskops
UV-VIS	– ultravioletās-redzamās gaismas spektrofotometrija
XRD	– rentgenstaru difrakcija

# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Ievads

Zemes dzīļu resursi ir Latvijas nacionālā bagātība, tāpat kā meži, iekšzemes un pazemes ūdeņi, lauksaimniecības zemes u. c. Tādi Latvijā plaši sastopamie derīgie izrakteņi kā kūdra, dolomīts, māli ir ļoti perspektīvi inovatīvai izmantošanai [1].

Mālus visplašāk izmanto visdažādāko keramisko materiālu un izstrādājumu iegūšanai ar dažādu konstruktīvo uzdevumu (nesošās konstrukcijas, jumta segumi, ugunsdrošie materiāli, siltumizolācijas materiāli u. c). Pēc drumstalas struktūras keramiskie materiāli var būt blīvi vai poraini. Neskatoties uz to, ka māli ir ļoti plaši pētīti, nepārtraukti notiek darbs un tiek veikti pētījumi par to izmantošanu jaunu produktu ražošanai.

Cilvēku nekontrolētās darbības rezultātā rodas ekoloģiskas problēmas, kurām mūsdienās jau ir globāls raksturs. Attīstoties un intensificējoties tehnoloģijām, strauji pieaug izgāztuvēs deponētie tehnogēnie un cietie sadzīves atkritumi. Turklāt lielu daļu no tiem varētu izmantot atkārtoti. Viena no cieto sadzīves atkritumu komponentēm, kas negatīvi ietekmē apkārtējo vidi, ir stikla tara un stikla lauskas, kuru atkārtotai pārstrādei Latvijā nav pievērsta pietiekama uzmanība. Tajā pašā laikā attīstītajās Eiropas valstīs atkārtoti pārstrādā vairāk nekā 80 % stikla: Vācijā – >83 %, Norvēģijā – >91 %, Beļģijā, Zviedrijā – >94 %, Šveicē – >96 % [2]. Tas ļauj vienlaikus risināt gan ekoloģiskās, gan sociālās, gan enerģijas ekonomijas problēmas. Izmantojot otrreizējo stiklu produktu ražošanai, katri 10 % otrreizēja stikla no kopējās izejvielu masas samazina enerģijas patēriņu ražošanas vajadzībām par 2–3 %. Papildu ekonomiskā efektivitāte ir paredzama, samazinot ekoloģiskos zaudējumus vides piesārņošanas rezultātā. Šķīrotas stikla lauskas galvenokārt izmanto otrreizējai stikla taras izgatavošanai, celtniecības materiālu, putu-stikla, siltumizolācijas un filtrējošo materiālu ražošanai u. c. Viens no perspektīvajiem virzieniem stikla atkritumu izmantošanai varētu būt to utilizācija mālu keramikas izstrādājumos.

Promocijas darbā pētīta stikla piedevu ietekme uz mālu keramikas īpašībām ar mērķi radīt jaunus daudzfunkcionālus porainas mālu keramikas materiālus, vienlaikus samazinot enerģijas patēriņu to ražošanai.

## Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt porainas keramikas materiālus uz Latvijas mālu un sadzīves atkritumu – stikla lausku – bāzes un to iegūšanas tehnoloģiju. Pētīt iegūto keramikas materiālu īpašības, kā arī to praktiskās izmantošanas iespējas.

### Atbilstoši darba mērķim ir definēti vairāki uzdevumi:

- 1) apkopot un analizēt literatūras datus par Latvijas māliem, porainas keramikas iegūšanas metodēm, tās lietošanu, tai skaitā sorbcijas procesiem;
- 2) izvērtēt stikla piedevu un termiskās apstrādes temperatūras ietekmi uz mālu keramikas īpašībām;



- 3) izstrādāt metodi keramisko dobo granulu iegūšanai, aprakstīt to īpašības un lietojumu;
- 4) izstrādāt metodi putu keramikas iegūšanai (tajā skaitā granulētās putu keramikas) ar tiešu uzpūšanas metodi un pētīt tās īpašības un lietojumu;
- 5) pētīt putu keramikas adsorbcijas īpašības attiecībā pret tekstila krāsvielām ar mērķi izmantot to kā sorbentu notekūdeņu attīrīšanā;
- 6) izstrādāt iespējamo tehnoloģisko shēmu keramisko dobo granulu, mālu putu keramikas un putu keramikas granulu rūpnieciskai iegūšanai.

### **Darba zinātniskā nozīme un novitāte**

Sistemātiski pētīta sasmalcināta stikla piedevu (5–15 masas %) ietekme uz mālu-stikla keramikas īpašībām, kas iegūta relatīvi zemā apdedzināšanas temperatūras intervālā no 700 °C līdz 1150 °C.

Pirmo reizi izstrādāts tehnoloģisks risinājums porainas mālu-stikla keramikas iegūšanai dobo granulu veidā, izmantojot izdegošā šablona metodi, kā arī putu mālu-stikla keramikas iegūšanai, izmantojot tiešo uzpūšanas metodi.

Pirmo reizi pētīta tekstila krāsvielu un naftas produktu adsorbcija uz putu mālu-stikla keramikas. Darbā analizētas sorbcijas kinētika un sorbcijas izoterma, noteikti iespējamie sorbcijas procesa mehānismi.

### **Darba praktiskā nozīme**

Piedāvātas jaunas metodes un receptūras porainas mālu keramikas, kas satur utilizējamus sadzīves atkritumus – stikla lauskas, iegūšanai pazeminātās (800–900 °C) temperatūrās.

Parādīta iespēja iegūt porainu mālu-stikla keramiku dobu granulu veidā, izmantojot rotācijas cilindrisko granulātoru un izdegošā šablona metodi, kā arī tiešas uzpūšanas metodi rotācijas tipa dispergatorā-kavitatorā.

Parādīta iespēja izmantot iegūtās keramikas dobās sfēras (Latvijas Republikas patents Nr. LV 14822 B) vieglu celtniecības bloku ar palielinātu mehānisko izturību ražošanai. Putu mālu-stikla keramika granulu vai bloku veidā var tikt izmantota kā sorbents tekstila krāsvielu un naftas produktu saistīšanai, piedāvāts izmantot to arī keramisko celtniecības bloku *Keraterm* siltumizolācijas īpašību uzlabošanai (Latvijas Republikas patents Nr. LV 15188 B).

### **Aizstāvamās tēzes**

Cietos sadzīves atkritumus – stikla lauskas – var izmantot mālu-stikla keramikas ar uzlabotām īpašībām iegūšanai zemākās apdedzināšanas temperatūrās, tādējādi risinot arī ekoloģiskās problēmas.

Porainu mālu-stikla keramiku iespējams iegūt dobu granulu veidā, izmantojot rotācijas granulācijas un izdegošā šablona metodes, kā arī putu veidā, izmantojot tiešo uzpūšanas metodi rotācijas tipa dispergatorā-kavitatorā.

Putu mālu keramika var raksturoties ar paaugstinātu tekstila krāsvielu un naftas produktu sorbcijas spēju.

## Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba zinātniskie sasniegumi un galvenie rezultāti atspoguļoti četrās pilna teksta zinātniskajās publikācijās, par tiem ziņots starptautiskās zinātniskās konferencēs (deviņas recenzētas zinātnisko konferenču tēzes). Ir iegūti divi Latvijas Republikas patenti.

### Zinātniskie raksti recenzējamās žurnālos (indeksēti *Scopus* datu bāzē)

1. **A. Shishkin**, J. Baronins, V. Mironovs, F. Lukáč, I. Štubňa, and J. Ozolins, “Influence of glass additions on illitic clay ceramics,” *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 3, pp. 1–15, Jan. 2020.
2. T. Húlan, I. Štubňa, **A. Shishkin**, J. Ozolins, Š. Csáki, P. Bačík and J. Fridrichová, “Development of Young’s modulus of natural illitic clay during heating and cooling stage of firing,” *Clay Miner.*, vol. 54, no. 2, pp. 1–25, Jul. 2019.
3. **A. Shishkin**, G. Bumanis, K. Irtiseva, J. Ozolins, and A. Korjakins, “Clay ceramic hollow sphere - cement syntactic foam composite for building applications,” *Key Eng. Mater.*, vol. 800, pp. 228–234, Apr. 2019.
4. **A. Shishkin**, A. Laksa, V. Shidlovska, Z. Timermane, H. Aguedal and V. Mironovs, “Illite clay ceramic hollow sphere – obtaining and properties,” *Key Eng. Mater.*, vol. 721, pp. 316–321, Dec. 2016.
5. **A. Shishkin**, H. Aguedal, J. Peculevica, D. Newport, G. Goel and J. Ozolins, “Influence of waste glass in the foaming process of open cell porous ceramic as filtration media for industrial wastewater,” *J. Clean. Prod.*, vol. 282, p. 124546, Feb. 2021.
6. **A. Shishkin**, G. Goel, J. Baronins, J. Ozolins, C. Hoskins, and S. Goel, “Using circular economy principles to recycle materials in guiding the design of a wet scrubber-reactor for indoor air disinfection from coronavirus and other pathogens”, *Environ. Technol. Innov.*, vol. 22, p. 101429, May 2021.

### Ziņojumi zinātniskajās konferencēs

1. **A. Šiškins**, “Valorization of glass and clay in the production of new multifunctional porous ceramics,” in *Materials Science and Applied Chemistry Conference*, 2019, p. 31. Okt. 2019., Rīga. Mutiskais ziņojums.
2. **A. Šiškins**, J. Peculeviča, H. Aguedal, J. Ozoliņš and V. Mironovs, “Production and properties of low-temperature glass-ceramic foam based on illie latvian clay,” in *Clays and Ceramics 2018*, 2018, pp. 42–43. Jan. 2018, Rīga. Mutiskais ziņojums.
3. **A. Shishkin**, A. Laksa, V. Shidlovska, Z. Timermane, H. Aguedal, V. Mironovs, and J. Ozolins, “Illite clay ceramic hollow sphere – obtaining and properties,” in *25th International Baltic Conference on Engineering Materials & Tribology*, 2016, p. 37. Nov. 2016, Rīga. Mutiskais ziņojums.

4. **A. Shishkin**, A. Korjakins and V. Lapkovskis, "Influence of the firing temperature on the illite clay ceramic foam with waste glass powder addition," in *25th International Baltic Conference on Engineering Materials & Tribology 2016*, p. 40, 2016, Nov. 2016, Rīga. Mutiskais ziņojums.
5. **A. Shishkin**, V. Mironovs, D. Goljandin, and A. Korjakins, "Influence of milled waste glass to clay ceramic foam properties made by direct foaming route," in *Proceedings of ICEMT 2016: 18th International Conference on Engineering Materials and Technology*, pp. 62–67, Jun. 2016, Rīga. Mutiskais ziņojums.
6. **A. Shishkin**, A. Laksa, **Z. Timermane**, V. Šidlovska, V. Mironovsa and J. Ozoliņš, "Ar kombinēto metodi iegūtu mālu keramikas porainu granulu sorbcijas pētījumi (in Latvian), Sorption study for porous clay ceramic pellets obtained with the combined method," in *International Interdisciplinary Symposium Clays and Ceramics*, p. 44, 2016. Jan. 2016, Rīga. Stenda referāts.
7. **A. Shishkin**, A. Laksa, **Z. Timermane**, **V. Šidlovska** and J. Ozoliņš, "Mālu dobo keramisko sfēru sorbcijas īpašību pētījumi (in Latvian), Sorption properties of clay ceramic hollow spheres," in *International Interdisciplinary Symposium Clays and Ceramics*, p. 45, 2016. Jan. 2016, Rīga. Stenda referāts.
8. **A. Shishkin**, A. Korjakins and V. Mironovs, "Using of cavitation disperser, for porous ceramic and concrete material preparation," in *ICEMT 2015: 17th International Conference on Engineering Materials and Technology*, pp. 734–737, 2015. Jun. 2015, Rīga. Mutiskais ziņojums.
9. **A. Shishkin**, V. Mironovs, J. Baronins, A. Laksa and J. Ozolinsh, "Clay ceramic hollow spheres: method of obtaining, properties, possible application", in *CellMAT 2014*, 2014, p. CD. Mutiskais ziņojums.

### Patenti

1. **A. Šiškins**, A. Korjakins, V. Mironovs and J. Ozoliņš, "Ekoloģisks augsti porains materiāls dobo mālu keramisko bloku siltumizolācijas īpašību uzlabošanai un tā iegūšanas paņēmiens," LV Patents 15188 B, 20.02.2017.
2. **A. Šiškins**, V. Mironovs, J. Baroniņš and J. Treijs, "Sorbenti ar feromagnētiskām īpašībām," LV Patents 14822 B, 20.03.2014.

# 1. LITERATŪRAS APSKATA KOPSAVILKUMS

Literatūras apskatā apkopota informācija par illīta tipa mālu pārvērtībām apdedzināšanas procesā, dažādu atkritumu izmantošanu mālu keramikā, kā arī dots īss apskats par smalcināšanas, granulēšanas, aglomerācijas un porainas keramikas iegūšanas tehnoloģijām.

Mālus ļoti plaši izmanto visdažādāko keramisko materiālu un tehnisko izstrādājumu ražošanai. Māli ir ļoti plaši pētīti, tajā pašā laikā pieaugošās prasības pret materiālu fizikālajām mehāniskām īpašībām, kā arī morfoloģiju ir veicinājušas strauju zinātnisko publikāciju skaita pieaugumu.

Pieaugot iedzīvotāju dzīves līmenim, attīstoties tehnoloģijām, izgāztuvēs deponētiem sadzīves un tehnoloģiskiem atkritumiem ir tendence strauji palielināties. Laikā no 1995. līdz 2015. gadam sadzīves atkritumu apjoms Eiropā kopumā ir palielinājies par 366 % [3], no kuriem 2014. gadā 15,7 miljonus tonnas radīja otrais komerciāli nozīmīgākais iepakojuma materiāls – stikls [4]. Virkne autoru [5]–[8] ir pētījuši šo augsti enerģētiskā materiāla iespēju utilizēt mālu keramikas izstrādājumos. Stikla klātbūtne apdedzinātā keramikā ļauj samazināt keramikas apdedzināšanas temperatūru, materiāla sarukumu un ūdens uzsūci [9]. Zemas apdedzināšanas temperatūras augsti porainas keramikas materiālu attīstīšana ir viens no veidiem, kā atbalstīt ES prasības pēc enerģijas patēriņa un CO<sub>2</sub> izmešu samazināšanas. Stikla utilizācija šādu materiālu izgatavošanā veicina otrreizējo materiālu izmantošanu, kas arī ir viens no būtiskākajiem ES ilgtermiņa attīstības mērķiem.

Stikla ražošanas apjomi pasaulē un Eiropā (1.1. tab.) nepārtraukti pieaug. Taras stikla izgatavošana ieņem pirmo vietu pēc īpatsvara (44,5 %) starp visa saražotā stikla izstrādājumiem Eiropā.

1.1. tabula

Stikla ražošana Eiropā pēc stikla tipa [10], tūkst. tonnas

Stikla veids	Gadi				
	2014	2015	2016	2017	2018
Taras stikls	20 146	20 319	21 025	21 537	21 755
Logu stikls ( <i>float glass</i> )	9284	9641	9835	10 665	10 643
Trauku un kristālu stikls	1050	1080	1181	1253	1337
Stikla šķiedra	658	677	702	700	808
Citi stikla veidi	975	1218	1178	1052	861

1.2. tabulā redzami literatūrā uzrādītie vidējie stikla sastāvi dažādiem stikla atkrituma veidiem, kas bija izmantoti keramikas modifikācijai, tai skaitā taras stiklam un jauktu sadzīves atkritumu stiklam. Kā redzams 1.2. tabulā, stikla atkritumu vidējais sastāvs mainās ne vairāk kā 1 % robežās, tāpēc var uzskatīt, ka stikla kā otrreizējās izejvielas sastāvs ir pietiekami patstāvīgs. Gadījumā, ja otrreizējā stikla piedevas no 5 masas % līdz 20 masas % izmanto mālu keramikas iegūšanai, stikla sastāva izmaiņas var izraisīt iegūto keramisko materiālu sastāva izmaiņas ne vairāk kā 0,2 % robežās. Līdz ar to taras stikla atkritumu izmantošana ir būtisks izejvielu resurss jaunu materiālu iegūšanai.

