

Izglītības un zinātnes ministrija



Studiju un zinātnes
administrācija

Valsts pētījumu programmas “Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides
drošumam (IMATEH)”

1.projekta “Inovatīvi un daudzfunkcionāli kompozītmateriāli ilgtspējīgām būvēm
no vietējām izejvielām”

1.nodevums

**Augstas veiktspējas īpašību cementa kompozītmateriālu ar mikropildvielām
ieguves metodes**

Sagatavoja: Dr.sc.ing. Ģirts Būmanis

Projekta vadītāja: Prof. Diāna Bajāre

Rīga, 2016.gada 21.februāris

SATURS

AKTUALITĀTE	3
EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	4
1. Augstas veiktspējas īpašību cementa kompozītmateriālu ar mikropildvielām granulometriskā sastāva aprēķināšana.....	4
2. Mikropiedevas betona sastāvi.....	7
3. Augstas veiktspējas betona sastāvi.....	11
4. Augstas veiktspējas betona iestrādājamība un mehāniskā stiprība	13
KOPSAVILKUMS	14
LITERATŪRA	16

AKTUALITĀTE

Pasaulē visplašāk pielietotais būvmateriāls ir betons. Betons ir arī otrā plašāk patērētākā **viela** pēc ūdens un gadā vidēji tiek saražotas aptuveni 6 miljardi tonnas betona. Betona rūpniecība izraisa vides problēmas, un lielākā ietekme ir tieši no betona saistvielas ražošanas - cementa rūpniecības [1]. Cementa ražošana ir energointensīvs process, kas galvenokārt ir saistīts ar CO_x, SO_x, NO_x un Hg emisijām augstas temperatūras (900 - 1500°C) nodrošināšanai, izejvielu apdedzināšanas laikā [2]. Pasaulē aptuveni 5-7% no gada laikā cilvēka darbības izraisītajām CO₂ emisijām izraisa tieši cementa rūpniecība. Portlandcimenta ražošanā izdalās 0.8-1.0 t CO₂ uz 1t saražotā cementa klinkera [3]. 2015. gadā Latvijas cementa klinkera ražošanas industrijai CO₂ ekvivalentā emisija sastāda 648 tūkst. t no Latvijā kopēji saražotajām 12820 tūkst. t CO₂ ekvivalenta, kas sastāda 5% no kopējā apjoma [4].

Betons sastāv no cementa, ūdens, smalkās pildvielas (parasti smilts < 4 mm) un rupjās pildvielas (parasti oļi, šķembas 4 – 20 mm) un dažādām piedevām. Pielietojamo piedevu veids un daudzums ir atkarīgs no nepieciešamajām betona īpašībām, piemēram, spēja izolēt siltumu un skaņu, paaugstinātu salizturību un noturību pret apkārtējās vides iedarbību, zemu ūdens caurlaidību utt. Betona piedevas arī var būt vielas, kas paātrina vai palēnina cietēšanu, stabilizatori, plastifikatori, piedevas, kas samazina gaisa un ūdens īpatsvaru, un dispersanti [2].

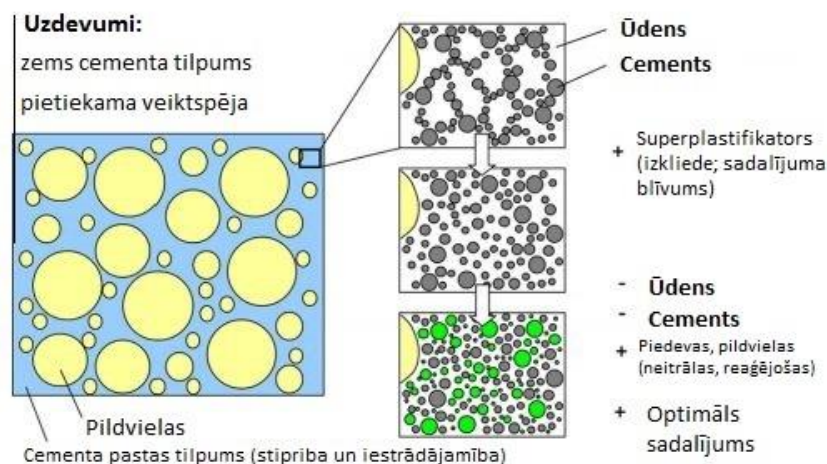
Proske T., Hainers S., Rezvani M. un Graubners C.A., balstoties uz iegūtajiem eksperimentu rezultātiem par videi draudzīgu betonu ar samazinātu ūdens/cementa attiecību, rekomendē paņēmienus, kā iegūt betonu ar samazinātu ietekmi uz vidi [5]:

- izvēlēties cementu ar augstu spiedes stiprību un videi draudzīgām komponentēm;
- samazināt ūdens un saistvielas daudzumu;
- optimizēt betona sastāvdaļu proporcijas.

Pirmais paņēmieni ir augstas kvalitātes cementa izvēle. Cementa ietekmei uz vidi jābūt pēc iespējas zemākai, turpretī stiprības rādītājiem jābūt pēc iespējas augstākiem. Ieteikts pielietot bezpiedevu portlandcimentu (CEM I) ar spiedes stiprības klasi 52.5, kā arī CEM II un CEM III ar stiprības klasi 42.5 un 52.5 [3].

Otrais paņēmieni ir samazināt cementa un cementējošā materiāla daudzumu. Lai sasniegtu nozīmīgu samazinājumu, ierastās betona tehnoloģijas vietā būtu jāizmanto augstas veiktspējas betona (high performance concrete – HPC) veidošanas principi [4], [6]. Cementu var daļēji aizvietot ar citiem cementējošiem materiāliem, kas atstāj mazāku iespaidu uz vidi. Šie materiāli var būt dabiskās izejvielas, ražošanas atkritumi vai blakusprodukti vai tādi, kuru apstrādei nepieciešams mazāks enerģijas patēriņš. Lai betons arī nākotnē būtu konkurētspējīgs būvmateriāls, ir nepieciešams betonu padarīt videi draudzīgāku [1].

Optimāls pildvielu savstarpējais sadalījums ļauj izmantot mazāku ūdens daudzumu betona maisījumā, līdz ar to ir iespēja samazināt ūdens/cementa (Ū/C) attiecību (1.1. att.). Samazinot ūdens daudzumu, tiek panākts stiprības un ilgmūžības pieaugums, un ir iespējams samazināt cementa daudzumu, turpretī daļu no cementa apjoma var aizstāt ar cementējošām mikropildvielām, piemēram, kaļķakmeni, elektrofiltru putekļiem vai izdedžiem. Savukārt betona sastāvā pielietojot augstas veiktspējas superplastifikatorus, palielinās betona maisījuma smalko daļiņu (<0,125 mm) vienmērīga izkliedēšanās un sablīvēšanās (1. att.). Izveidojot optimālu pildvielu savstarpējo sadalījumu, tiek nodrošināts optimāls pildvielu pakojums un zemāka betona ūdens caurlaidība [4], [6].