Taras stikla atkritumu vidējais ķīmiskais sastāvs

Stikls	Ķīmiskais sastāvs									Lit. avots
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Citi oksīdi	MZK	
Logu	71,1	1,40	0,83	10,6	14,2	0,3		Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -0,16	–	[11]
Taras zaļais	71,2	1,60	1,57	10,8	13,2	0,6	–	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -0,32 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,2	–	[12]
Taras caurspīdīgais	72,1	1,60	1,50	10,9	13,0	0,6	–	–	–	[12]
Taras brūnais	72,1	2,19	0,70	10,5	13,7	0,2	–	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -0,22 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,1	–	[12]
Dažādu pudeļu stikla maisījums	70,2	2,10	–	9,5	16,6	–	–	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -0,1	1,5	[13]

Tajā pašā laikā literatūrā praktiski nav pieejami sistemātiski pētījumi par stikla lausku utilizācijas iespējām Latvijas (illīta tipa bezkarbonāta) mālos, ražojot augsti porainas keramikas izstrādājumus. Iegūtās augsti porainas keramikas materiālus iespējams izmantot kā sorbentus ūdens attīrīšanas tehnoloģijās: vidē nonākušo naftas produktu saistīšanai no ūdens, celtniecības materiālos kā efektīvu siltuma izolācijas materiālu. Turklāt mālu izstrādājumu sorbcijas spēju var modificēt, mainot porainību, īpatnējo virsmu, piemērojot atšķirīgus termiskās apstrādes režīmus [14].

Augsti porainu keramiku ar tehnoloģiski vienkārši kontrolējamiem poru izmēriem var iegūt, izmantojot izdegošā šablona, replikācijas vai tiešās uzpuošanas metodi [15], [16]. Efektīva putu keramikas iegūšanas metode ir šlikera tiešā uzpuošana, to intensīvi maisot. Šim nolūkam var izmantot rotācijas tipa dispergatoru ar kavitācijas efektu, ko izraisa specifiska darba rata konstrukcija, kuras lineārais rotācijas ātrums ir robežās no 70 m·s<sup>-1</sup> līdz 80 m·s<sup>-1</sup> [17]. Iegūto putu materiāla stabilitāti būtiski ietekmē suspensijas sagatavošanā izmantoto pulverveida vielu homogenitāte. Izejvielu ar dažādu cietības pakāpi smalcināšanai un samaisīšanai var būt piemērots nepārtrauktās darbības dezintegrators [18], kas raksturojas ar līdz pat 10 reizes mazāku enerģijas patēriņu, salīdzinot, piemēram, ar bumbu dzirnavām. Iedzīvotāju skaita straujā pieauguma izraisītā prasība pēc lauksaimniecībā izmantojamā saldūdens taupīšanas rada pieprasījumu pēc augsnes mitrumu uzturošiem materiāliem, spējīgiem saistīt ievērojamu mitruma daudzumu. Kā šādi materiāli tiek piedāvāti perlīts, uzputotās malu granulas, kuru iegūšanai nepieciešama augsta (virs 1200 °C) apdedzināšanas temperatūra [19].

Porainas mālu keramikas materiāli ar samērā lielu īpatnējo virsmu, ilgmūžību dažādos termiskās un ķīmiskās iedarbības apstākļos, kā arī ar daudzos procesos pietiekamu mehānisko izturību, ir vērtējami kā augstas pievienotās vērtības plaša lietojuma materiāli.

Neskatoties uz plašo zinātniskās literatūras klāstu, kas veltīta mālu keramikas īpašībām, tai skaitā – augsti porainas mālu keramikas iegūšanai un izpētei, nav pieejami dati par veiktiem sistemātiskiem pētījumiem par stikla piedevu ietekmi uz illīta mālu keramiku, kas iegūta salīdzinoši zemās (700–1050 °C) apdedzināšanas temperatūrās.

## 2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

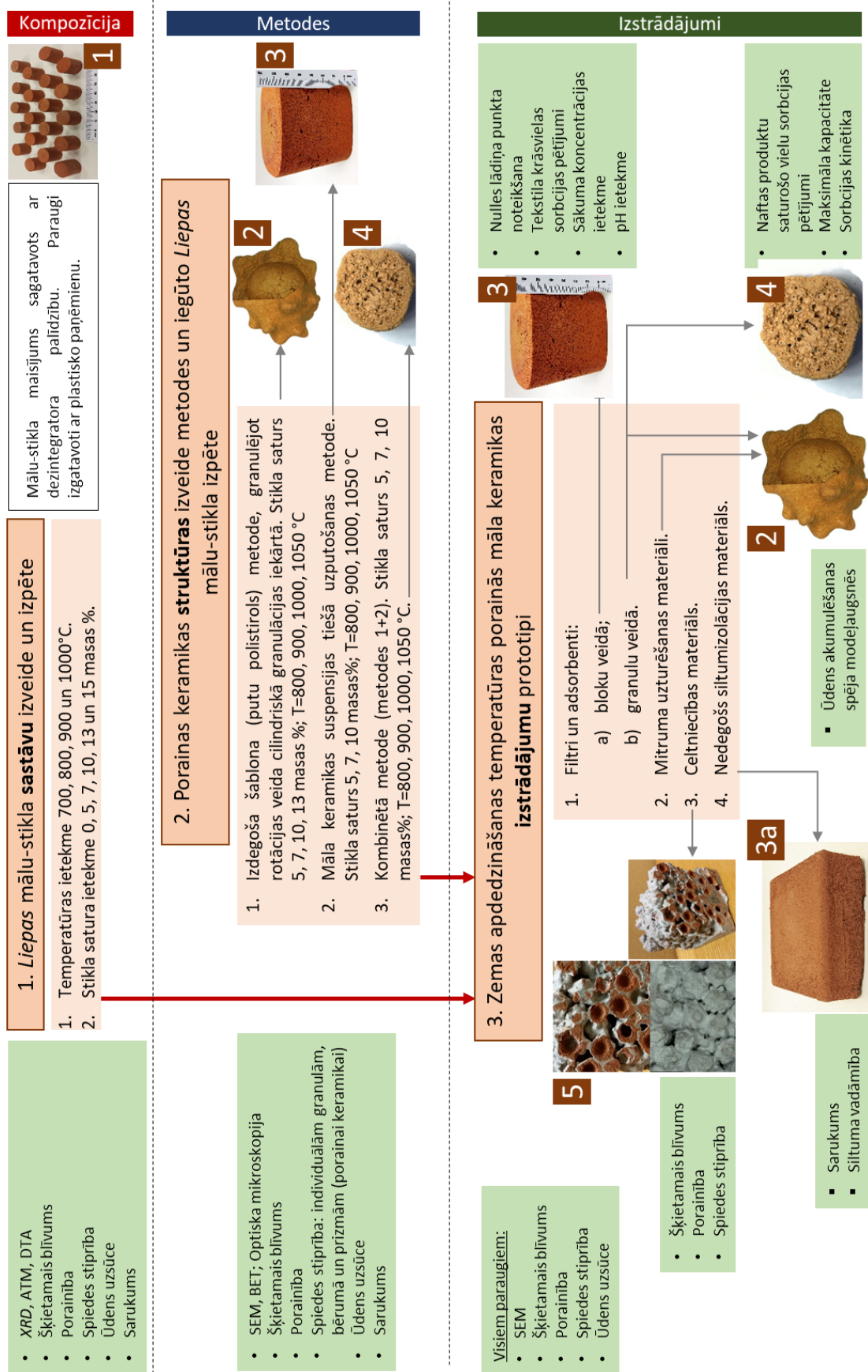
Promocijas darba pilna eksperimentālā gaita, izmantotās analīzes metodes un iegūtie rezultāti trijos pamata posmos shematiski parādīti 2.1. attēlā.

Pirmajā darba posmā tika iegūti sasmalcināti sarkanā *Liepas* mālu un pudeļu stikla (0 masas %, 5 masas %, 7 masas %, 10 masas %, 13 masas % un 15 masas %) paraugi. Materiāli tika gan analizēti DTA un DTG (no 20 °C līdz 1100 °C), gan tika pētīti ar pussausās masas presēšanas paņēmieni iegūti cilindriskas formas paraugi (2.1. att. 1) pēc apdedzināšanas pie dažādām temperatūrām intervālā no 700 °C līdz 1000 °C. Tālākajos pētījumos paraugi tika apdedzināti galvenokārt šajās temperatūrās.

Otrajā darba posmā tika pētītas un pilnveidotas izvēlētās porainas struktūras dažādu formu un sastāvu mālu kompozītu izgatavošanas metodes. Tika novērtētas arī mehāniskās īpašības vairākiem pētījumā iegūtiem materiāliem: 1) dažādas koncentrācijas stiklu saturošas KDG, iegūtas ar izdegošā šablona (putu polistirols) metodi (2.1. att. 2), izgatavošanai izmantojot rotācijas veida cilindrisku granulācijas iekārtu un apdedzinot 800 °C, 900 °C, 1000 °C un 1050 °C temperatūrā; 2) prizmas formā veidota MPK (2.1. att. 3), kas iegūta ar tiešo uzpūšanas metodi, izmantojot dispergatoru; 3) PKG, kas iegūtas, secīgi izmantojot iepriekš minētās tiešās uzpūšanas un granulācijas metodes (2.1. att. 4) un apdedzinātas 900 °C, 950 °C, 1000 °C un 1050 °C temperatūrā.

Trešajā darba posmā zemās apdedzināšanas temperatūrās tika izgatavoti un izpētīti mālu keramikas izstrādājumu prototipi: KDG izmantotas betona bloku izgatavošanai lietošanai būvniecībā (2.1. att. 5), MPK izmantotas celtniecības *Keraterm* bloku siltumizolācijas uzlabošanai (2.1. att. 3a), MPK paraugi pēc apdedzināšanas 900 °C temperatūrā tika izmantoti tekstila krāsvielu adsorbcijas eksperimentiem (2.1. att. 3). Ar kombinēto metodi iegūtās putu keramikas granulas (PKG) tika izmantotas naftas produktu saistīšanas spējas un ūdens akumulēšanas spējas noteikšanai. Visi eksperimenti tika atkārtoti vismaz trīs reizes.

Pētījumos izmantotas tādas instrumentālās analīzes metodes kā rentgenstaru difrakcija (XRD) (rentgendifraktometrs *Panalitical X'Pert PRO*), augsttemperatūras mikroskopija dilatometrija (augsttemperatūras mikroskops *EM201, HT163, Hesse instruments*), Brunauera–Emmeta–Tellerā (BET) metodes slāpekļa adsorbcijas porozimetrija (sorbtsometrs *Quadrosorb SI Kr ar Standart Autosorb degasser 5,11*), diferenciāli skenējošā kalorimetrija; ultravioletās-redzamās gaismas spektrofotometrija (*UV-VIS*) (spektrofotometrs *UV-VIS Evolution 300, Thermo scientific*), skenējošā elektronu mikroskopija (SEM) (lauka emisijas SEM *Tescan Mira/LMU*) un optiskā mikroskopija (digitālais optiskais mikroskops *Kyence VHX-1000* ar digitālo kameru un *VH-112 Z20R/Z20W* lēcu).



2.1. att. Keramikas materiālu iegūšanas un pētījumu izmantoto metožu plāns. Materiālu apzīmējumi: 1 – mālu-stikla kompozīti; 2 – KDG; 3, 3a – MPK; 4 – PKG; un 5 – KDG-B.

## 3. EKSPERIMENTU REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

### 3.1. Stikla piedevas iedarbība uz mālu keramikas īpašībām

Taras (Na-silikāta) stikla piedevas iedarbības uz mālu keramikas īpašībām noteikšanai sagatavotas keramikas masas ar dažādiem stikla piedevu saturiem (0–15 masas %), no kurām ar plastisko paņēmienu izgatavoti cilindriskas formas paraugi. Iegūtie paraugi tika žāvēti un secīgi apdedzināti 700 °C, 800 °C, 900 °C un 1000 °C temperatūrā.

#### 3.1.1. Sagatavotās mālu-stikla šīhtas granulometriskais sastāvs

Šajā darbā izmantota augstas intensitātes smalcināšanas iekārta – dezintegrators *DSL-175*. Tā ir nepārtrauktas darbības smalcināšanas iekārta, kuras darbības pamatā ir malšanai nepieciešamās enerģijas pārvešana uz materiālu triecienu veidā, vienlaikus nodrošinot smalcināmā materiāla relatīvi īsu uzturēšanās laika periodu dezintegratora darba kamerā. Pētītā viena cikla mālu smalcināšana dezintegratorā veido frakcijas ar smalcināšanas pakāpēm  $n = 71,4$  (~70 %) un  $n = 714,2$  (~30 %), iegūstot vidējo svērto smalcināšanas pakāpi  $n = 132,1$ , savukārt stikla lausku viena cikla smalcināšanas gadījumā  $n = 10$ . Mālu atkārtota smalcināšana izraisa smalkāko daļiņu īpatsvara palielināšanos no 30 % līdz 70 % un smalcināšanas pakāpes pieaugumu līdz  $n = 260$ , attiecīgi iegūstot divus dominējošos daļiņu izmērus – 0,035 mm un 0,0035 mm, kuru kumulatīvais daļiņu izmēru sadalījums ir 50 % ( $d_{50}$ ). Stikla atkārtotas smalcināšanas gadījumā iegūst relatīvi viendabīgu granulometriskā sastāva frakciju, smalcināšanas pakāpei palielinoties līdz  $n = 25$ , attiecīgi  $d_{50}$  samazinoties no 0,25 mm uz 0,10 mm. Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš atkārtotās smalcināšanas gadījumā palielinās no  $E_{tp} = 2,4 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$  (vienā ciklā) līdz  $E_{tp} = 6,8 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$  (divu ciklu gadījumā).

#### 3.1.2. Iegūtās mālu-stikla keramikas struktūra un īpašības

Diferenciālā termiskā analīze pētītajiem *Liepas* māliem uzrāda divus endotermiskos efektus temperatūras intervālos no 20 °C līdz 200 °C (mehāniski saistītā ūdens izdalīšanās) un no 500 °C līdz 750 °C (kristālhidrātu sadalīšanās). Eksotermiskais efekts temperatūras intervālā no 200 °C līdz 400 °C raksturo organisko piemaisījumu izdegšanu. Stikla satura palielināšana no 0 masas % līdz 15 masas % samazina visu novēroto efektu intensitāti, raksturojot iepriekš minēto savienojumu koncentrācijas mazināšanos, ko apliecina arī paralēli veiktie termogravimetrijas analīzes mērījumu rezultāti šiem pašiem paraugiem.

Stikla pievienošanas rezultātā diopsīda kristāliskā fāze veidojas zemākā (800 °C) apdedzināšanas temperatūrā ar lielāku koncentrāciju, salīdzinot ar paraugu bez stikla piedevas. Šo efektu var skaidrot ar diopsīda veidošanos pašā stiklā, kamēr diopsīda veidošanās no mālu minerāliem notiek 1000 °C temperatūrā (3.1 tab.). Pēc apdedzināšanas 900 °C un 1000 °C temperatūrā veidojas arī kristobalīta fāze, attiecīgi 3,5 % un 6,4 % attiecībā pret kopējo kristāliskās fāzes saturu. Pēc stikla pievienošanas špineļa veidošanās temperatūra samazinās no 1000 °C uz 900 °C (3.1 tab.).



Ar XRD noteiktās *Liepas* mālu, mālu-stikla keramikas un stikla fāžu sastāva izmaiņas atkarībā no apdedzināšanas temperatūras

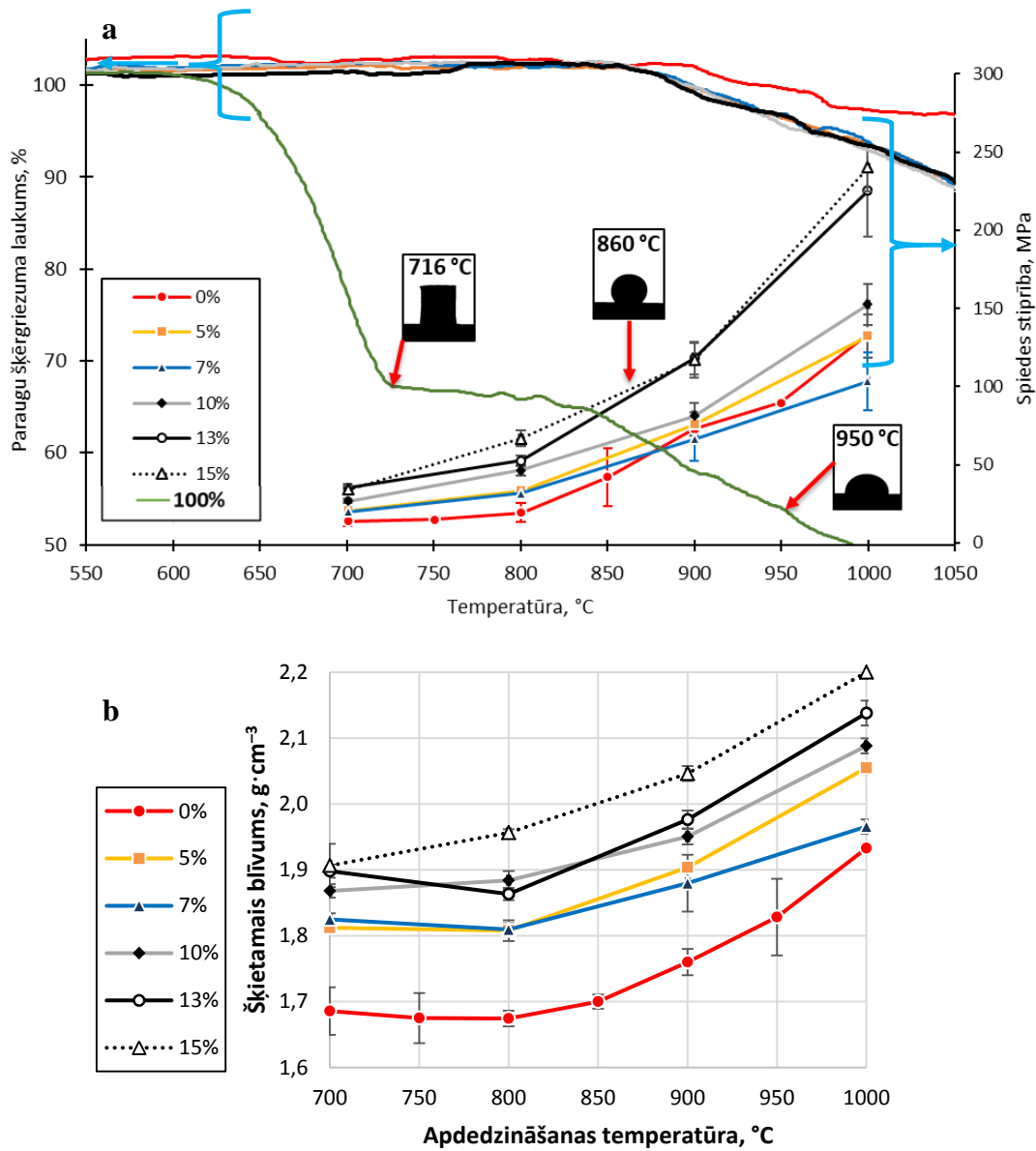
Fāze, %	Stikla saturs										
	0 masas %					15 masas %				100 masas %	
	20 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C	20 °C	1000 °C
<b>Kvarcs</b>	40,8	60,9	60,3	71,0	72,6	58,7	57,7	69,1	67,9		
<b>Illīts</b>	45,8	29,2	28,7	18,5		33,8	25,9	6,8			
<b>Hematīts</b>	3,1	1,5	1,8	3,0	5,3	3,6	5,3	5,0	4,6		
<b>Mikroklīns</b>	3,4	7,9	8,7	7,1	8,3	3,9	5,6	6,8	8,6		
<b>Kaolinīts</b>	6,9										
<b>Magnetīts</b>		0,5	0,5								
<b>Diopsīds</b>					1,7		5,5	4,8	5,3		60,4
<b>Špinelis</b>					12,2			3,9	7,3		
<b>Kristobalīts</b>								3,5	6,4		
<b>Volastonīts</b>											39,6
<b>Amorfa fāze</b>	13	13	14	21	26	16	15	21	26	~100	85

Salīdzinot 0 masas % un 15 masas % stiklu saturošus *Liepas* mālu-stikla paraugus, ir novērojams, ka dažas minerālu fāzes, piemēram, muskovīts un diopsīds izzūd, neveidojot jaunas kristāliskās fāzes. Ir jāņem vērā, ka kristālisko fāžu sastāvi ir aprēķināti, neiekļaujot amorfo fāzi. Amorfā fāze reprezentē daļu no visa parauga.

Pētītajiem mālu stikla sastāviem tika uzņemtas termiskās dilatometrijas (TD) līknes. Kā redzams 3.1.a attēlā, mālu saķepšanas sākums novērojams pie 900 °C, izmantotā stikla sablīvēšanās sākums pie aptuveni 550–600 °C ar sekojošu *Littleton* punkta sasniegšanu pie 716 °C, kas saistīts ar stikla viskozitātes samazināšanos līdz 6,6 Pa·s<sup>-1</sup>[13], [21]. Stikla sablīvēšanās izbeidzas 900 °C temperatūrā ar sekojošu šķidrās fāzes veidošanās izraisītu stikla izplešanos temperatūras intervālā no 900 °C līdz 1000 °C un turpmāku stikla viskozitātes samazināšanos, turpinot palielināt temperatūru. Stikla pievienošana mālu keramikas masā no 5 masas % līdz 15 masas % izraisa līdzīgu saķepšanas temperatūras samazināšanos no 900 °C (māliem bez stikla piedevas) uz 860 °C visu pētīto sastāvu gadījumos. Acīmredzot stikla piedeva darbojas kā mālu daļiņu sablīvējošs un poru izmērus samazinošs kusris mālu keramikas apdedzināšanas procesā. Minētie procesi noteikti ietekmē mālu-stikla keramikas mehāniskās īpašības. Paraugu spiedes stiprība (3.1. att. a) strauji pieaug pēc apdedzināšanas temperatūras virs 800 °C. Būtisks stiprības pieaugums ir novērojams keramikas paraugiem, kas satur vairāk nekā 10 masas % stikla pēc apdedzināšanas virs saķepināšanas temperatūras (>900 °C), sasniedzot līdz 240 MPa 15 masas % stikla saturošas keramikas gadījumā. Lielākai daļai pētīto keramikas materiālu sagraušanai ir trausls raksturs, t. i., līdz sagraušanai praktiski nav novērojama plastiskā deformācija.

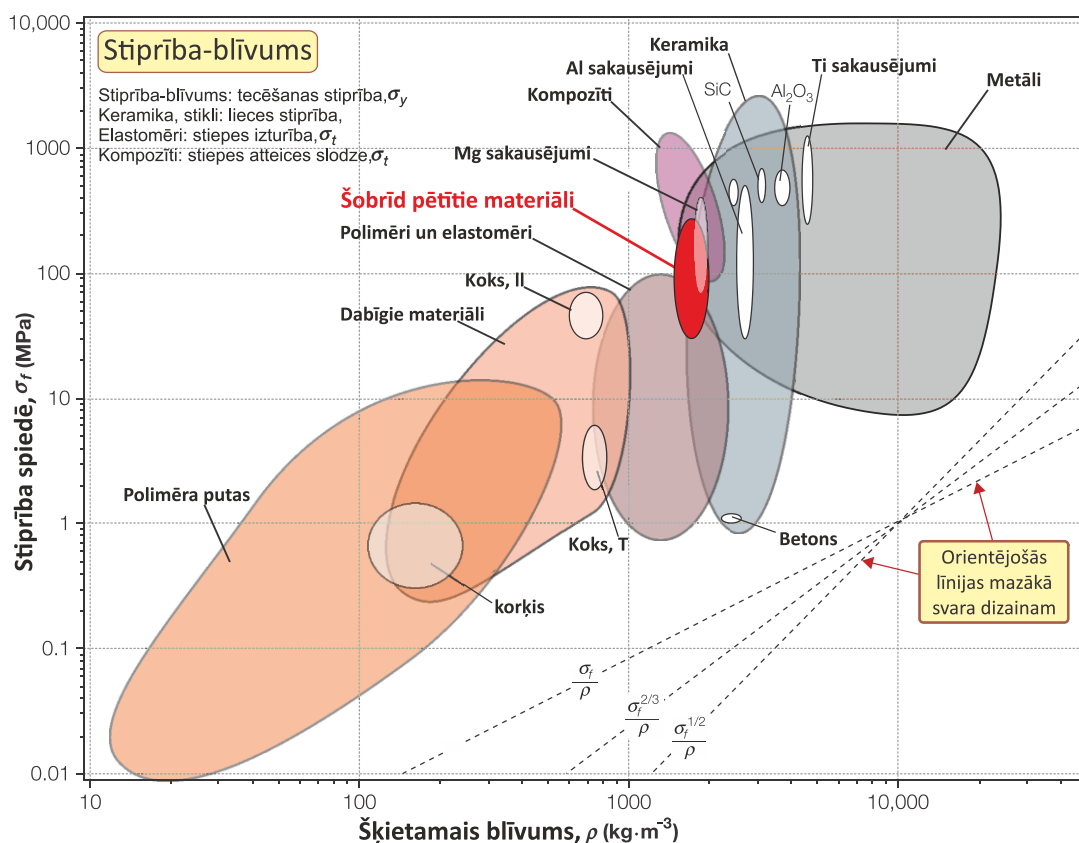
Vienlaikus novērots, ka, palielinot stikla koncentrāciju no 0 masas % līdz 15 masas %, samazinās paraugu ūdens uzsūce 2–3 reizes (apdedzināšanas temperatūras intervālā no 700 °C līdz 1000 °C), visstraujākais samazinājums novērojams paraugiem ar stikla piedevu 13 masas % un 15 masas %, kas labi korelē ar intensīvu saķepšanas sākšanos un slēgto poru veidošanos virs 900 °C (3.1. att. a). Ūdens uzsūces spēja ir tieši saistīta ar materiālu porainību un tās apgriezti proporcionālo vērtību – šķietamo blīvumu. Kā bija gaidāms, visu paraugu

porainība, pieaugot apdedzināšanas temperatūrai visos gadījumos, samazinās, savukārt šķietamais blīvums pieaug (3.1. att. b) un sasniedz  $2,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (stikla saturs 15 masas %, apdedzinot  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  temperatūrā).



3.1. att. Mālu, mālu-stikla un stikla paraugu termiskās dilatometrijas līknes, to spiedes stiprība (a) un šķietamais blīvums (b) atkarībā no apdedzināšanas temperatūras un stikla koncentrācijas paraugā.

Māliem ir raksturīgs termiskais sarukums, ko definē kā lineāro izmēru samazināšanos fizikāli ķīmisko procesu rezultātā. Stikla piedevu pievienošana samazina keramikas izstrādājumu sarukumu vidēji par 2 % līdz 4 % atkarībā no apdedzināšanas temperatūras.



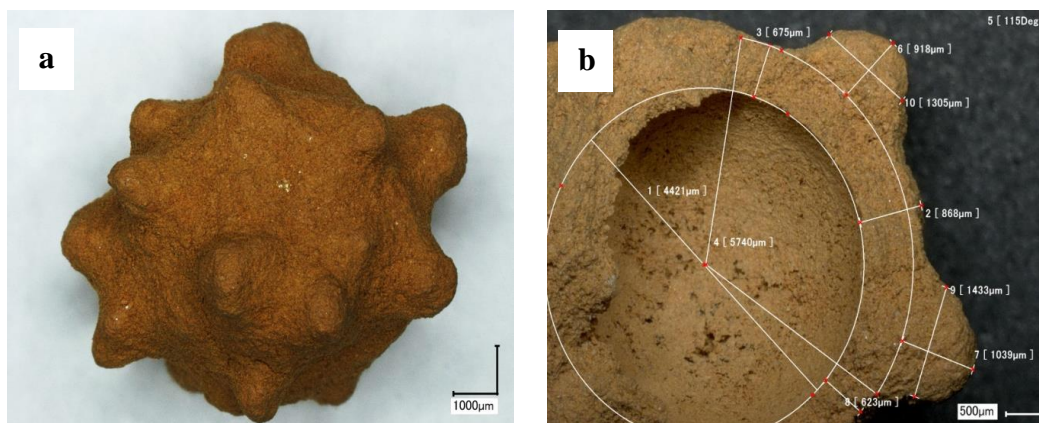
3.2. att. Mālu-stikla keramikas un citu materiālu klašu īpašības diagrammā “Dažādu materiālu stiprība pret šķietamo blīvumu” (adaptēts no [22]).

M. Ešbijs [22] ir sakārtojis un klasificējis visdažādākos materiālus atkarībā no to stiprības un blīvuma. Ievietojot mālu-stikla keramikas paraugu eksperimentālos datus šajā diagrammā (3.2. att.; parādīts ar sarkanu ovālu), var secināt, ka tie atrodas keramikai raksturīgas zonas augšējā daļā, t. i., iegūtais materiāls raksturojas ar salīdzinoši zemu blīvumu un augstu stiprību, kas ir viens no šī darba mērķiem.

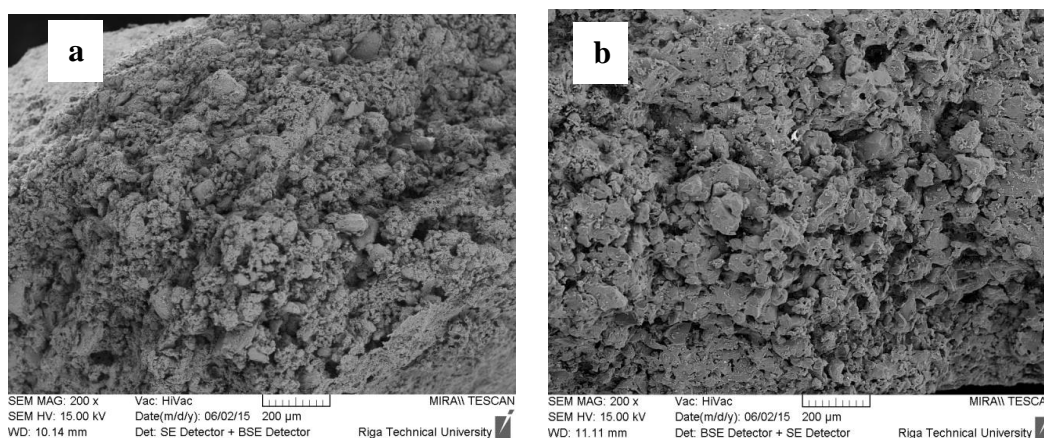
### 3.2. Keramikas dobo granulu (KDG) iegūšana un īpašības

Izpētītie mālu-stikla sastāvi tika izmantoti, lai no tiem iegūtu keramikas dobas granulas (KDG), ar mērķi paplašināt mālu izmantošanas iespējas. KDG tika iegūtas ar izdegošā šablona metodi, izmantojot putu polistirolu (PPS) rotācijas tipa granulatorā.

Iegūto granulu kvalitāte lielā mērā ir atkarīga no darba kameras rotācijas ātruma. Darbā tika teorētiski aprēķināts kritiskais rotācijas ātrums  $n_{kr}$  ( $104 \text{ min}^{-1}$ ) un eksperimentāli apstiprināts optimālais darba rotācijas ātrums  $n_{kr} = 95\text{--}100 \text{ min}^{-1}$ . Iegūtās KDG raksturojas ar vidējo diametru robežās no 5,5 mm līdz 8,8 mm un vidējo sienīņu biezumu robežās no 0,65 mm līdz 0,85 mm, kā redzams 3.3. a un b attēlā. KDG virsma atšķiras no lodveida virsmas ar noapaļotiem izvirzījumiem, kuru augstums no nosacīti pieņemtās KDG sfēras ārējā diametra virsmas ir robežās no 0,8 mm līdz 1,5 mm. Pētījumā izvēlētie apdedzināšanas temperatūras režīmi un pievienotā stikla koncentrācijas būtiski neietekmē vizuāli novēroto KDG formu.



3.3. att. KDG a) pēc apdedzināšanas 1000 °C temperatūrā; b) pēc pāršķelšanas.