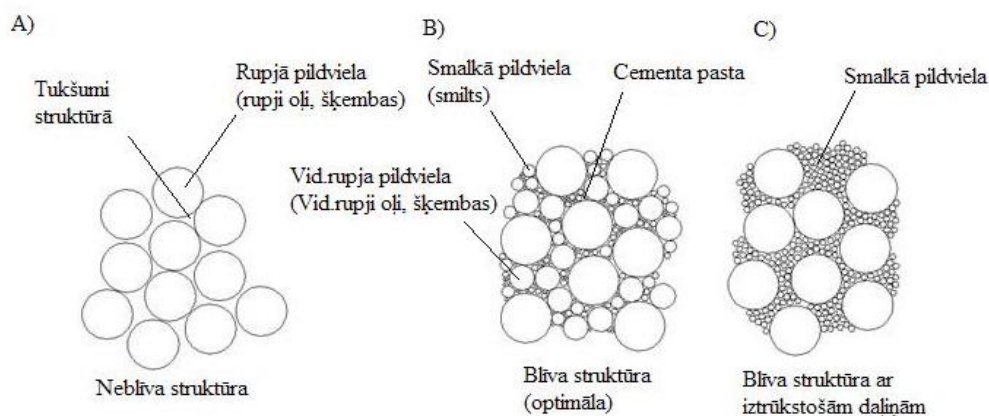
1. att. Izmaiņas struktūrā betona maisījumam ar samazinātu cementa daudzumu [6].

EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

1. Augstas veiktspējas īpašību cementa kompozītmateriālu ar mikropildvielām granulometriskā sastāva aprēķināšana

Veicot sastāva projektēšanu, iepriekš uzstāda prasības betona maisījumam (konsistencei, iestrādājamībai utt.) un sacietējošam betonam (stiprībai, ūdensnecaurlaidībai, salturība utt.), un atkarībā no prasībām izvēlas piemērotus un pieejamus izejmateriālus ar zināmām fizikāli mehāniskajām īpašībām. Projektēšanas gaitā arī ievēro dažādus tehnoloģiskos faktorus betona konstrukciju izgatavošanas laikā (betonēšanas tehnoloģiju, konstrukcijas ģeometriju un stiegrojumu) un ņem vērā attiecīgos ierobežojumus atsevišķiem sastāva elementiem nolūkā nodrošināt konstrukcijas kvalitāti un dažādas papildprasības (homogenitāti, ilgmūžību utt.), piemēram, augstas stiegrojuma pakāpes konstrukcijās lieto smalkgraudainu un plūstošu, viegli iestrādājamu betona sastāvu.

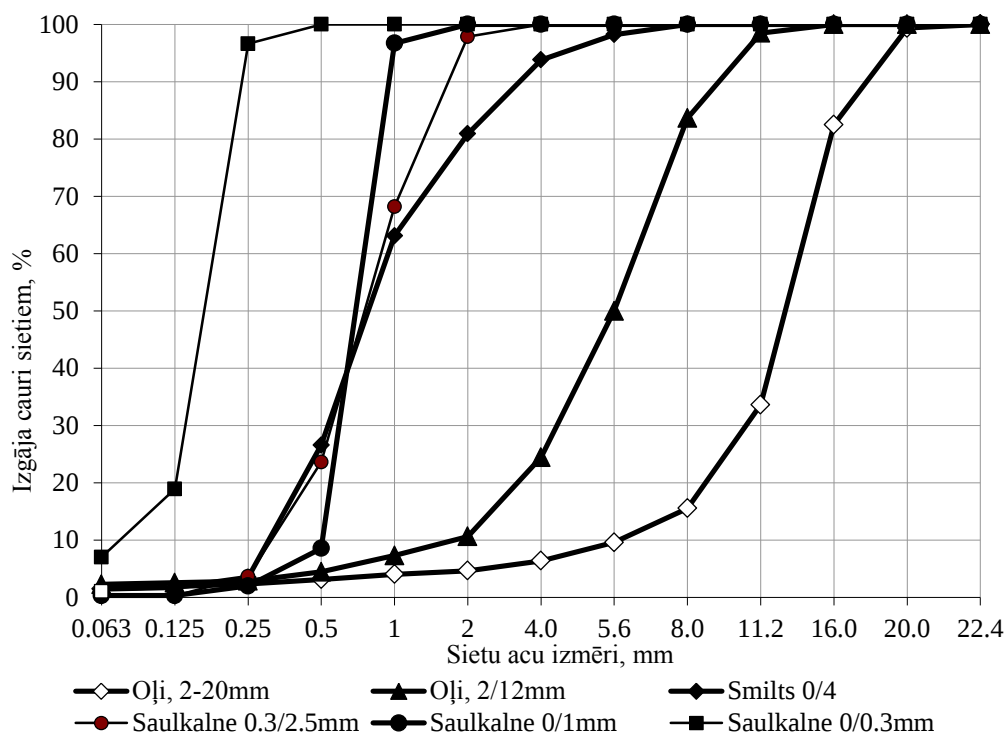
Betona pildvielu granulometrija nosaka daļiņu izvietojumu betona tilpumā un īpaši svarīgi izvēlēties tādu granulometrisku sastāvu, lai betona tilpums tiktu maksimāli aizpildīts, kombinējot dažāda izmēra daļiņas. Rupjās un smalkās pildvielas aizpilda betona tilpumu makro līmenī, savukārt mikropildvielu un cementa uzdevums ir veidot blīvu daļiņu sadalījumu mikro līmenī (100nm...0.1mm). Blīvs daļiņu izvietojums ir viens no nosacījumiem, lai iegūtu betonu ar uzlabotām mehāniskajām īpašībām, kā arī uzlabotu iestrādājamību. Attēlā 1.1 ir attēlots iespējamais daļiņu izvietojums betona struktūrā.



1.1.Att. Daļiņu izvietojums un tilpuma aizpildījums betona struktūrā: A) struktūra ar nepietiekošu smalko daļiņu īpatsvaru; B) Optimāla betona struktūra; C) liels smalko daļiņu īpatsvars, neracionāla un neekonomiska betona struktūra [7].

Augstas veiktspējas betona ilgmūžību būtiski ietekmē mikropiedevas, kas pievienotas betona sastāvā. Tradicionāli betons bez mikropiedevām uzrāda zemākus mehāniskos un ilgmūžības rādītājus, tādējādi, lietojot efektīvas mikropiedevas, iespējams būtiski uzlabot betona kvalitātes rādītājus un iegūt augstas veiktspējas betonus. Mikropiedevu ietekme uz betona īpašībām ļauj optimizēt betona izejvielu kompozīciju, samazinot energoietilpīgu un ekonomiski neizdevīgu materiālu patēriņu ražošanas procesā.

Tradicionālās izejvielas augstas veiktspējas betona izgatavošanai dotas attēlā 1.2. Rupjās pildvielas ir divu frakciju oļi – 2/12mm un 2/20mm. No granulometriskā sastāva līknēm redzams, ka >90% no oļu daļiņām ir lielākas par 2mm frakcijai 2/12mm un >5.6mm frakcijai 2/20mm. Smalkā pildviela – smiltis ir ar frakciju līdz 4mm (smiltis 0/4mm). Aplūkotās smiltis ir skalotas, kas nozīmē, ka tajās nav mālu un putekļu piejaukumu. Tas nozīmē, ka šādām smiltīm trūkst daļiņas, kas <0.250mm. Izņēmums ir smalkās kvarca smiltis 0/0.3mm, kuras sastāv no daļiņām diapazonā no 0 līdz 0.3mm. Lai iegūtu augstas veiktspējas betonu, betonā ir nepieciešamas smalkas smiltis, kas aizpilda betona struktūru līmenī 0.063-0.25mm. Līdz 4mm kā pildviela ir efektīvas skalotas smiltis, savukārt rupjā pildviela – līdz pat 20mm.



1.2.Att. Augstas veiktspējas cementa kompozītu rupjo un smalko pildvielu granulometriskā sastāva līknes.

Aplūkotās izejvielas pēc sava dabiskā granulometriskā sastāva (neskaitot skalošanu, kuras laikā tiek atdalīti putekļu un mālu piemaisījumi) ir piemērotas augstas veiktspējas betona izgatavošanai. Smilts un oļu dabiskā forma, kas ir lodveida, noapaļotām malām, var nodrošināt samazinātu ūdens daudzumu, kas nepieciešams betona iestrādājamības nodrošināšanai, jo noapaļotās pildvielu malas samazina iekšējo berzi svaigā betonā, tas vieglāk plūst un daļiņas savstarpēji mijiedarbojas. Bez minētajiem priekšnoteikumiem ir nepieciešams projektēt izvēlētas pildvielas tā, lai nodrošinātu blīvu daļiņu sadalījumu, maksimāli efektīvu struktūras aizpildījumu (attēls 1.2.). Iespējamās bezgalīgi daudz kombinācijas, kādās var izvēlēties dotās izejvielas, tomēr tikai dažos gadījumos būs optimāli blīvs daļiņu sadalījums betona sastāvā. Lai nodrošinātu pareizu pildvielu proporciju izvēli, pildvielu sastāva aprēķinu rezultātā nepieciešams iegūt tādu pildvielu granulometrisko sastāvu, kas nodrošina blīvu daļiņu pakojumu un dod iespēju sasniegt vajadzīgās betona īpašības. Optimālā granulometriskā sastāva noteikšanai tiek izmantotas ideālās granulometriskās līknes. Pazīstamākā ir Fulera ideālā līkne, kuru jau gandrīz pirms 100 gadiem piedāvāja Fulers un Tompsons. Pēc būtības Fulera līkne ir apgriezta parabola un vispārīgā gadījumā to var aprakstīt ar šādu funkciju:

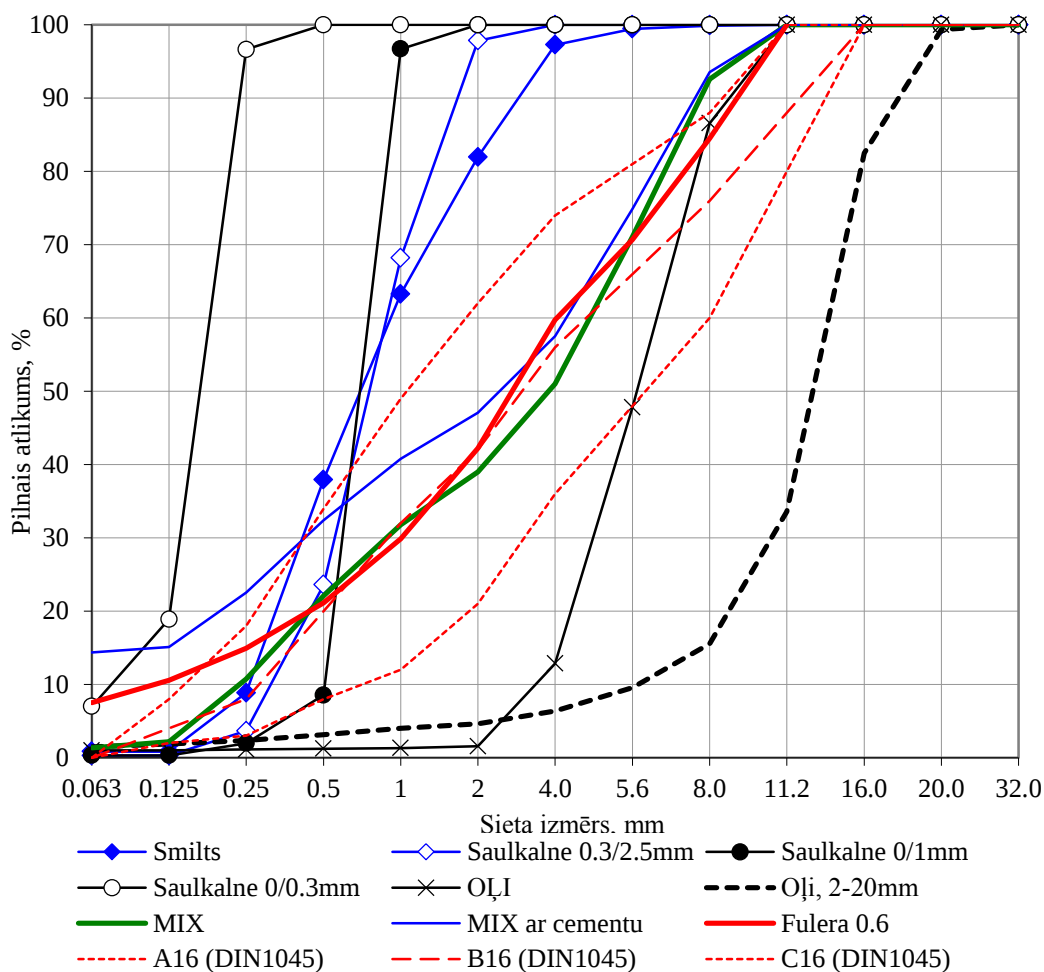
$$YT(I) = \sqrt{D(I)/D_{max}} = (D(I)/D_{max})^2,$$

kur: $D(I)$ - daļiņas izmērs, mm;

$YT(I)$ - teorētiskais (ideālais) daļiņu daudzums, kuru caurmērs ir mazāks par $D(I)$;

D_{max} - rupjākās pildvielas maksimālais izmērs (līknes galapunkts), mm.

Ideālie granulometriskie sastāvi var būt uzdoti arī tabulas veidā vai grafiski kā intervāls starp divām līknēm. Attēlā 1.3 dotas izejvielu granulometriskās līknes, ideālā Fulera līkne, DIN1045 standarta rekomendējamās līknes betona sastāvam, kā arī optimāla līkne, kas iegūta kombinējot esošās izejvielas.