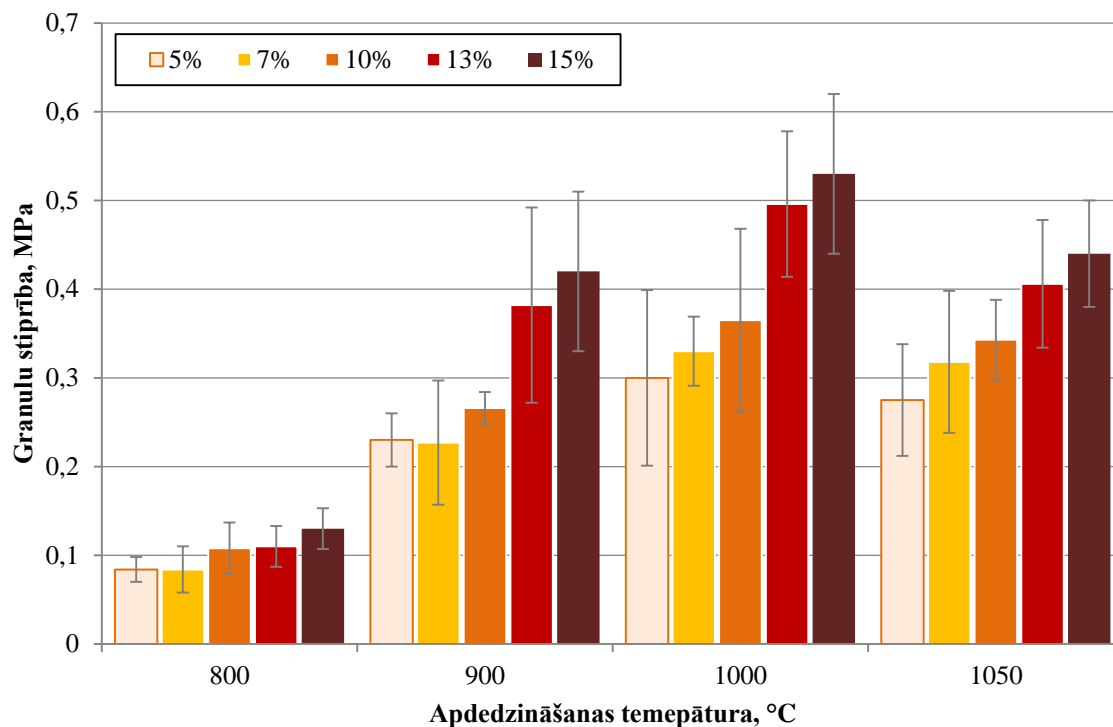
3.4. att. KDG lūzuma virsmu SEM attēli pēc apdedzināšanas a) 950 °C; b) 1150 °C temperatūrā.

Apdedzināšanas temperatūras palielināšana no 800 °C līdz 1050 °C visiem paraugiem ar stikla saturu no 5 masas % līdz 15 masas % veicina materiāla sablīvēšanos un porainības samazināšanos (3.4. att.), līdzīgi kā tas aprakstīts 3.1. nodaļā. To apstiprina arī granulu īpatnējās virsmas pētījumi. Granulas, kas iegūtas, apdedzinot 800 °C temperatūrā pie visiem pievienotiem stikla piedevu daudzumiem, raksturojas ar lielu īpatnējo virsmu – līdz  $14,5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Palielinot apdedzināšanas temperatūru līdz 1000 °C, tā nepārsniedz  $0,3 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ .

Iegūto KDG mehāniskā stiprība tika novērtēta, izmantojot birstošu porainu paraugu testēšanas metodi pēc standarta “GOST 9758-2012 mehāniskās stiprības noteikšana”, granulas spiežot cilindrā. Kā redzams 3.5. attēlā, KDG stiprību, spiežot cilindrā, būtiski ietekmē apdedzināšanas temperatūra un stiklu piedevu daudzums. Tā pieaug no vidēji 0,1 MPa (800 °C temperatūrā iegūtiem paraugiem) līdz 0,3–0,4 MPa (1000 °C temperatūrā iegūtiem paraugiem). Iegūtie eksperimentālie lielumi korelē ar šo materiālu spiedes stiprību (3.1. att.).

Pateicoties tādām KDG īpašībām, kā samērā liela īpatnējā virsma, pietiekama mehāniskā stiprība, šajā darbā tika izstrādāts sorbents ar feromagnētiskām īpašībām, kura sastāvā papildus māliem un stiklam tika pievienots pulverveida dzelzs vai industriālais atkritums – plāva (dzelzs oksīdu maisījums –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  un  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), kas piešķir KDG feromagnētiskas īpašības. Feromagnētiskā sorbenta ideja un iegūšanas paņēmiens tika apstiprināts ar Latvijas

patentu (LV14822B, 20.06.2014.). Iegūtais produkts un tā īpašības šajā promocijas darbā tālāk netika pētītas.

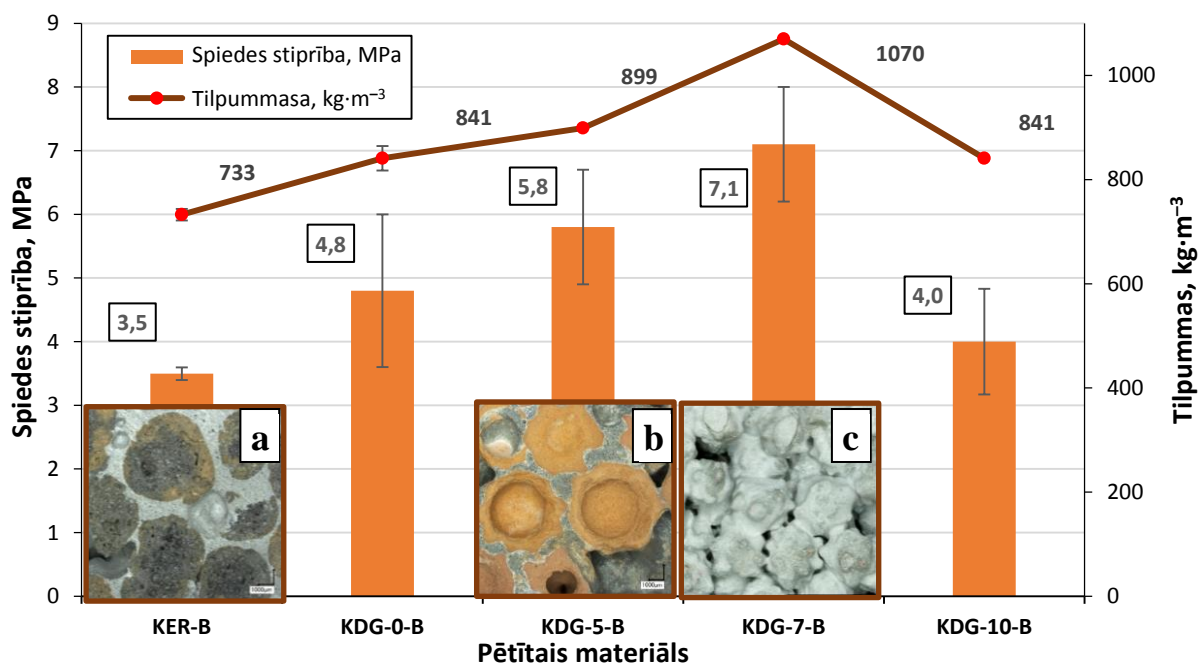


3.5. att. KDG spiedes stiprības, spiežot cilindrā, atkarība no stikla koncentrācijas paraugā un to apdedzināšanas temperatūras.

Viena no iegūto granulu izmantošanas jomām varētu būt celtniecības bloku izgatavošana, aizstājot keramzīta granulas, ko Latvijā vairs neražo. Eksperimentu rezultātā izveidota tehnoloģiski optimāla receptūra, betona maisījumam nepieciešamo ūdens daudzumu sadalot divās daļās pirms samaisīšanas: vienu daļu izmantojot KDG samitrināšanai, otru daļu iejaucot cementa javā. Kopējā ūdens-cementa attiecība bija 0,9. KDG betona bloku (KDG-B) izgatavošanai izvēlējās granulas, kas iegūtas, tās apdedzinot 900 °C temperatūrā, un satur 0 masas %, 5 masas %, 7 masas % un 10 masas % stikla piedevas ar vienādu vidējo izmēru  $8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ . Atbilstoši izstrādātajai receptūrai izveidots betona maisījums, kas iestrādāts un izturēts formā 28 dienas. Salīdzināšanai tika iegūti keramzīta-betona (KER-B) paraugi ar komerciālu produktu *Keramzīts*. Kā redzams 3.6. attēlā, KDG-B, salīdzinot ar KER-B, visos gadījumos uzrāda būtiski lielākas spiedes stiprības vērtības, kas KDG-7B (bloks ar KDG ar 7 masas % stikla piedevu) gadījumā sasniedz 7,1 MPa, t. i., divas reizes lielākas nekā KER-B. Vienlaikus pieaug paraugu tilpumu masa, sasniedzot  $1070 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Konstatēto efektu var skaidrot ar KDG īpatnējo formu, kas nodrošina lielāku savstarpējo saķeri un efektīvāku fiksāciju (stiegrošanos) betona matricā (3.6. a, b, un c att.), kā arī cementa javas labāku iespiešanos KDG sienas porās. Tomēr, izmantojot KDS ar 10 masas % stikla piedevu betona bloka izgatavošanā, tika novērota spiedes stiprības samazināšanās. Šo efektu var izskaidrot ar stikla izraisītu mālu struktūras saķepšanas intensificēšanos un sekojošu porainības samazināšanos, kas rezultējas mazākā cementa javas uzņemšanas kapacitātē iegūtās



keramikas porainajā struktūrā. Līdz ar to samazinās arī KDG-B kopējā spiedes stiprība, neskatoties uz to, ka individuālu KDG spiedes stiprība palielinās līdz ar stikla satura palielināšanu.



3.6. att. KER-B un KDG-B paraugu stiprība spiedē un tilpuma masa pēc 0 masas %, 5 masas %, 7 masas % un 10 masas % stikla piedevu saturošu (attiecīgi apzīmēti ar KER-B, KDG-5-B, KDG-7-B un KDG-10-B) kompozītu apdedzināšanas 900 °C temperatūrā. Optiskās mikroskopijas attēlos parādīti šķērsriezuma attēli granulu izvietojumam keramzīta-betona blokā (a); KDG-betona blokā (b); KDG-betona bloka virsmas attēls (c).

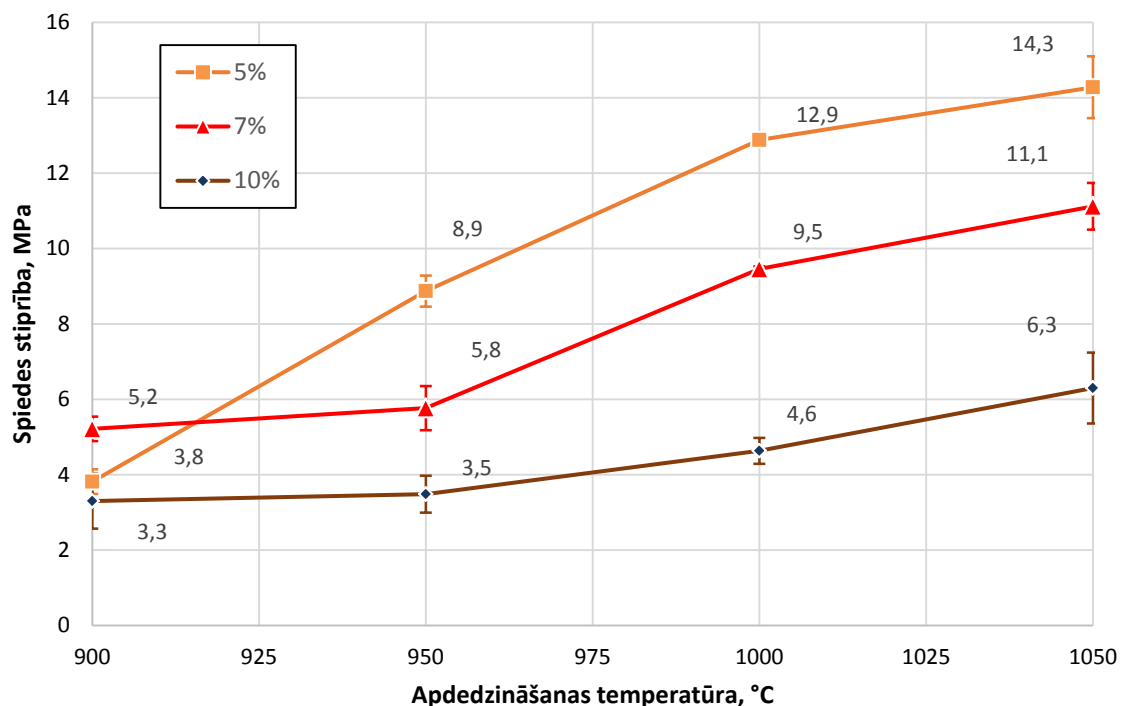
### 3.3. Augsti porainas stiklu saturošas mālu putu keramikas (MPK) iegūšana un īpašības

Pēdējā laikā arvien vairāk uzmanības tiek pievērsts augsti porainiem keramiskiem materiāliem. Darbā ir iegūta mālu putu keramika (MPK) no mālu-stikla šlikera ūdens suspensijas, izmantojot tiešo uzputošanas paņēmieni rotācijas dispergatora-kavitatorā. Šlikera suspensijas izveidei izvēlēti mālu stikla sastāvi ar 0 masas %, 5 masas %, 7 masas % un 10 masas % stikla piedevu. Iegūtā uzputotā suspensija tika žāvēta formās un apdedzināta temperatūras intervālā no 900 °C līdz 1050 °C. MPK paraugiem bez stikla piedevas žāvējot tika novērots intensīvs sarukums un plaisu veidošanās. Sasmalcināta stikla ar daļiņu izmēru no 0,03 mm līdz 0,07 mm pievienošana izraisīja keramikas masas liesināšanu, kas novērš plaisu veidošanas paraugos, tos žāvējot, saglabājot formas stabilitāti.

#### 3.3.1. MPK fizikāli mehāniskās īpašības

Iegūtajiem MPK paraugiem tika novērtēta to mehāniskā stiprība. MPK paraugu spiedes stiprība pieaug, palielinot apdedzināšanas temperatūru no 900 °C līdz 1050 °C. Visstraujākais spiedes stiprība pieaugums – no 3,8 MPa līdz 14,3 MPa – tika novērots MPK, kas satur 5 masas % stikla piedevu (3.7. att.).

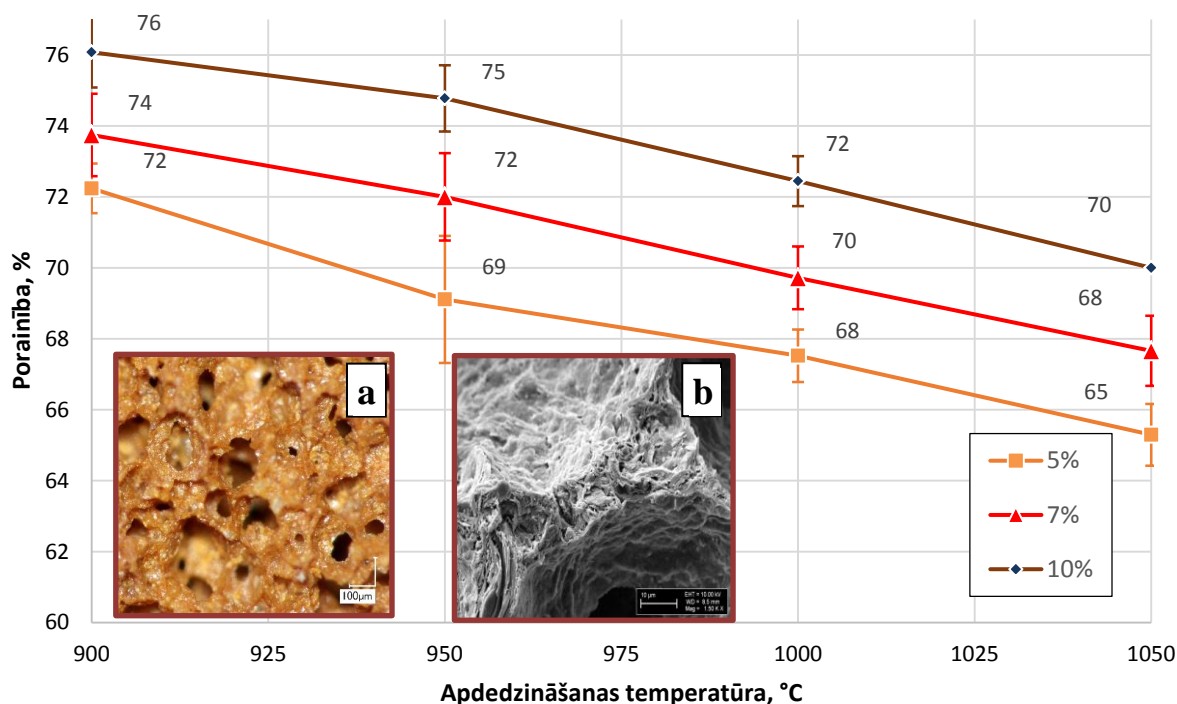
Mālu daļiņu saistīšanās ar lielāku stikla koncentrāciju apdedzināšanas temperatūras intervālā no 950 °C līdz 1050 °C izraisa mazāk intensīvu MPK spiedes stiprības palielināšanos, sasniedzot attiecīgi no 5,8 MPa līdz 11,1 MPa (7 masas %) un no 3,5 MPa līdz 6,3 MPa (10 masas %). Šis efekts ir saistīts ar mazāk izturīgas amorfās fāzes sabrukšanu MPK struktūrā zem pieliktās slodzes.