1.3.Att. Augstas veiktspējas cementa kompozītu granulometriskā sastāva līknes ar optimālu daļiņu sadalījumu.

Izejvielu kombināciju attiecību atbilstība Fūlera līknei nodrošina optimālu betona pakojumu. Attēlā redzams, ka iegūtajam betona maisījumam trūkst smalko daļiņu diapazons, ko daļēji nodrošina smalkā smilts 0/0.3mm, tomēr bez šīm pildvielām smalko, mikro līmeni nodrošina galvenokārt cements un mikropiedevas.

2. Mikropiedevas betona sastāviem

Mikropiedevas nodrošina divas būtiskas funkcijas betona sastāvā – uzlabo daļiņu aizpildījumu betona tilpumā, tādējādi padarot betona struktūru blīvu, necaurlaidīgu. Šādi tiek uzlabota betona iestrādājamība un konsistence iestrādāšanas laikā, kā arī sacietējušam betonam mehāniskās īpašības, ilgmūžība uzlabojas betona struktūras rezultātā. Otra pozitīvā īpašība atsevišķām mikropiedevām ir pucolāna īpašības – tieksme reaģēt ar betonā esošajiem vājajiem minerāliem (piemēram, portlandīts – $\text{Ca}(\text{OH})_2$) un veidot noturīgus cementa minerālus, aizpildot betona poras un aizstājot vājos minerālus ar augstākas stiprības minerāliem. Šādi tiek uzlabota betona stiprība un ilgmūžība.

Silīcija dioksīda putekļi, kas plašāk pazīstams kā mikrosilīcijs, ir polimorfs silīcija dioksīds. Tas ir ļoti smalks pulveris, kas tiek iegūts kā blakusprodukts silīcija metāla vai dzelzs silīcija sakausējumu ražošanā, sastāv no sfēriskām daļiņām ar vidējo daļiņu izmēru 150nm. Silīcijs dabā nav atrodams, to parasti iegūst no silīcija dioksīda (SiO_2) un oglekļa (C) reakcijas

silīcija metālu vai ferosilīcija sakausējumu ražošanas laikā. Elektriskās kausēšanas krāsnīs pie temperatūras 1800° - 2000°C tiek kausētas izejvielas – kvarcs (SiO_2), un ogles (C), koksa un šķeldu maisījums. Gada laikā tiek saražotas aptuveni 1,2 tonnas mikrosilīcija, kur 30% tiek piegādāti no ASV, Japānas un Norvēģijas (Polijā aptuveni 10 000 tonnas), tādēļ šis materiāls ir dārgs. Turklāt smalkums un zemais blīvums padara apgrūtināšu to transportēšanu. Tādēļ mikrosilīcijs tiek pielietots īpašu betonu ražošanā [8]. Pētnieciskajā darbā tiek izmantotas trīs veidu mikropieejas: mikrosilīcijs, metakaolīnu saturoši ražošanas blakusprodukti un cenosfēras.

Mikrosilīcijs ir ultrasmalks materiāls ar lodveida daļiņām, kuru izmēra diametrs ir mazāks par 1µm. Vidējais daļiņas izmērs ir 0,15µm, kas ir aptuveni 100 reizes mazāk nekā vidējā cementa daļiņa. Mikrosilīcija masas blīvums atkarīgs no sablīvēšanas pakāpes un mainās no 130-600 kg/m³. Tilpummasa ir 2.2-2.3 g/cm³ robežās. Virsmas laukums atrodas intervālā 15000-30000 m²/kg [9].

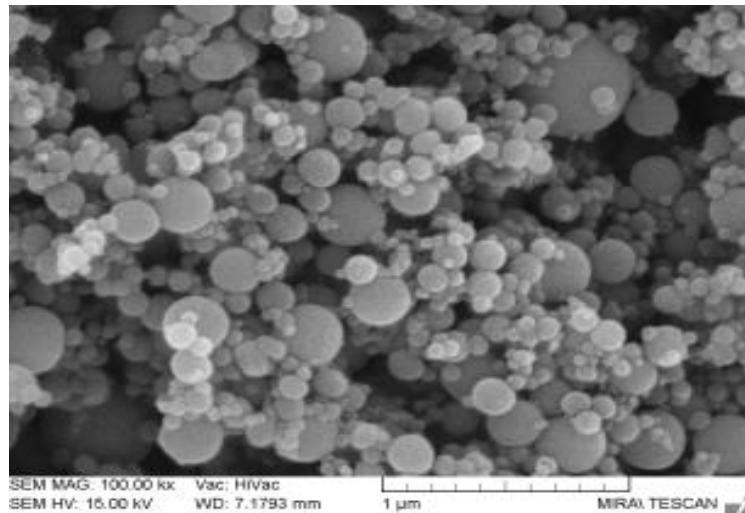
Mikrosilīciju pielieto portlandcimenta betonā, lai uzlabotu tādas īpašības kā spiedes stiprību, saistīšanās spēju, nodilumizturību utt. Betona mehāniskās īpašības tiek uzlabotas gan optimāla pildvielu pakojumu rezultātā, kā arī pucolāna reakcijām, kas noris starp mikrosilīciju un cementa pastā esošo brīvo kalcija hidroksīdu [10].

Ar mikrosilīciju kā papildus cementējošo piedevu ir iespējams iegūt betonu ar spiedes stiprību 100-150 MPa [11]. Rekomendētais un eksperimentāli pierādītais mikrosilīcija pievienošanas daudzums ir 5% - 15% (parasti 10%) no cementa daudzuma [8].

Mikrosilīcijs ietekmē gan svaiga betona maisījuma, gan sacietējoša betona īpašības [12]:

- Iestrādājamību, pievienojot mikrosilīciju, betona konusa nosēdums proporcionāli samazinās, jo mikrosilīcijam ir liels īpatnējās virsmas laukumam, tādēļ jālieto superplastificējošas pieejas.
- Segregācija: mikrosilīcijs ievērojami samazina svaiga betona segregāciju (noslāņošanos), jo brīvais ūdens tiek patērēts, lai samitrinātu lielo mikrosilīcija virsmas laukumu, tādējādi samazinās brīvā ūdens daudzums. Mikrosilīcijs arī aizpilda poras svaigā betonā, tādēļ ūdens no betona tilpuma nevar nonākt līdz virsmai.
- Ilgmūžība, tiek samazināta hlorīdu jonu caurlaidība betonā, tādējādi pasargājot dzelzsbetona stiegrojumu no korozijas, jo īpaši ar hlorīdu bagātā vidē, piemēram, piekrastes rajonos, uz lielceļiem un skrejceļiem, kur tie tiek kaisīti ar sāli, un tiltu konstrukcijās sālsūdens tuvumā.

Pētījumos izmantots Latvijā pieejams Mikrosilīcijs – Elkem, kura daļiņas ir ļoti sīkas, sfēriskas, regulāras formas, salīpušas kopā, veidojot konglomerātus. Vidēji daļiņu izmērs 0.02 – 0.4 µm. Virsmas laukums 7.917 m²/g (BET).