3.7. att. MPK paraugu spiedes stiprības atkarība no apdedzināšanas temperatūras un stikla satura.

Ar Arhimēda metodi nosakot MPK paraugu atvērto porainību, tika novērots, ka tā pieaug vidēji par 3–4 % palielinot stikla piedevu koncentrāciju no 5 līdz 10 masas % pie visām apdedzināšanas temperatūrām (3.8. att.). Maksimāla porainība novērojama paraugiem, kas satur 10 masas % stikla. Jāatzīmē, ka, salīdzinot ar blīvo mālu-stikla keramisko materiālu, MPK gadījumā ir pretēja tendence. Paaugstinot apdedzināšanas temperatūru par 50 °C, MPK atvērta porainība samazinās vidēji par 2–3 %. Šlikera homogenizācijas un uzpuošanas laikā disperģatora-kavitatorā saistītā gaisa radītās poras ir vienmērīgi izkliedētas materiālā, to vidējais izmērs ir robežās no 20 μm līdz 120 μm (3.8. a att.). Paraugus apdedzinot, tiek aizvadīts ūdens, izdeg organiskie piemaisījumi, notiek saķepšanas process, un tā rezultātā materiāls sablīvējas, poru izmēri samazinās. Tajā pašā laikā, kā redzams 3.7. b attēlā, arī poru balstu struktūra ir izteikti poraina – ar vidējo poru izmēru ap 1 μm.

Līdzīgi kā porainībai, arī MPK paraugu šķietamam blīvumam un ūdens uzsūces īpašībām ir pretēja tendence, salīdzinot ar blīvo materiālu. Lielāko šķietamo blīvumu (vidēji 0,84 g·cm<sup>-3</sup>) uzrāda paraugi, kas satur 5 masas % stikla, paraugiem ar 10 masas % stikla vidēji ir 0,71 g·cm<sup>-3</sup>. Palielinot apdedzināšanas temperatūru, materiālam sablīvējoties, blīvums nedaudz pieaug – līdz 0,9 g·cm<sup>-3</sup> (5 masas % stikla) un 0,75 g·cm<sup>-3</sup> (10 masas % stikla).



3.8. att. MPK porainības atkarība no apdedzināšanas temperatūras un stikla satura: (a) poru struktūras optiskās mikroskopijas; (b) poras balsta struktūras SEM attēli.

Stikla piedevas veicina putu keramikas ūdens uzsūces spēju. Lielāka ūdens uzsūce (līdz 122 %) novērojama paraugiem, kas satur 10 masas % stikla piedevu un tika apdedzināti 900 °C temperatūrā.

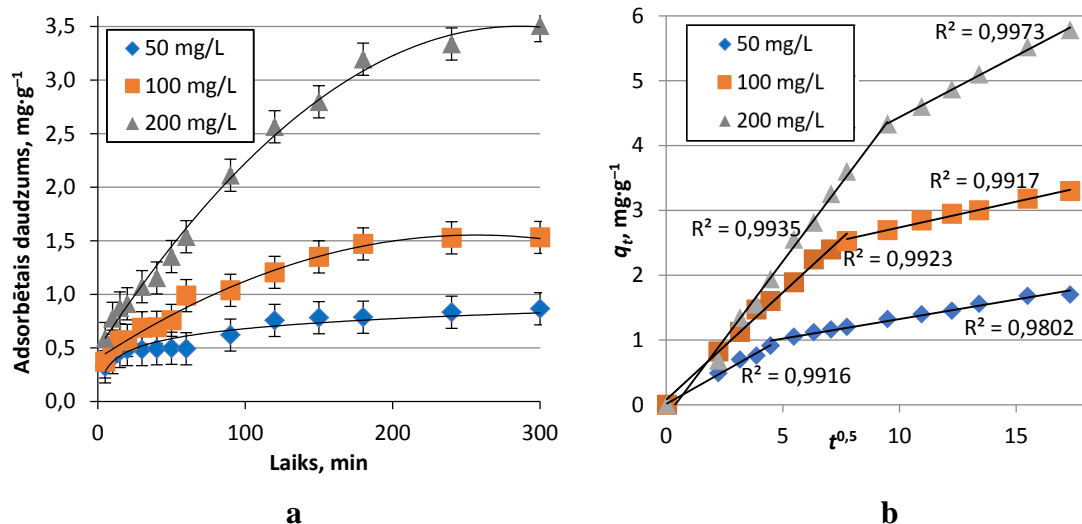
Paraugiem, kas iegūti, apdedzinot 900 °C, 950 °C un 1000 °C temperatūrā, tika noteikts īpatnējās virsmas laukums,  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Apdedzināšanas temperatūras paaugstināšana no 900 °C uz 950 °C visos gadījumos samazina MPK īpatnējo virsmu vidēji 4–5 reizes (no vidēji  $2,8 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  900 °C līdz  $0,6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  950 °C temperatūrā), kas saistīts ar iepriekš minētajiem procesiem apdedzināšanas laikā.

### 3.3.2. MPK sorbciju īpašību pētījumi

Iegūtā mālu putu keramika raksturojas ar salīdzinoši lielu mehānisko izturību pie relatīvi lielās porainības (līdz 80 %). Šāds materiāls potenciāli varētu tikt izmantots kā sorbents, piemēram, notekūdeņu attīrīšanai tekstilrūpniecībā. Tāpēc darbā tika pētītas MPK sorbcijas īpašības, kā modeļvielu izmantojot tekstilkrāsvielu *Bezaktiv Turquoise Blue V-G (BTB)*. Sorbcijas pētījumiem tika izmantoti paraugi, kas satur 10 % stikla un apdedzināti 900 °C temperatūrā.

Lai noskaidrotu pētāmo paraugu optimālās sorbcijas apstākļus, tika noteikts pH nulles lādiņa punkts ( $\text{pH}_{\text{NLP}}$ ), kas šajā gadījumā bija  $\text{pH}_{\text{NLP}} = 6,16$ . *BTB* ir anjona tipa krāsviela, līdz ar to labākās sorbcijas spējas sagaidāmas skābā vidē. Eksperimentāli novērtējot vides pH ietekmi, tika konstatēts, ka maksimālā sorbcijas spēja novērojama, ja  $\text{pH} = 2$ . Tālākie sorbcijas eksperimenti tika veikti pie  $\text{pH} = 2$ , mainot *BTB* koncentrāciju šķīdumā:  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  un  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .





3.9. att. Sorbcijas kinētika (a) un adsorbcijas procesa attēlojums  $q_t-t^{0,5}$  koordinātās (b) atkarībā no šķīduma *BTB* sākotnējās koncentrācijas šķīdumā.

Kā redzams 3.9. attēlā, pieaugot krāsvielas *BTB* koncentrācijai šķīdumā, palielinās sasniedzamās adsorbcijas līdzsvara vērtības, kā arī nepieciešamais laiks šī līdzsvara sasniegšanai. Adsorbcijas procesa limitējošo stadiju un mehānisma noskaidrošanai var izmantot dažādus kinētiskos modeļus. Vēbera–Morisa (*Weber–Moriss* angl.) difūzijas modeli parasti izmanto, lai primāri nodalītu adsorbāta ārējās un iekšējās difūzijas ietekmi uz adsorbcijas procesu, matemātiski to apraksta 3.1. vienādojums [23]:

$$q_t = K_{id}t^{0,5} + C, \quad (3.1.)$$

kur

$q_t$  – adsorbētās vielas daudzums,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;

$K_{id}$  – Vēbera–Morisa konstante jeb iekšējās difūzijas ātruma konstante porās,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{0,5}$ ;

$C$  – konstants parametrs, kas saistīts ar robežslāņa biezumu,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Koordinātas  $q_t-t^{0,5}$  (3.9. b att.) skaidri var izdalīt divas sorbcijas procesa stadijas pie visām *BTB* koncentrācijām šķīdumā. Pirmais  $q_t-t^{0,5}$  posms raksturo ārējās difūzijas limitējošo ietekmi, otrs vairāk attiecas uz adsorbāta difūziju caur robežslāni un adsorbenta porās [24]–[26].

Adsorbcijas procesa kinētiku uz cieta sorbenta virsmas bieži raksturo ar pseidopirmās un pseidootrās pakāpes kinētiskajiem modeļiem. Adsorbcijas kinētikas pseidopirmās pakāpes vienādojumu izmanto adsorbcijas procesa raksturošanai uz robežvirsmas šķīdums – ciets ķermenis [27]. Šāda modeļa kinētiskā vienādojuma (3.2. vienādojums) arguments ir sorbenta sorbcijas spēja [28], [29]:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t), \quad (3.2.)$$

kur

$q_t$  – adsorbētās krāsvielas daudzums laikā  $t$ ,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;

$q_e$  – adsorbētās krāsvielas daudzums līdzsvara stāvoklī,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;

$k_1$  – pseidopirmās pakāpes modeļa ātruma konstante,  $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  
 $t$  – laiks, min.

Pseidootrās pakāpes kinētiskais modelis bez difūzijas procesu ietekmes ļauj novērtēt arī iespējamo reakciju ietekmi sistēmā sorbents-sorbāts [29], [30]. Pseidootrās pakāpes kinētiskā modeļa klasiskā forma ir redzama 3.3. vienādojumā [27]:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2, \quad (3.3.)$$

kur

$k_2$  – pseidopirmās pakāpes modeļa ātruma konstante,  $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Sorbcijas procesa analīzei parasti izmanto šo vienādojumu lineārās formas. Adsorbcijas kinētisko modeļu lineārās izteiksmes un procesu raksturojošie parametri [31] redzami 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Adsorbcijas kinētiskie modeļi, lineārās izteiksmes un parametri

Kinētikas modelis	Vienādojuma lineāra izteiksme	Mainīgie lielumi	Parametri
Pseidopirmā pakāpe	$\ln q_t = \ln k + v \ln t$	$y = \ln(q_e - q_t); x = t$	$k = \exp(\text{krustpunkts ar asi});$ $v = \text{virziena koeficients}$
Pseidootrā pakāpe	I tips $t/q_t = 1/(k_{2p} q_e^2) + t/q_e$	$y = t/q_t; x = t$	$q_e = (\text{virziena koeficients})^{-1};$ $k_{2p} = q_e^2 / \text{krustpunkts ar asi}$
	II tips $1/q_t = 1/[(k_{2p} q_e^2)(1/t)] + 1/q_e$	$y = 1/q_t; x = 1/t$	$q_e = (\text{krustpunkts ar asi})^{-1};$ $k_{2p} = q_e^2 / \text{virziena koeficients}$

No iegūtajām sakarībām aprēķināti kinētisko vienādojumu parametri. Kā redzams 3.3. tabulā, visprecīzāk *BTB* adsorbcijas procesu uz MPK sorbentiem apraksta pseidootrās pakāpes I tipa kinētiskais modelis ( $R^2$  vērtības ir robežās no 0,914 līdz 0,990). Pie tam eksperimentāli noteiktās un aprēķinātās adsorbcijas līdzsvara vērtības ir pietiekami tuvas.

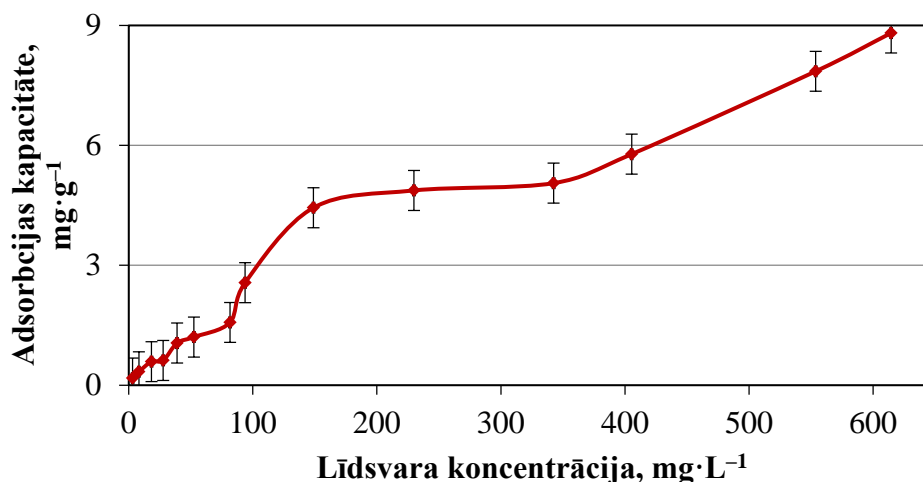
Tas ļauj secināt, ka izmantotais kinētiskais adsorbcijas modelis ir piemērots adsorbcijas procesa analīzei pētītajās sistēmās un norāda, ka process norit jauktās difūzijas režīmā un to var iespaidot arī krāsvielas un sorbenta aktīvo centru mijiedarbība.

3.3. tabula

*BTB* adsorbcijas modeļu kinētiskie parametri uz 10 masas % stikla saturošas MPK virsmas

Sākuma konc.	$Q_e,$ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ eksp.	Pseidopirmā pakāpe			Pseidootrā pak. I tips			Pseidootrā pak. II tips		
		$k_2,$ $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	$q_e,$ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$R^2$	$k_2,$ $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	$q_e,$ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$R^2$	$k_2,$ $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	$q_e,$ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$R^2$
50	0,845	0,01	0,529	0,945	0,067	0,881	0,990	0,111	0,846	0,781
100	1,529	0,02	1,750	0,892	0,016	1,684	0,969	0,055	1,279	0,782
200	3,423	0,01	3,535	0,975	0,004	4,01	0,914	0,022	2,397	0,787

Datus par līdzsvaru sorbcijas procesos parasti attēlo sorbcijas izotermu veidā. Izotermas forma atspoguļo adsorbcijas procesa intensitāti un savstarpējo mijiedarbību starp adsorbātu un adsorbentu. Kā redzams 3.10. attēlā, *BTB* sorbcijas no šķīduma izoterma uz MPK sorbenta virsmu atbilstoši Brunauera klasifikācijai [32] vistuvāk ir I vai II tipa izotermām.



3.10. att. *BTB* sorbcijas izoterma uz parauga virsmas ar 10 masas % stikla saturu, 900 °C.

Darbā iegūtās adsorbcijas izotermas raksturošanai tika izmantoti Lengmīra un Freindliha teorētiskie adsorbcijas modeļi [27], [32], [33]. Visbiežāk šos modeļus un atbilstošos vienādojumus attēlo lineārā formā [34], (3.4. tab.).

3.4 tabula

Adsorbcijas modeļu lineārās izteiksmes un parametri

Izotermas modelis	Vienādojuma lineārā izteiksme	Mainīgie lielumi	Parametri
Freindliha	$\ln q_e = \ln K_F + n^{-1} \ln C_e$	$y = \ln q_e$ $x = \ln C_e$	$K_F = \exp(\text{krustpunkts ar asi})$ ; $n = (\text{virziena koeficients})^{-1}$
Lengmīra	(II) $1/q_e = 1/(K_L q_m C_e) + 1/q_m$	$y = 1/q_e$ $x = 1/C_e$	$q_m = (\text{krustpunkts ar asi})^{-1}$ ; $K_L = \text{virziena koeficients}$

kur  $q_e$  – adsorbētas vielas daudzums,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;

$q_m$  – maksimālā monoslāņa kapacitāte,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;

$C_e$  – adsorbāta koncentrācija šķīdumā līdzsvara apstākļos,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;

$K_L$  – Lengmīra konstante;

$K_F$  un  $n^{-1}$  – Freindliha konstantes, kas attiecīgi raksturo adsorbcijas kapacitāti un intensitāti.