2.1.att. Elkem mikrosilīcija daļiņu forma un izmērs, aplūkots SEM.

Metakaolīns ir pucolāna materiāls, kas rodas dehidroksidējoties māla minerālam kaolīnam. Kaolīns ir smalks, balts, māla materiāls, kuru tradicionāli pielieto porcelāna ražošanā. Kaolīna mālu kalcinē 500°C - 800°C temperatūrā. Pie 100°C - 200°C temperatūras minerālam zūd lielākā daļa no uzsūktā ūdens. Pie 500°C - 800°C temperatūras kaolīns kļūst kalcinēts, zaudējot ūdeni caur dehidroksidēšanos un tiek iegūts metakaolīns [3]. Pie 500°C - 800°C temperatūras diapazona kaolīns kļūst par metakaolīnu ar divdimensiju kristālu struktūru. Lai iegūtu pucolānu, jāpanāk gandrīz gatava dehidroksizācija bez pārkaršanas, tas nedrīkst apdegt. Rezultātā rodas amorfs materiāls ar augstām pucolāna īpašībām, turpretim pārkaršana var izraisīt saķepšanu, degumus, nereaģējošu un ugunsizturīgu materiālu, sauktu par mullītu [3].

Metakaolīnu pielieto vairākos betona veidos [3], [13]:

- augstas veiktspējas un augstas stiprības betonā, vieglbetonā;
- iepriekš saspriegtā betonā;
- ferrocementa un cementa-šķiedru kompozītos;

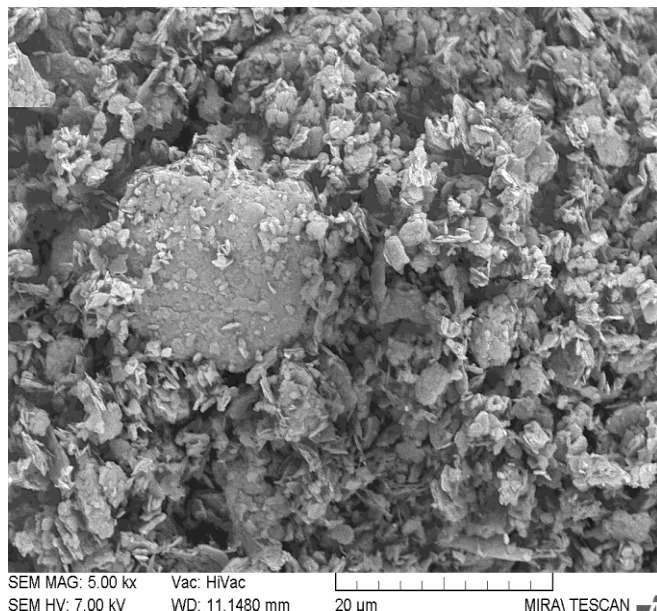
Metakaolīna pielietošanas ieguvumi [14], [15]:

- uzlabojas betona iestrādājamība;
- pateicoties daļiņu sablīvēšanai, iespējams veidot blīvāku betonu;
- paaugstinās cementa kompozīta spiedes stiprība, stiepes un lieces stiprība;
- samazinās caurlaidība, paaugstinās spēja pretoties ķīmiskām vielām, palielinās pretestība ASR reakcijām, uzlabojas sasāļšanas –atkušanas izturība;
- samazinās rukums;
- veidoja gludāka virsma materiālam;

Betona sulfātizturība paaugstinās līdz ar metakaolīna daudzumu betonā. Pētījumi rāda, ka betons ar 10%-15% cementa daudzuma aizstātiem ar metakaolīnu uzrāda ļoti labu sulfātizturību [14].

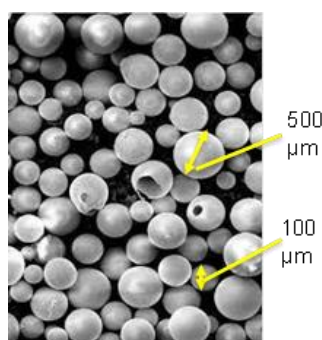
Tīri kaolīna māli un metakaolīns ir augstvērtīgs materiāls, tomēr ir iespējams iegūt metakaolīnu, kas radies citu materiālu ražošanas procesos. Pētījumos izmantoti metakaolīnu saturoši atkritumprodukti, kas paliek pāri pēc stikla granulu ražošanas. Ražošanas nodrošināšanai nepieciešams pievienot kaolīna pulveri, lai nodrošinātu granulu nesalīpšanu. Rezultātā kaolīna māli ražošanas procesa laikā tiek apdedzināti 800-850°C un tiek iegūts metakaolīns, kuru

ražošanā atkārtoti izmantot nevar. Metakaolīna daļiņu forma ir plākšņveida, dominē daļiņas ar garumu/platumu – ap 1-2 μm , to biezums zem 0,2 μm , vienlaicīgi arī ir atsevišķas daļiņas ar platumu/garumu līdz pat 100 μm . Vidēji daļiņu izmērs 1-100 μm . Virsmas laukums 1,586 m^2/g (BET). Metakaolīna ķīmiskais sastāvs: (%): $\text{SiO}_2 > 52$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 42$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 2$, $\text{TiO}_2 > 12$, $\text{MgO} < 1$, $\text{CaO} > 2$, $\text{K}_2\text{O} > 1$.



2.2.att. Metakaolīnu saturošu atkritumproduktu forma un izmērs, aplūkots SEM.

Alumosilikātu cenosfēras (CS) (dobas mikrosfēras ar izmēriem no 10 līdz 500 μm) ir viens no akmeņogļu sadedzināšanas produktiem, kuru strukturālā kvalitāte un tīrība ir palielināta līdz ar pieprasījuma pieaugumu un standarta prasību ieviešanu to pielietošanai dažādās ražošanas nozarēs. CS atbilst F klases CS prasībām (pēc ASTM C 618) un ir ar zemu oglekļa piemaisījumu, kas ir būtisks betona pildvielas kvalitātes rādītājs.



2.3.att. Cenosfēru forma (čaula) un izmērs, aplūkots SEM.

CS izmantošana betona ražošanā ir zināma jau vairāk nekā 50 gadus, tomēr nav līdz galam pilnveidota. Ir zināms, ka CS koncentrācijas palielināšana pie nemainīgas Ū/C attiecības samazina cementa pastas plūstamību. CS pievienošana cementa kompozītos samazina materiāla blīvumu. Izmantojot CS betona sastāvā, tiek mainīts poru sadalījums, kas uzlabo salturības īpašības. CS izmantošana var nodrošināt vieglā betona iegūšanu ar pietiekamu konstruktīvo

stiprību un samazinātu vaļējo poru apjomu, ko var pamatot ar CS bloķējošo iedarbību poru sistēmā. Šāda poru sistēma mazina betona caurlaidības spēju un apgrūtina ceļu ūdens un tā tvaika iekļūšanai betona struktūras tilpumā no virsmas. CS izmantošana par portlandcementsa aizvietotāju padara portlandcementsa betonu mazāk caurlaidīgu kaitīgajiem joniem (koroziju un struktūras uzbrīšanu veicinošiem savienojumiem), to smalkākas frakcijas daļiņu izmēru satura dēļ. Alumosilikātu cenošfēru pucolāniskā reakcijas spēja ir atkarīga no cenošfēru iegūšanai izmantotajām izejvielām un paņēmiena. Šo faktoru ievērošana ir būtiska gan cenošfēru utilizācijai portlandcementsa betonā, gan citos vērtīgos produktos.

Pētījumos izmantoto cenošfēru daļiņu izmērs: 100-500 mikroni, daļiņu blīvums: 0.4 - 0.8 /cm³, ķīmiskais sastāvs: (%): SiO₂ > 55, Al₂O₃ > 31, Fe₂O₃ < 3, TiO₂ > 1.1, MgO < 1, CaO > 2, K₂O > 1.

3. Augstas veiktspējas betona sastāvi

Aprēķinot augstas veiktspējas betona sastāvu, nepieciešams noteikt optimālu pildvielu daļiņu sadalījumu – betona pakojumu (1.nodaļa). Betonam izvēlēto optimālo pakojumu pielāgo kopējam cementa, ūdens, mikropiedevu, plastifikatoru apjomam. Atkarībā no cementa, mikropiedevu un ūdens daudzuma, tiek aprēķināts nepieciešamais pildvielu tilpums katrai pildvielu frakcijai. Betona sastāvu piemēri ir doti Tabulā 3.1. Tradicionāli betonam pievieno ne vairāk kā 350-400 kg/m³ cementa. Šādam betonam tradicionāli Ū/C var būt 0.61 un pazemināt līdz 0.50 ar superplastificējošu piedevu pievienošanu. Lai iegūtu augstas veiktspējas betonu, nepieciešams palielināt cementa daudzumu, pievienot efektīvas mikropiedevas, kā arī samazināt Ū/C. Atkarībā no superplastifikatora daudzuma (C500/0.75 un C500/3.2), var samazināt Ū/C no 0.38 līdz 0.31. Savukārt šim sastāvam, pievienojot mikrosilīcija mikropiedevu, Ū/C palielinās līdz 0.35. Šādi cementa daudzumu var palielināt līdz 700 kg/m³, un Ū/C samazināt līdz 0.29, saglabājot tradicionālo betona izgatavošanas tehnoloģiju. Sastāviem ar mikrosilīciju (C450MS, C500MS, C600MS, C700MS) Ū/C pieaug, jo mikrosilīcija lielais virsmas laukums piesaista papildus ūdeni.

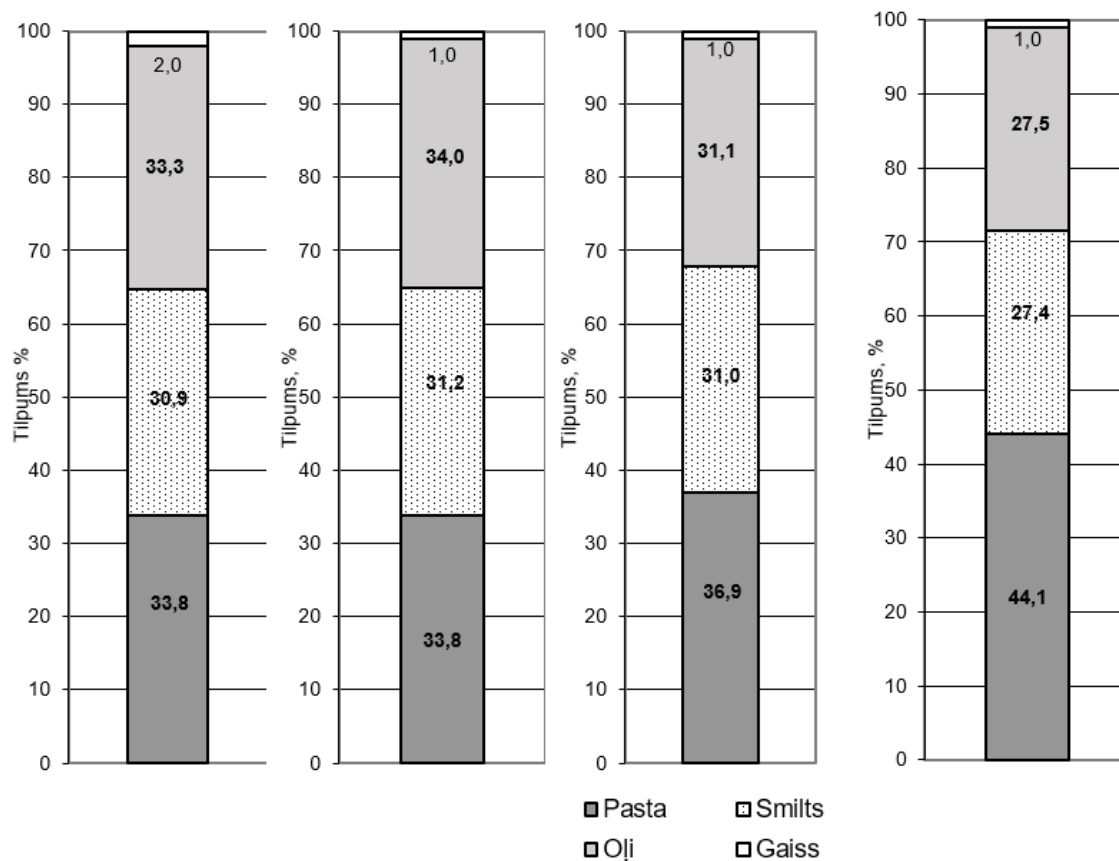
Tabula 3.1.

Augstas veiktspējas un tradicionāli betona sastāvi.