3.5. tabula

Iegūto sorbcijas izotermas teorētisko modeļu parametri

Adsorbcijas modelis	$R^2$	Parametri
Lengmīra	(II) 0,956	$q_m = 3,16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; $K_L = 0,018 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$
Freindliha	(II) 0,980	$K_F = 0,065 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; $n = 0,855$

Eksperimentālie *BTB* sorbcijas datus pietiekami labi var aprakstīt ar šiem modeļiem, par ko liecina augstas determinācijas koeficientu vērtības ( $R^2 > 0,95$ ). 3.5. tabulā redzamas pēc Lengmīra un Freindliha teorētisko modeļu vienādojumiem aprēķinātās konstantes un Lengmīra vienādojuma gadījumā – arī maksimālā sorbcijas kapacitāte  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . Kā redzams, atbilstoši Lengmīra modelim aprēķinātā MPK sorbcijas kapacitāte ( $q_m = 3,16 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) ir mazāka nekā eksperimentāli iegūtā (3.9. att.). Tas apstiprina iepriekš izteikto pieņēmumu par sorbcijas procesa sarežģīto raksturu. Acīmredzot procesa sākumā dominē sorbcija uz sorbenta aktīvajiem centriem, tajā pašā laikā saistītās *BTB* molekulas kalpo kā jauni adsorbcijas centri. Šo pieņēmumu netieši apstiprina arī Freindliha izoterma konstante  $n = 0,855$ , kas norāda uz iespējamu ķīmisku mijiedarbību starp sorbāta molekulām un MPK virsmas aktīvajiem centriem.

### 3.3.3. MPK izmantošana celtniecības bloku siltumizolācijas īpašību uzlabošanai

Eiropas Savienība arvien lielāku nozīmi piešķir enerģijas patēriņa samazināšanai. Energoefektivitātes direktīva Nr. 2012/27/ES [35] pieprasīja dalībvalstīm samazināt enerģijas patēriņu par 20 % līdz 2020. gadam. Lai uzlabotu dzīvojamo jaunbūvju energoefektivitāti, to būvniecībā plaši izmanto šūnu veida keramikas celtniecības blokus. Tie raksturojas ar noteiktas formas vertikāliem kanāliem. Baltijas valstu reģionā ir plaši pazīstami *Keraterm* bloki (AS “Lode”, Latvija), to siltumvadītspējas koeficients ( $\lambda$ ) ir robežās no  $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  līdz  $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  [36]. Neskatoties uz to, tirgū esošie keramikas bloki nenodrošina augošās ēku energoefektivitātes prasības.

Šādu bloku siltumizolācijas īpašības summējas no siltuma vadīšanas parādībām kanālu sienās un siltuma konvekcijas pašos kanālos. Siltuma pārnesana siltuma konvekcijas veidā ir *Keraterm* bloku lielākais trūkums. Bloka kanālu aizpildīšana ar uzputotu perlītu [37] vai citu materiālu, ko iegūst no cementa suspensijas ar pievienotu uzputošanas aģentu [38], ir zināmi paņēmieni bloku siltumizolācijas īpašības uzlabošanai.

Darbā, izmantojot 3.3. nodaļā aprakstīto MPK iegūšanu ar tiešo uzputošanas paņēmieni dispersatorā, izstrādāts paņēmieni *Keraterm 17,5* bloku siltumizolācijas īpašību uzlabošanai. Sagatavotā mālu-ūdens suspensija (95 masas % mālu pulveris un 5 masas % smalcināta stikla pulveris attiecībā pret sauso izejvielu saturu), virsmas aktīvās vielas, elektrolīts un uzputošanas aģents sajaukti ar rokas mikseri un uzputoti dispersatorā. Ar iegūto uzputoto suspensiju aizpildīti *Keraterm 17,5* bloku kanāli. Aizpildītais bloks tika žāvēts, vienmērīgi ceļot temperatūru līdz  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ . Uzputotais materiāls pilnībā aizpilda bloka kanālus un blīvi pieguļ bloka kanālu sienām, kas konvekcijas ceļā padara siltuma pārnesi bloka kanālos par nebūtisku siltuma vadīšanas faktoru.

*Keraterm 17,5* blokiem vidējā eksperimentāli noteiktā siltumvadītspējas koeficienta vērtība bija  $\lambda = 0,21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , aizpildītam un izžāvētam blokam  $\lambda$  vērtības nepārsniedza  $0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Līdz ar to var secināt, ka ar piedāvātā MPK palīdzību var samazināt celtniecības bloka siltumvadītspējas koeficientu vidēji par 23 %.

### 3.4. Granulētā putu mālu-stikla keramika (PKG)

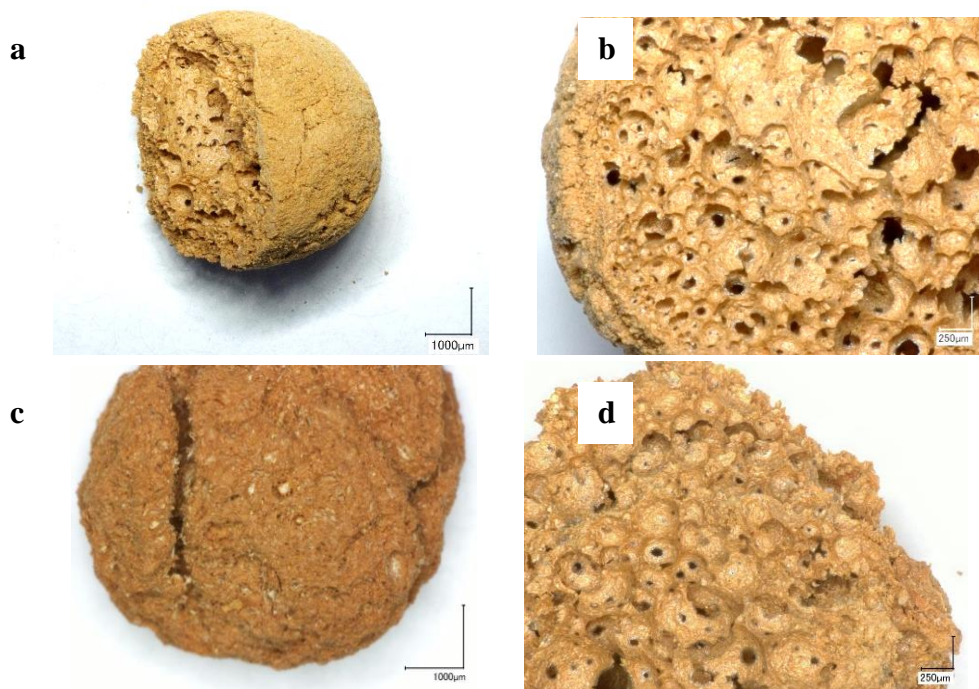
#### 3.4.1. Putu keramikas granulu iegūšana un īpašības

Šajā nodaļā apskatīta putu keramikas granulu (PKG) iegūšana no uzputota mālu-stikla šlikera un to īpašību izpēte, izmantojot šajā darbā attīstītos granulēšanas tehnoloģiskos parametrus un putu keramikas iegūšanas paņēmienus.

PKG izgatavošanai izmantots šlikers ar 10 masas % stikla piedevu. Mālu suspensija uzputota ar dispergatora palīdzību (2. nod.) un dozēti caur sprauslu ievadīta rotējošā cilindriska veida granulācijas iekārtā. Granulu veidošanās tika nodrošināta, izmantojot iepriekš sagatavotu pulverveida kūdru un mālus, kas kalpo kā mitro (svaigo) uzputoto mālu granulu pretsalipšanas aģents, attiecīgi veido kūdras vai mālu sausu pārklājumu, kas neļauj granulām salipt kopā. Iegūtās granulas tika žāvētas un apdedzinātas divās temperatūrās – 950 °C un 1050 °C. Kā pretsalipšanas aģentu izmantojot mālus vai kūdru, tika attiecīgi iegūti granulveida materiāli, kas apzīmēti kā PKG-M un PKG-K.

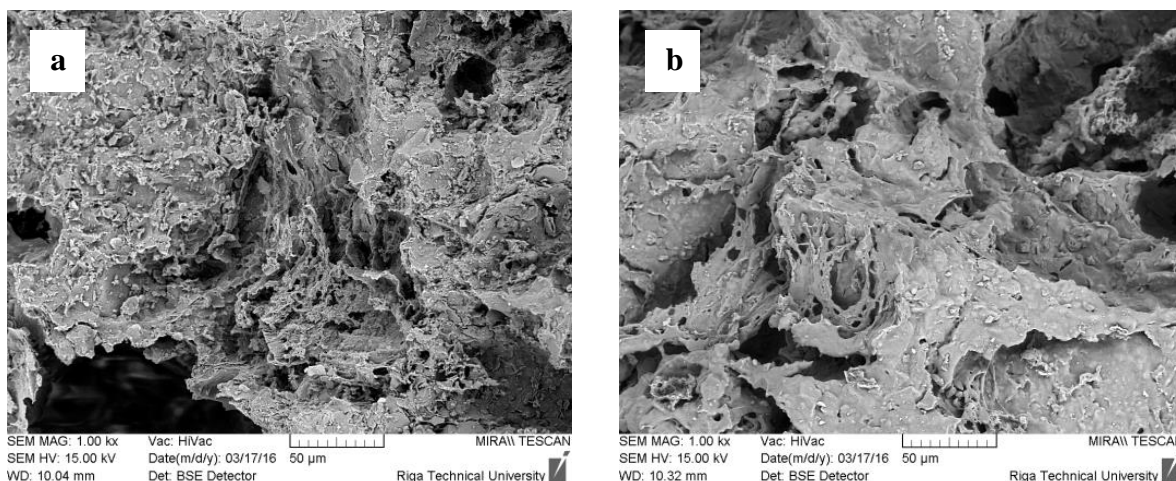
Aplūkojot iegūtās granulas digitālajā optiskajā mikroskopā, var konstatēt, ka PKG forma atšķirībā no iegūtām KDG ir tuvāka sfēriskai formai bez izteiktiem izvirzījumiem (3.11. a un c att.). Mālu pulveris uz PKG-M veido blīvāku apvalku, savukārt PKG-K gadījumā, kūdras pulveris, granulas termiski apstrādājot, izdeg, veidojot attīstītu virsmu (3.11. c un d att.). Granulu šķērsgriezumā (3.11. b un d att.) var labi novērot poras ar izmēriem diapazonā no 50 μm līdz 300 μm.

Attīstīta poraina struktūra veidojas visā granulas tilpumā, par ko liecina granulas drumstalas SEM attēli (3.12. att.). Palielinot apdedzināšanas temperatūru no 950 °C līdz 1050 °C, virsmas morfoloģija mainās. Notiek intensīvāks saķepināšanās process, daļa no porām saplūst, novērojamas plākšņu veida daļiņas un izteikti padziļinājumi starp tām.



3.11. att. Optiskās mikroskopijas attēli: PKG-M (a, b) un PKG-K (c, d) virsmas (a, c) un šķērsgriezums (b, d) pēc apdedzināšanas 950 °C.





3.12. att. SEM attēli PKG-K paraugam pēc apdedzināšanas:  
a) 950 °C; b) 1050 °C temperatūrā.

3.6 tabula

PKG-M, PKG-K un KDG (apdedzinātas no 950 °C līdz 1050 °C temperatūra)  
spiedes stiprība, īpatnējā virsma un atvērtā porainība

Paraugs	Spiedes stiprība, N		Īpatnējā virsma, m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>		Porainība,%	
	950 °C	1050 °C	950 °C	1050 °C	950 °C	1050 °C
PKG-K	11,0 ± 1,5	13,0 ± 2,5	1,98	0,93	74	66
PKG-M	13 ± 2	14 ± 3	1,91	0,90	55	32
KDG	13 ± 2	16 ± 4	1,44	0,49	23	20

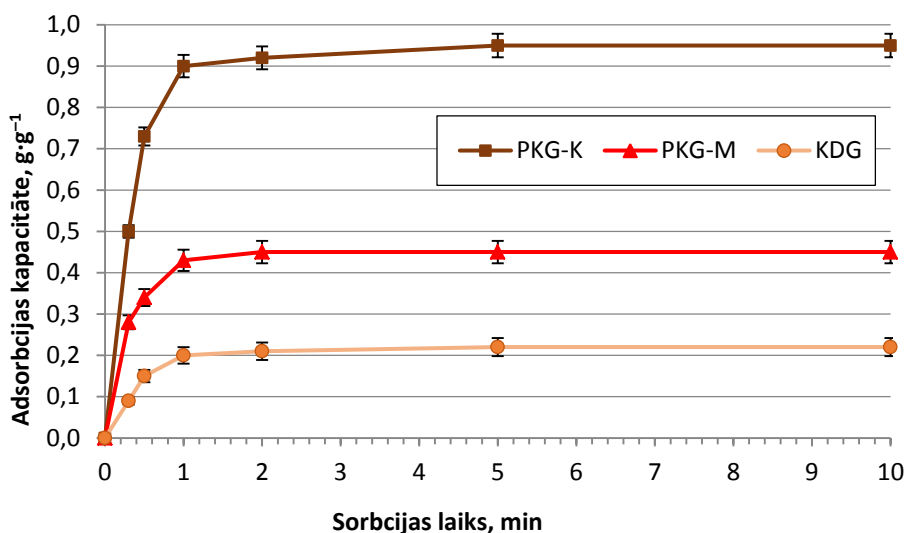
Iegūtajām PKG tika noteikti: mehāniskā izturība spiežot, īpatnēja virsma un porainība (3.6. tab.). Kā redzams, PKG raksturojas ar praktiski tādu pašu spiedes stiprību kā KDS, tajā pašā laikā īpatnējā virsma ir vidēji par 25 % un porainība par 100 % līdz 200 % lielāka.

### 3.4.2. Naftas produktu saistīšana ar PKG

Bija interesanti noskaidrot, vai iegūtās PKG varētu izmantot dažādu organisku piesārņojumu, tai skaitā naftas produktu saistīšanai.

Iegūtās PKG-K, PKG-M un KDG apdedzināšanas 950 °C un 1050 °C temperatūrā tika izmantotas naftas produktu (benzīns, dīzeļdegviela, motoreļļa) saistīšanai. Sākotnēji tika novērtēta dažādu PKG sorbcijas kinētika, par modeļvielu izmantojot dīzeļdegvielu (3.13. att.).

Kā redzams, adsorbcijas kinētikas sakarībām visos gadījumos ir vienāds raksturs. Maksimālā adsorbcijas kapacitāte tiek sasniegta jau 2–3 min laikā. Kā to varēja sagaidīt, vislielākā adsorbcijas spēja ir PKG-K, kas raksturojas ar lielāko porainību (74 %) un attīstītu ārējo virsmu. Sorbcijas kapacitāte PKG-K gadījumā ir divas reizes lielāka, salīdzinot ar PKG-M, un vairāk nekā četras reizes lielāka par KDG.



3.13. att. Dīzeļdegvielas adsorbcijas kinētika uz keramikas granulu (PKG-K, PKG-M un KDG, kas ir apdedzināti 1050 °C temperatūrā) virsmām.

Lai varētu spriest par iespējamo naftas produktu adsorbcijas mehānismu, ar zināmu tuvinājumu tika izmantots Vēbera–Morisa adsorbcijas kinētikas difūzijas modelis. Adsorbentiem ar attīstītu poru sistēmu, kuru izmērs ļauj sorbāta molekulām iekļūt keramikas iekšienē un izvietoties, adsorbcijas ātrumu limitē sorbāta difūzija adsorbenta porās. Šajā gadījumā adsorbētās vielas daudzums  $q_t$  laikā  $\tau$  ir proporcionāls  $\sqrt{t}$ , un sakarība  $q_t = f(\sqrt{t})$  ir lineāra [23]. Šajā pētījumā sakarības  $q_t-t^{0.5}$  Vēbera–Morisa vienādojuma koordinātā nebija lineāras. Grafikā bija novērojami divi izteikti apgabali, kas liecina par adsorbcijas kinētikas jauktas difūzijas raksturu.

Pirmais etaps raksturo molekulu difūziju no tilpuma uz sorbenta virsmu, otrais etaps – molekulu difūziju adsorbenta porās (masas pārneši iekšējās difūzijas rezultātā). Analizējot iegūto sakarību  $q_t-t^{0.5}$  raksturu, var izdarīt secinājumu, ka visu trīs granulu (PKG-M, PKG-K un KDG) gadījumā ir novērojams vienāds sorbcijas procesa raksturs.