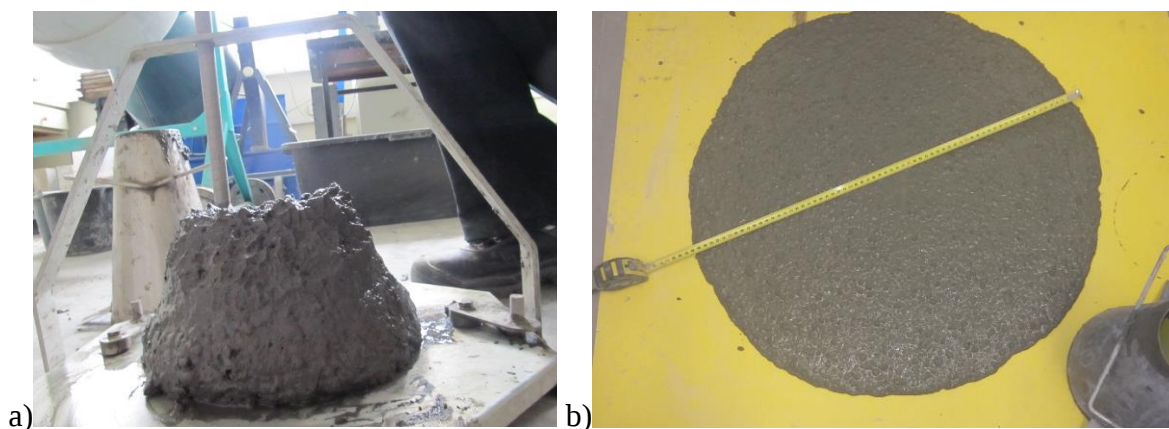
Komponente	Apjoms, kg/m ³							
	C350	C400	C450MS	C500/0.75	C500/3.2	C500MS	C600MS	C700MS
Cements:	350	400	450	500	500	500	600	700
Oļi	990	992	908	908	908	905	803	700
Smilts 0/4	741	801	700	700	700	697	618	540
Saukalne 0/0.3mm	-	-	118	118	118	117	104	91
Mikrosilika	-	-	50	-	-	100	100	100
Ūdens	212	200	165	190	155	176	212	203
Superplast.	0.00	3.2	16.0	4.0	16.0	16.0	20.5	24.0
Ū/C	0.61	0.50	0.37	0.38	0.31	0.35	0.35	0.29

Palielinoties cementa, mikropiedevu daudzumam, proporcionāli pieaug arī cementa pastas tilpums betonā, kā arī samazinās smalko un rupjo pildvielu daudzums betonā (attēls 3.1). Tradicionālam betonam cementa pasta var būt robežās no 30-35%, samazinot šo proporciju, betona struktūra būs rupjgraudaina, iespējami neaizpildīti tukšumi starp smilts un rupjo pildvielu

daļiņām. Normālam betonam ar cementa daudzumu 350kg/m^3 un $\bar{U}/C$ 0.60, pastas, rupjās pildvielas, smalkās pildvielas un gaisa attiecība ir 33.8%:30.9%:33.3%:2.0%. Palielinot cementa daudzumu līdz 400 kg/m^3 , bet samazinot $\bar{U}/C$ līdz 0.50, cementa pastas tilpums un pildvielu tilpums saglabājas proporcionāls iepriekš aplūkotajam sastāvam. Šādiem betona sastāviem raksturīga tradicionāla iestrādāšana – pumpēšana, pēc iestrādes – vibrēšana ar dziļumvibratoriem vai virsmas vibratoriem. Tradicionālajiem betoniem tiek mērīts konusa nosēdums (attēls 3.2. a). Augstas veiktspējas betonam, kuram cementa daudzums ir 500kg/m^3 , $\bar{U}/C$ – 0.38, cementa pastas daudzums palielinās līdz 36.9%, palielinot vēl cementu – līdz 600kg/m^3 un $\bar{U}/C$ 0.35, cementa pastas daudzums sasniedz 44.1%, bet pie 700kg/m^3 un $\bar{U}/C$ 0.29, cementa pastas aizņemtais tilpums būs 51.5%. Attiecīgi rupjās un smalkās pildvielas daudzums betona tilpumā samazinās. Ar šādu betona sastāvu iespējams iegūt augstas veiktspējas cementa kompozītus, kuru iestrādāšanai nav nepieciešama vibrēšana – betonam ir pašblīvējošas īpašības, tādēļ šādam betonam netiek mērīts konusa nosēdums, bet gan konusa izplūde – cik liels diametrs veidojas no betona daudzuma, kas ietilpst standarta konusā (attēls 3.2. b).



3.1.att. Tradicionālā (a, b) un augstas veiktspējas cementa kompozītu (c, d) sastāvdaļu proporcija betona tilpumā. a) 350 kg/m^3 cements, $\bar{U}/C$ 0.6, b) 400 kg/m^3 cements, $\bar{U}/C$ 0.5, c) 500 kg/m^3 cements, $\bar{U}/C$ 0.38; d) 600 kg/m^3 , $\bar{U}/C$ 0.35.



3.2.att. Betona iestrādājamības noteikšana: a) konusa nosēduma mērīšana tradicionāliem betonam; b) konusa izplūdes noteikšana augstu īpašību betonam.

4. Augstas veiktspējas betona iestrādājamība un mehāniskā stiprība

Atkarībā no granulometriskā sastāva, cementa daudzuma, mikropiedevām un Ū/C mainās betona iestrādājamības īpašības. Atkarībā no betona sastāva, iestrādājamības izmaiņas dotas 4.1.tabulā. Tradicionālajam betonam, konusa nosēdums var būt no 18-22cm, kas atbilst viegli iestrādājamam, pumpējamam betonam. Palielinot cementa daudzumu, pievienojot plastifikatorus un mikropiedevas, iespējams iegūt betonu, kuram jāmēra izplūde, to var mainīt no $\varnothing$ 58x60cm līdz $\varnothing$ 86cm. Betona sastāviem ar mikropiedevu mikrosilīciju (sastāvi ar indeksu MS), nepieciešams palielināt ūdens vai superplastifikatoru daudzumu, lai nodrošinātu pašblīvējoša betona īpašības, mikropiedevas lielā virsmas laukuma dēļ.

Veicot tradicionālo betona sastāvu uzlabošanu, palielinot cementa daudzumu, samazinot Ū/C, uzlabojot betona granulometriju un iestrādājamību, tiek iegūta paaugstināta betona spiedes stiprība (tabula 4.1). Tradicionālam betonam tā var būt no 42-47MPa, kā arī atsevišķos gadījumos pārsniegt 60MPa. Augstu īpašību betonam ar pašblīvējošām īpašībām tā var būt 62MPa (bez mikropiedevām), bet ar efektīvām mikropiedevām tā var sasniegt 90MPa ar cementu 450kg/m³, 110MPa ar cementu 500kg/m³ un 120kg/m³ ar 700kg/m³ cementu un mikrosilīcija mikropiedevu.

4.1. tabula

Iestrādājamības un spiedes stiprības īpašību salīdzinājums tradicionālajiem un augstu īpašību betoniem.

Sastāvs	Spiedes stiprība $f_{c,28}$, MPa	Iestrādājamība, konusa izplūde
C350	42	18cm*
C400	47	22cm*
C450MS	90	75x77cm
C500/0.75	62	58x60cm
C500/3.2	80	72x70cm
C500MS	110	76x76cm
C600MS	112.5	83x86cm
C700MS	120	85x85cm

*mērīts konusa nosēdums

Potenciāli perspektīvākie augstu īpašību betona sastāvi ir ar salīdzinoši zemu cementa daudzumu ($<500\text{kg/m}^3$) un efektīvu mikropiedevu izmantošanu. Tā kā mikrosilīcijs ir komerciāls produkts, kas ievērojami uzlabo betona mehāniskās īpašības un ir viena no efektīgākajām mikropiedevām, tā var būt kā atskaites punkts citiem mikropiedevu veidiem, kurus var pievienot betonā. Piemēram, ja mikrosilīcijs aizstāj 10% no cementa (50kg/m^3 mikrosilīcijs un 450kg/m^3 cements), spiedes stiprība pieaug no 68MPa 28 dienā atsaucēs sastāvam ar 500kg/m^3 cementa (C500/0.75), līdz 90MPa (C450MS) (tabula 4.2). Savukārt, ja mikrosilīcija vietā izmanto metakaolīnu saturošus atkritumproduktus, tad spiedes stiprība pielīdzināma atsaucēs sastāvam – 66MPa 28 dienu vecam betonam. Tas ļauj ietaupīt 50kg/m^3 cementa betonā, pielietojot salīdzinoši efektīvu mikropiedevu. Savukārt, ja tiek palielināts plastifikatora daudzums betonā (C500/3.2), tiek samazināta Ū/C, un betonam 28 dienu spiedes stiprība pieaug līdz 80MPa. Šādi ar superplastificējošu piedevu palīdzību vienāda sastāva granulometrijas un cementa daudzuma betonam var uzlabot spiedes stiprības rādītājus. Saglabājot cementa daudzumu 500kg/m^3 betonā, un sastāvam pievienojot 10% mikrosilīciju, iespējams palielināt spiedes stiprību līdz 110MPa (C500MS).

4.2.tabula

Fizikālās un mehāniskās īpašības augstu īpašību betonam.

Sastāvs	Svaiga betona tilpumsvars, kg/m^3	Sacietējuša betona tilpumsvars kg/m^3	Iestrādājamība	Spiedes stiprība $f_{c,7}$, MPa	Spiedes stiprība $f_{c,28}$, MPa
C450MKW	2404	2380	68x67cm	57	66
C450MS	2353	2320	75x77cm	80	90
C500/0.75	2428	2410	58x60cm	56	68
C500/3.2	2392	2380	72x70cm	70	80
C500MS	2410	2400	76x76cm	84	110

KOPSAVILKUMS

VPP projekta “1847. Inovatīvi un daudzfunkcionāli kompozītmateriāli ilgtspējīgām būvēm no vietējām izejvielām” pārskata periodā tika noteiktas augstas veiktspējas īpašību cementa kompozītmateriālu ar mikropiedevām ieguves metodes. Lai sagatavotu metodi, tika veiktas sekojošas aktivitātes:

- 1) Cementa kompozītmateriāla granulometriskā sastāva ietekmes novērtējums uz augstu īpašību betonu izgatavošanu;
- 2) Apzinātas un izpētītas mikropiedevas augstu īpašību betona sastāva uzlabošanai;
- 3) Izpētītas augstu veiktspējas betona sastāvu izejvielu tilpuma attiecības un salīdzinātas ar tradicionālā betona sastāviem;
- 4) Iegūti augstas veiktspējas cementa kompozītmateriālu sastāvi, kuri ir racionāls tradicionālu betonu sastāvu attīstības posms – līdzvērtīgas izejvielas, viegli samaisāms ar tradicionāliem maisītājiem, bet ar uzlabotām iestrādes un mehāniskajām īpašībām;
- 5) Salīdzinātas izstrādāto augstu īpašību betona sastāvu īpašības ar tradicionāliem betona sastāviem – noteiktas iestrādājamības īpašības un spiedes stiprība.

Rezultātā noteiktas optimālas pildvielas augstu īpašību cementa kompozītmateriālu izgatavošanai, par perspektīvām uzskatot noapaļotas formas pildvielu – oļus, ar daļiņu izmēru līdz 11.2mm, smiltis 0/4mm, kā arī smalkas smiltis ar frakciju 0/0.3mm. Papildus minētajām pildvielām noteiktas mikropiedevas, kas var uzlabot cementa kompozīta veiktspēju – iestrādājamību, mehāniskās īpašības, ilgmūžību, par perspektīvāko uzskatot mikrosilīciju, kā arī metakaolīnu saturošus atkritumproduktus, kas var aizstāt cementu augstas veiktspējas kompozītos līdz 10% no cementa masas.

Analizējot betona sastāvus, secināts, ka izstrādātie un pārbaudītie betona sastāvi pēc savas būtības līdzvērtīgi tradicionālajiem betoniem, bet betona iestrādājamības un mehāniskās īpašības ir uzlabotas un augstvērtīgākas. Tas ļauj iegūtos sastāvus reāli izgatavot ar esošo materiālu un iekārtu bāzi, bez radikālām izmaiņām tradicionālajā betona tehnoloģijā. Pētījumu turpinājumā augstu īpašību betona sastāviem tiks noteikti ilgmūžības pētījumi.

LITERATŪRA

- [1] B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 6, pp. 441–454, Dec. 2001.
- [2] V. Bokalders and M. Bloka, *Ekoloģiskās būvniecības rokasgrāmata. Kā projektēt veselīgas, racionālas un ilgtspējīgas ēkas*. Latvija. Biedrība "Domas spēks," 2013.
- [3] R. Siddique and M. I. Khan, *Supplementary Cementing Materials*, vol. 37. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] Fizikālās enerģētikas institūts, "Latvijas siltumnīcefekta gāzu emisiju un piesaistes prognožu līdz 2020. gadam sagatavošana saskaņā ar Eiropas Parlamenta un Padomes lēmumu Nr. 280/2004 EK - Atskaite," no. 280, pp. 1–122, 2011.
- [5] T. Proske, S. Hainer, M. Rezvani, and C. A. Graubner, "Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice," *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 413–421, Sep. 2014.
- [6] D. Gastaldi, F. Canonico, L. Capelli, L. Buzzi, E. Boccaleri, and S. Irico, "An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 61, pp. 29–35, Aug. 2015.
- [7] P. Stroeven and M. Stroeven, "Assessment of packing characteristics by computer simulation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1201–1206, Aug. 1999.
- [8] W. Kurdowski, *Cement and Concrete Chemistry*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- [9] B. W. Langan, K. Weng, and M. A. Ward, "Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 7, pp. 1045–1051, Jul. 2002.
- [10] J. E. Rossen, B. Lothenbach, and K. L. Scrivener, "Composition of C–S–H in pastes with increasing levels of silica fume addition," *Cem. Concr. Res.*, vol. 75, pp. 14–22, Sep. 2015.
- [11] P. C. Aïtcin, *High Performance Concrete*. 2011.
- [12] M. Mazloom, A. A. Ramezani-pour, and J. J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 347–357, 2004.
- [13] A. Elahi, P. A. M. Basheer, S. V. Nanukuttan, and Q. U. Z. Khan, "Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 3, pp. 292–299, Mar. 2010.
- [14] R. Siddique and J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *Appl. Clay Sci.*, vol. 43, no. 3–4, pp. 392–400, Mar. 2009.
- [15] Ş. Yazıcı, H. Ş. Arel, and D. Anuk, "Influences of Metakaolin on the Durability and Mechanical Properties of Mortars," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 12, pp. 8585–8592, Nov. 2014.