3.7. tabula

Dažādu naftas produktu sorbcijas kapacitātes PKG-M, PKG-K un KDG, iegūtas apdedzināšanas 950 °C un 1050 °C temperatūrā ( $T_{\text{apdz}}$ )

Viela	Benzīns		Dīzeļdegviela		Motoreļļa	
	950 °C	1050 °C	950 °C	1050 °C	950 °C	1050 °C
<b>Paraugs</b>	Sorbcijas kapacitāte, g·g <sup>-1</sup>					
PKG-K	0,83	0,74	0,95	0,93	1,05	0,95
PKG-M	0,38	0,35	0,45	0,43	0,55	0,46
KDG	0,20	0,21	0,22	0,23	0,32	0,20

Salīdzinot paraugu sorbcijas spēju dažādiem naftas produktiem, novērojams, ka augstāko sorbcijas spēju uzrāda PKG-K, kā redzams 3.7 tabulā. Sorbcijas kapacitāte (g·g<sup>-1</sup>) pieaug šādi: benzīns, dīzeļdegviela, motoreļļa, kas acīmredzot ir saistīts ar vielu blīvumu šajā rindā, kas attiecīgi 20 °C temperatūrā ir 0,73 g·cm<sup>-3</sup>, 0,81 g·cm<sup>-3</sup> un 0,83 g·cm<sup>-3</sup>.

### 3.4.3. PKG izmantošana augsnes mitruma uzturēšanai

Ņemot vērā to, ka uz planētas pieaug saldūdens deficīts, tajā skaitā lauksaimniecībā izmantojamā, rodas pieprasījums pēc materiāliem, kas uztur augsnes mitrumu. Pateicoties samērā lielajai īpatnējajai virsmai un porainībai (3.6. tab.), PKG varētu izmantot augsnes mitruma regulēšanai.

Eksperimentiem tika izmantota modeļaugzne (MA), kas sastāvēja no 92,5 % smilšu un 7,5 % sijātas kūdras. Lai noteiktu pētītā materiāla mitruma saistīšanas kapacitāti, tika izmantota MA, kas sajaukta ar darbā pētītajiem sorbentiem (MA + PKG-K, MA + KDG), un references paraugiem ar perlītu (MA + P) un keramzītu (MA + Ker). Pievienoto sorbentu koncentrācija bija 30 tilpuma % no kopējā MA tilpuma.

3.8. tabula

Augsnē aizturētais un sorbentos saistītais mitrums

Parametrs	MA	MA + KDG	MA + Ker	MA + PKG-M	MA + PKG-K	MA + Perlīts
$M_{\text{augš}} + M_{\text{sorb}}, \text{ mL}$	105	107	112	116	118	127
$M_{\text{sorb}}, \text{ mL}$	–	2	7,5	11	13	22
$M_{\text{sorb}}, \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-3}$	–	0,04	0,15	0,22	0,26	0,44

Aizturētais un sorbentos saistītais mitrums noteikts eksperimentāli, maisījumam pievadot 150 mL ūdens 100 cm<sup>3</sup> MA un 50 cm<sup>3</sup> pētītā sorbenta (3.8. tab.), kā redzams, visintensīvāk ūdens plūsma ir novērojama caur MA. Eksperimenta sākuma posmā cauri iztecējušā ūdens daudzumu var ietekmēt arī slapināšanas parādības. Vidēji pēc 3 min. visos gadījumos tiek sasniegts līdzsvars. Kā redzams 3.8. tabulā, vislabāk ūdeni augsnē saista uzputota perlīta granulas, kas ir salīdzinoši dārgs materiāls. Tajā pašā laikā PKG, kas iegūtas, izmantojot kūdras pārklājumu, par 12 % labāk uztur mitrumu, salīdzinot ar MA bez mitruma uzturēšanas materiāliem, un par 73 % labāk, salīdzinot ar plaši šim nolūkam lietoto *Keramzītu* (MA + Ker).

## 3.5. Porainas keramikas izstrādājumu ražošanas tehnoloģiskā shēma

Promocijas darba īstenošanas laikā iegūtie eksperimentālie rezultāti izmantoti porainas keramikas iegūšanas tehnoloģiskās shēmas izveidošanai.

### 3.5.1. Izejvielu sasmalcināšana un šihtas sagatavošanas shēma

Piegādātās izejvielas sagatavošanu veic ar iekārtām (1)–(8), kā redzams 3.14. attēlā. Mālu (1) un stikla lauskas (2) ievada veltņa drupinātājā (3) un vesera drupinātājā (4) un sadrupina līdz izmēriem, kas mazāki par 25 mm. Sadrupinātos izejmateriālus ievada nepārtrauktas smalcināšanas režīma dezintegratoros (5) un (6), iegūstot daļiņu izmērus robežās no 0,1 mm līdz 1,0 mm. Dezintegratora īpatnējais enerģijas patēriņš  $E_{\text{TP}} = 2,4 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ , iegūst stikla daļiņas ar  $d_{50} = 0,25 \text{ mm}$  un mālu daļiņas ar  $d_{50} = 0,1$ , kā eksperimentāli noteikts 3.1.1. nodaļā. Sasmalcinātos izejmateriālus dozē atbilstoši plānotajam mālu-stikla šihtas sastāvam un vienlaikus ievada nepārtrauktas darbības dezintegratorā (7), kur tos atkārtoti sasmalcina un



sajauc. Dozēšanu var veikt vairākos veidos: gan sinhronizējot izejmateriālu ievadīšanas ātrumus, gan ar papildu materiālu plūsmas ātruma regulatoru ievietošanu starp dezintegratoriem (5)–(7) un (6)–(7). Eksperimentāli noteikts, ka dezintegratora (7) īpatnējais enerģijas patēriņš  $E_{ip} = 4,4 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ . Līdz ar to eksperimentāli noteiktais kopējais īpatnējais enerģijas patēriņš šihtas sagatavošanai  $E_{ip} = 6,8 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ . Sasmalcināto mālu-stikla šihšu ievada uzglabāšanas tornī (8).

### 3.5.2. KDG izgatavošana

KGD ražošanu veic ar iekārtām (8)–(15), kā redzams 3.14. attēlā. Mālu-stikla šihšu, PPS granulas un saistvielu no uzglabāšanas torņiem (8), (9) un (10) ievada periodiskas darbības cilindriskā granulēšanas iekārtā (11) ar iestatītu trešo kritisko ātrumu (3.2. nodaļa), kas raksturo granulu velšanos un brīvo krišanu. Granulēšanas procesa ilgums ir mazāks, salīdzinot ar žāvēšanas un apdedzināšanas procesu. Šī iemesla dēļ sekojoši izvietotās cilindriskā veida granulēšanas (11), žāvēšanas (12) un apdedzināšanas iekārtas (13) ir atdalītas cita no citas, nodrošinot pietiekami efektīvu cilindriskās granulēšanas iekārtas (11) periodisko darbību. Periodiskas darbības cilindriskās granulēšanas, žāvēšanas un apdedzināšanas iekārtas ir iespējams aizvietot ar nepārtrauktas darbības rotācijas tipa cilindrisko granulēšanas iekārtu, kas veic visas trīs funkcijas atbilstoši projektētajam ražošanas apjomam. Šajā gadījumā ne tikai jāveic cilindra garuma, slīpuma leņķa un rotācijas ātruma teorētiskie aprēķini, bet arī jākorrigē atbilstoši projekta mērogam izgatavotās iekārtas darbība.

Ar mālu pārklātās PPS granulas ievada cilindriskā veida rotācijas žāvētājā (12) ar iestatītu žāvēšanas temperatūru  $50\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ievadīšanas procesa laikā atdala pulverveida šihtas pārākumu un sekojoši ievada pārstrādājamā materiāla cilindriskā veida rotācijas žāvētājā (15) ar iestatītu žāvēšanas temperatūru  $50\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$ , no kura izzāvēto materiālu atkārtoti ievada nepārtrauktas darbības dezintegratorā (7) kopā ar tāda paša sastāva mālu-stikla šihšu.

Izzāvētās, ar mālu pārklātās PPS granulas no cilindriskā veida rotācijas žāvētāja (12) ievada cilindriskā veida rotācijas apdedzināšanas krāsnī (13) ar iestatītu apdedzināšanas temperatūru  $750\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$  atkarībā no plānotā KDG lietošanas mērķa. Cilindriskā veida rotācijas apdedzināšanas krāsns (13) garumu un rotācijas ātrumu aprēķina tādu, lai nodrošinātu KDG sildīšanas ātrumu  $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 30 min ilgu izturēšanas laiku apdedzināšanas zonā un sekojošu KDG atdzesēšanu līdz  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Temperatūras intervālā no  $150\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$  izveidotās PPS granulas sadalīšanās (tvaikveida) produktus ievada katalītiskās oksidēšanas iekārtā (14).

Gāzveida oksidācijas produktus ar katalītiskās oksidēšanās procesā iegūtu paaugstinātu temperatūru ievada cilindriskā veida rotācijas žāvētājos (12) un (15) attiecīgi KDG (S1) un pārstrādājamās šihtas (S2) žāvēšanai.

Apdedzināto KDG ievada vibrācijas vai cilindriskā sieta sijāšanas iekārtā (16). Pēc izmēriem sadalītos KDG ievada uzglabāšanas torņos (17).

### 3.5.3. PKG izgatavošana

PKG ražošanu veic ar iekārtām (8), (18)–(29), kā redzams 3.14. attēlā. Mālu-stikla šihru un ūdeni ar elektrolītu no uzglabāšanas torņiem (8) un (18) ievada ar propellera veida maisītāju aprīkotā reaktorā (20). Maisīšanas procesā iegūto šlikeri ievada caur plūsmas kanālu (a) nepārtrauktas darbības dispergatorā (22). Apstrādāto šlikeri ievada caur plūsmas kanālu (b) ar propellera veida maisītāju aprīkotā reaktorā (20), nodrošinot recirkulācijas plūsmu. Recirkulācijas plūsmā ievada nepieciešamo daudzumu putu veidošanas aģentu no uzglabāšanas torņa (19) un vienlaikus ievada kompresorā (23) saspīestu gaisu caur plūsmas kanālu (g) plūsmas kanālā (a), līdz uzputots mālu-stikla šlikeris sasniedz nepieciešamo apjomu reaktorā (20). Šlikerī ievadāmā gaisa kontroli veic procesa laikā, iegūstot paraugus un nosakot burbuļu izmērus ar optiskā mikroskopa palīdzību. Eksperimentāli noteikts, ka viss iegūtais uzputotā šlikera tilpums ir jāapstrādā dispergatorā (22) ne mazāk kā 2–3 reizes pēc kompresorā (23) saspīestā gaisa ievadīšanas projektētajā apjomā, lai sasniegtu projektēto burbuļu izmērus robežās no 50 μm līdz 150 μm.

Sagatavoto šlikeri caur plūsmas kanālu (c) un pretsalipšanas aģentu pārākumā no uzglabāšanas torņa (24) ievada periodiskas darbības cilindriskā granulēšanas iekārtā (25), turpinot recirkulācijas plūsmu caur kanāliem (a) un (b), lai novērstu uzputotā šlikera koalescenci. Sprauslas ar diametru no 1 mm līdz 3 mm pakļauj trieciena veida vibrācijām ar frekvenci robežās no 0,5 līdz 1 Hz, veicinot uzputotā šlikera pilienu atraušanos no sprauslām. Projektētais sprauslas diametrs, uzputotā šlikera plūsmas ātrums, gaisa saturs šlikerī un vibrācijas frekvence ietekmē PKG izmērus un porainību. Pārklātos PKG ievada cilindriskā veida rotācijas žāvētājā (26) ar iestatītu žāvēšanas temperatūru 50–75 °C. Neizlietoto sauso pulverveida pretsalipšanas aģentu ievada uzglabāšanas tornī (24) atkārtotai ievadīšanai periodiskas darbības cilindriskā granulēšanas iekārtā (25).

Izžāvētās PKG ievada cilindriskā veida apdedzināšanas iekārtā (27) ar iestatītu apdedzināšanas temperatūru 750–900 °C atkarībā no plānotā PKG lietošanas mērķa. PKG granulēšanas cikla ilgums ir daudz īsāks nekā žāvēšanas un apdedzināšanas cikla ilgums. Tādēļ iekārtas (25), (26) un (27) ir atdalītas, nodrošinot pietiekami efektīvu cilindriskās granulēšanas iekārtas (25) periodisko darbību, izvairoties no pārāk liela sagatavoto granulu apjoma. Cilindriskā veida rotācijas apdedzināšanas krāsns (27) garumu un rotācijas ātrumu aprēķina tādu, lai nodrošinātu PKG sildīšanas ātrumu 5 °C·min<sup>-1</sup>; 30 min ilgu izturēšanas laiku apdedzināšanas zonā un sekojošu PKG atdzesēšanu līdz 150 °C. Periodiskas darbības cilindriskās granulēšanas, žāvēšanas un apdedzināšanas iekārtas ir iespējams aizvietot ar nepārtrauktas darbības rotācijas tipa cilindrisko granulēšanas iekārtu, kas veic visas trīs funkcijas atbilstoši projektētajam ražošanas apjomam. Šajā gadījumā ne tikai jāveic cilindra garuma, slīpuma leņķa un rotācijas ātruma teorētiskie aprēķini, bet arī jākorrigē atbilstoši projekta mērogam izgatavotās iekārtas darbība.

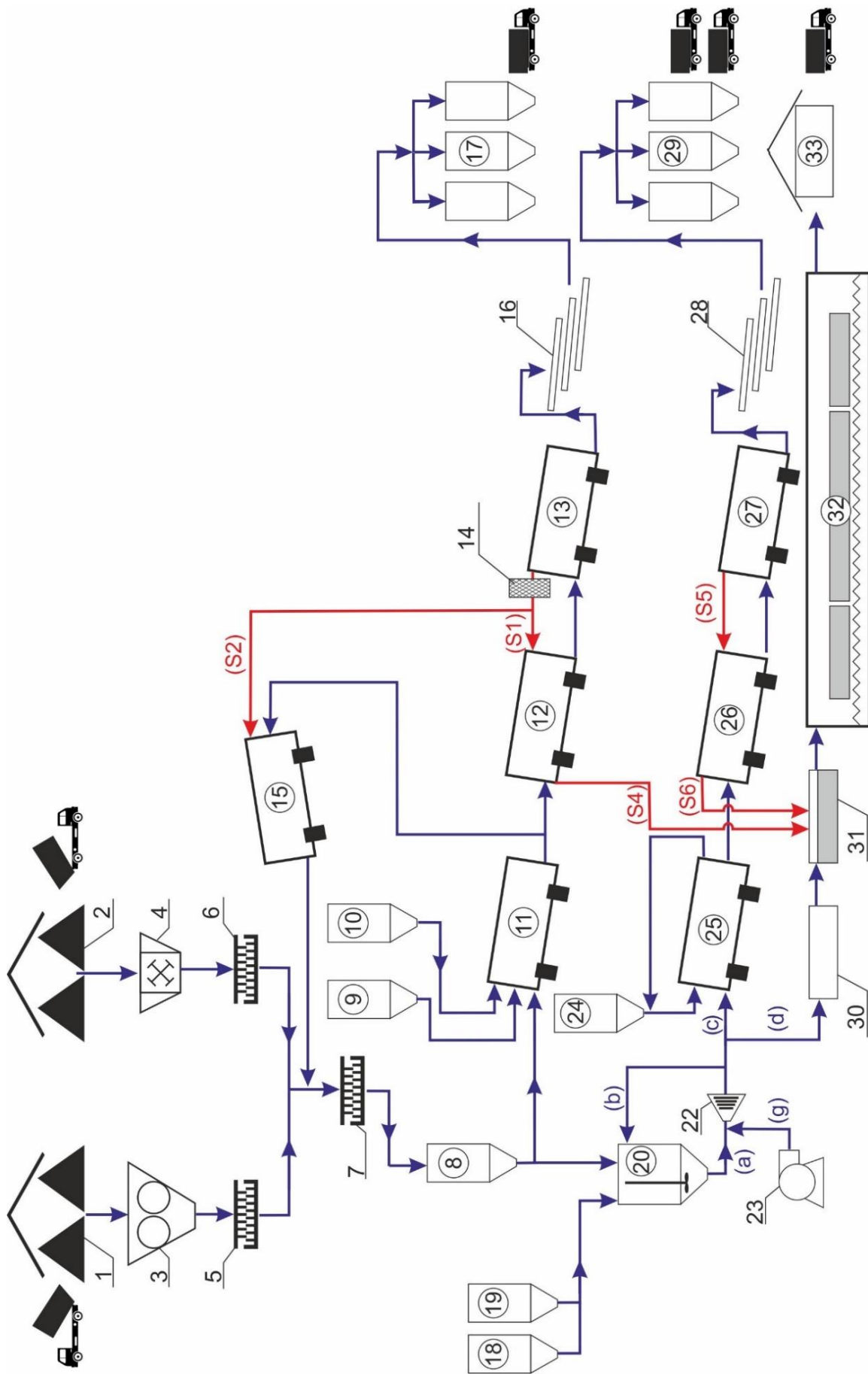
Cilindriskā veida rotācijas apdedzināšanas krāsnī (27) radītās dūmgāzes ievada caur plūsmas kanālu (S5) cilindriskā veida rotācijas žāvētājā (26).

Apdedzināto KDG ievada vibrācijas vai cilindriskā sieta sijāšanas iekārtā (28). Pēc izmēriem sadalītos KDG ievada uzglabāšanas torņos (29).

### 3.5.4. MPK bloka izgatavošana

MPK bloku ražošanu veic ar iekārtām (8), (17)–(21), (27)–(31), kā redzams 3.14. attēlā. Mālu-stikla šihlu un ūdeni ar elektrolītu no uzglabāšanas torņiem (8) un (18) ievada ar propellera veida maisītāju aprīkotā reaktorā (20). Maisīšanas procesā iegūto šlikeri ievada caur plūsmas kanālu (a) nepārtrauktas darbības dispergatorā (22). Apstrādāto šlikeri ievada caur plūsmas kanālu (b) ar propellera veida maisītāju aprīkotā reaktorā (20), nodrošinot recirkulācijas plūsmu. Recirkulācijas plūsmā ievada nepieciešamo daudzumu putu veidošanas aģentu no uzglabāšanas torņa (19) un vienlaikus ievada kompresorā (23) saspiestu gaisu caur plūsmas kanālu (g) plūsmas kanālā (a), līdz uzputots mālu-stikla šlikeris sasniedz nepieciešamo apjomu reaktorā (20). Šlikerī ievadāmā gaisa kontroli veic, procesa laikā iegūstot paraugus un nosakot burbuļu izmērus ar optiskā mikroskopa palīdzību. Eksperimentāli noteikts, ka viss iegūtais uzputotā šlikera tilpums ir jāapstrādā dispergatorā (22) ne mazāk kā 2–3 reizes pēc saspiebtā gaisa ievadīšanas nepieciešamā apjomā, lai sasniegtu projektēto burbuļu izmērus robežās no 50 līdz 150  $\mu\text{m}$ . Sagatavoto uzputoto šlikeri ievada caur plūsmas (d) veidnē (30). Piepildīto veidni ievada žāvēšanas kamerā (31). Atlikušo siltumu no žāvētāja (12) un (26) – plūsmas (S4) un (S6) var izmantot uzputoto materiālu žāvēšanai. Izzāvēto putu keramikas bloku ievada tuneļa veida krāsnī (32). Tuneļa veida krāsns garumu un tajā iebūvēto transportiera ātrumu aprēķina tā, lai nodrošinātu putu keramiska bloka sakarsēšanas ātrumu  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , izturēšanas laiku pie iestatītās apdedzināšanas temperatūras 30 min un atdzesēšanu līdz  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Atdzesētos putu keramikas bloku ievada noliktavā (33).

Piedāvātās KDG, PKG un MPK bloku ražošanas tehnoloģiskas līnijas satur vairākas kopīgas iekārtas sākotnējā stadijā. Viena ražošanas iekārtas komplekta izmantošanu atšķirīgu produktu iegūšanai ļauj samazināt nepieciešamās izmaksas. Izmantojot divus dažādus pretsalipšanas aģentus – pulverveida kūdru un mālus, ir iespējams iegūt divus atšķirīgus produktus: PKG ar blīvu vai porainu ārējo sienu.



3.14. att. Porainās keramikas izstrādājumu (KDG, PKG, MPK bloka) ražošanas tehnoloģiskā shēma.

## SECINĀJUMI

1. Darbā pētīta mālu-stikla keramika, kas satur no 5 % līdz 15 % smalcinātu otrreizējo (Na-silikāta) stiklu un apdedzināta temperatūras intervālā no 700 °C līdz 1050 °C. Konstatēts, ka stikla piedevas samazina mālu keramikas saķepšanas temperatūru vidēji par 60–70 grādiem, turklāt konstatēta kristobalīta fāzes veidošanās 900 °C apstrādes temperatūrā un diopsīda veidošanās, sākot no 800 °C apstrādes temperatūras.
2. Iegūtā mālu-stikla keramika raksturojas ar augstāku spiedes stiprību, tā vidēji ir divas reizes lielāka pie stikla satura >10 %, un apstrādes temperatūras lielākas par 900 °C, salīdzinot ar mālu keramiku bez piedevām. Vienlaikus stikla piedevas visā pētīto sastāvu un apstrādes temperatūru intervālā 2–3 reizes samazina iegūtās keramikas ūdens uzsūci un porainību, kas ir svarīgi, prognozējot materiāla izmantošanas sfēras.
3. Izmantojot pētītos mālu-stikla sastāvus, izstrādāta metode keramisko dobo granulu iegūšanai ar izdegošā šablona metodi, noteikti optimālie granulācijas tehnoloģiskie parametri. Iegūtās granulas raksturojas ar izteikti attīstītu virsmu – noapaļotiem izvirzījumiem, kuru augstums vidēji ir 0,8–1,5 mm. Granulu maksimālā stiprība, spiežot cilindrā, tiek sasniegta pie apdedzināšanas temperatūras 1000 °C un stikla satura šīhtā 13–15%. Iegūtās granulas izmantotas eksperimentālu celtniecības bloku izgatavošanai, kas pēc savas stiprības ir praktiski divas reizes lielāka nekā analogiem keramzīta-betona blokiem.
4. Promocijas darbā pētītas putu keramikas paraugu sorbcijas īpašības, parādīta iespēja izmantot tos kā adsorbentus tekstila krāsvielu saistīšanai no notekūdeņiem. Kā adsorbcijas procesa modelis izmantota sistēmu putu keramika – anjonā *Bezaktiv Turquoise Blue V-G* krāsviela, pētīts iespējama adsorbcijas procesa mehānisms. Izmantojot adsorbcijas kinētiskos modeļus un adsorbcijas izotermu Lengmīra un Freindliha modeļus, secināts, ka krāsvielu sorbcijai uz keramiskā sorbenta virsmas ir sarežģīts raksturs, ko limitē gan ārējās, gan iekšējās difūzijas procesi uz sorbenta aktīvajiem centriem, un ir iespējama arī ķīmiskā mijiedarbība starp tiem.
5. Darbā izpētītas un piedāvātas stikla piedevu saturošas putu mālu keramikas praktiskās izmantošanas iespējas: ar uzputoto materiālu aizpildot mālu celtniecības blokus *Keraterm*, iespējams samazināt to siltumvadītspējas koeficientu līdz pat 20 %. Izmantojot izstrādāto granulācijas metodi, no uzputotā materiāla tika iegūtas divu veidu granulas, kas raksturojas ar labu naftas produktu saistīšanas spēju, līdz pat  $0,95 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  PKG-K gadījumā. Iegūtās granulas var tikt izmantotas augsnes mitruma uzturēšanai, to ūdens uzturēšanas spēja sasniedz  $0,26 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-3}$ , kas atpaliek no perlīta ( $0,44 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ), taču pārsniedz plaši izmantotā keramzīta ūdens uzturēšanas spēju ( $0,15 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ).
6. Pamatojoties uz promocijas darbā veiktajiem pētījumiem un iegūtajiem rezultātiem, izveidota iespējamā tehnoloģiskā shēma darbā izstrādāto produktu rūpnieciskai ražošanai.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] V. Segliņš, 'Valsts pētījumu programmas projekta "Zemes dzīles" svarīgākie rezultāti un perspektīvas', *Mater. Sci. Appl. Chem.*, vol. 29, no. 29, p. 7, Feb. 2014.
- [2] Anne Marie Mohan, 'EU glass packaging recycling rate is stable at 74% | Greener Package', 2019. [Online]. Available: [https://www.greenerpackage.com/recycling/eu\\_glass\\_packaging\\_recycling\\_rate\\_stable\\_74](https://www.greenerpackage.com/recycling/eu_glass_packaging_recycling_rate_stable_74). [Accessed: 04-Sep-2019].
- [3] Eurostat, 'Municipal waste landfilled, incinerated, recycled and composted in the EU-27, 1995 to 2015', 2017. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Municipal\\_waste\\_landfilled,\\_incinerated,\\_recycled\\_and\\_composted\\_in\\_the\\_EU-27,\\_1995\\_to\\_2015\\_update.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Municipal_waste_landfilled,_incinerated,_recycled_and_composted_in_the_EU-27,_1995_to_2015_update.png). [Accessed: 19-Oct-2017].
- [4] Eurostat, 'Packaging waste statistics - Statistics Explained', 2017. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging\\_waste\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics). [Accessed: 19-Oct-2017].
- [5] G. Taveri, J. Tousek, E. Bernardo, N. Toniolo, A. R. Boccaccini, and I. Dlouhy, 'Proving the role of boron in the structure of fly-ash/borosilicate glass based geopolymers', *Mater. Lett.*, vol. 200, pp. 105–108, 2017.
- [6] M. Marangoni, B. Nait-Ali, D. S. Smith, M. Binhussain, P. Colombo, and E. Bernardo, 'White sintered glass-ceramic tiles with improved thermal insulation properties for building applications', *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 3, pp. 1117–1125, 2017.
- [7] A. Rincón, M. Marangoni, S. Cetin, and E. Bernardo, 'Recycling of inorganic waste in monolithic and cellular glass-based materials for structural and functional applications', *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 91, no. 7, pp. 1946–1961, 2016.
- [8] M. Marangoni *et al.*, 'Porous, Sintered Glass-Ceramics from Inorganic Polymers Based on Fayalite Slag', *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 99, no. 6, pp. 1985–1991, 2016.
- [9] İ. B. Topçu and M. Canbaz, 'Properties of concrete containing waste glass', *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 2, pp. 267–274, 2004.
- [10] GlassAlliance, 'Statistical report 2018-2019', Brussels, 2020.
- [11] M. A. Abuh, C. A. Agulanna, P. E. Chimezie, and J. U. Bethel-Wali, 'Implications and characterization of waste glass cullet – kaolinite clay ceramics', *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, vol. 23, no. 3, p. 513, 2019.
- [12] O. M. Olofinnade, A. N. Ede, and J. M. Ndambuki, 'Experimental investigation on the effect of elevated temperature on Compressive strength of concrete containing waste glass powder', *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 7, no. 4, pp. 280–291, 2017.
- [13] M. T. Souza, B. G. O. Maia, L. B. Teixeira, K. G. de Oliveira, A. H. B. Teixeira, and A. P. Novaes de Oliveira, 'Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes', *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 111, pp. 60–64, Oct. 2017.
- [14] V. Lakevics, A. Ruplis, and L. Berzina-Cimdina, 'Latvijas mālu sorbtīvās īpašības un pētījumi mālu inovatīvam pielietojumam', *Mater. un lietišķā ķīmija*, vol. 24, pp. 20–25, 2011.
- [15] J. Zhang, Y. Fu, and X. Zeng, 'Compressive properties of open-cell ceramic foams', *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 16, pp. s453–s456, Jun. 2006.

- [16] V. R. Salvini, B. a. Sandurkov, R. F. K. Gunnewlek, D. S. Rosa, and V. C. Pandolfelli, 'Porous ceramics with tailored properties', *Am. Ceram. Soc. Bull.*, vol. 86, no. 3, pp. 9401–9405, 2007.
- [17] V. Mironovs, A. Polyakov, and A. Korjakins, 'A method and facility for preparation of suspensions', LV 14364 B, 2011.
- [18] J. Kers, P. Kulu, D. Goljandin, and V. Mikli, 'Reuse of reinforced acrylic plastic waste in new composite material development', in *Proceedings of the International Conference of DAAAM Baltic 'Industrial Engineering'*, 2006, pp. 267–272.
- [19] Z. Zhang and B. Wang, 'Preparation and properties of clay-based air-permeable and water-retention material', *Procedia Eng.*, vol. 27, no. 2011, pp. 475–481, Jan. 2012.
- [20] O. Muter *et al.*, 'Comparative study on bacteria colonization onto ceramic beads originated from two Devonian clay deposits in Latvia', no. March 2015, pp. 134–140, 2012.
- [21] A. Fluegel, 'Glass viscosity calculation based on a global statistical modelling approach', *Glas. Technol. Eur. J. Glas. Sci. Technol. Part A*, vol. 48, no. 1, pp. 13–30, 2007.
- [22] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Fourth. Oxford: Butterworth Heinemann, 2010.
- [23] W. Weber, J. Morris, and J. Sanit, 'Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution', *J. Sanit. Eng. Div.*, vol. 89, pp. 31–38, 1963.
- [24] A. Ozer, 'Removal of Pb(II) ions from aqueous solutions by sulphuric acid-treated wheat bran', *J. Hazard. Mater.*, vol. 141, no. 3, pp. 753–761, Mar. 2007.
- [25] A. L. Ahmad, C. Y. Chan, S. R. Abd Shukor, and M. D. Mashitah, 'Adsorption kinetics and thermodynamics of  $\beta$ -carotene on silica-based adsorbent', *Chem. Eng. J.*, vol. 148, no. 2–3, pp. 378–384, May 2009.
- [26] С. Лилия, 'Сорбция фосфатидилхолина наноструктурированными полистиролами и кремнийсодержащими материалами', Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2016.
- [27] S. Lagergren, 'Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens', *Handlingar*, vol. 24, no. 4, pp. 1–39, 1898.
- [28] Y. Ho and G. McKay, 'A kinetic study of dye sorption by biosorbent waste product pith', *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 25, no. 3–4, pp. 171–193, Mar. 1999.
- [29] C. Escudero, N. Fiol, I. Villaescusa, and J. C. Bollinger, 'Arsenic removal by a waste metal (hydr)oxide entrapped into calcium alginate beads', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 164, no. 2–3. pp. 533–541, 2009.
- [30] H. Qiu, L. Lv, B. Pan, Q. Zhang, W. Zhang, and Q. Zhang, 'Critical review in adsorption kinetic models', *J. Zhejiang Univ. A*, vol. 10, no. 5, pp. 716–724, May 2009.
- [31] A. Behnamfard and M. M. Salarirad, 'Equilibrium and kinetic studies on free cyanide adsorption from aqueous solution by activated carbon', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, no. 1. pp. 127–133, 2009.
- [32] K. V. Kumar, 'Pseudo-second order models for the adsorption of safranin onto activated carbon: Comparison of linear and non-linear regression methods', *J. Hazard. Mater.*, vol. 142, no. 1–2, pp. 564–567, Apr. 2007.

- [33] Y. S. Ho and G. McKay, 'Pseudo-second order model for sorption processes', *Process Biochem.*, vol. 34, pp. 451–465, 1999.
- [34] I. Langmuir, 'The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. Liquids', *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 39, no. 9, pp. 1848–1906, Sep. 1917.
- [35] Eiropas Komisija, 'Eiropas parlamenta un padomes direktīva 2012/27/es', *Eiropas Savienības Oficiālais Vēstnesis*, 2012. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0027&from=LV>. [Accessed: 10-Aug-2019].
- [36] S. Keraterm, 'Celtniecības bloks KERATERM 25: Lode'. [Online]. Available: <http://www.lode.lv/lv/keramiskie-bloki/keramiskais-celtniecibas-bloks-keraterm-25>. [Accessed: 18-Dec-2016].
- [37] Schlagmann\_Poroton, 'POROTON-S8', 2013. [Online]. Available: <http://www.schlagmann.de/poroton-s-acht>. [Accessed: 10-Dec-2016].
- [38] X. Yang, B. Yang, M. Gao, and C. Ye, 'An internal core cast composite self-insulation foam concrete block and its preparation method', CN 103306422 B, 2013.