Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva svježeg i očvrslog betona

Rako, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:543829

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

ZAVRŠNI RAD

ANTE RAKO

Split, 2017.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva svježeg i očvrslog betona

Završni rad

Split, 2017.

Sažetak:

Beton je građevinski materijal koji nastaje miješanjem većeg broja komponenti: veziva, agregata i vode. Pri izradi betona koriste se još i dodaci ili aditivi koji se dodaju betonu da bi se dobila određena svojstva kao npr. sporije vezivanje, veća čvrstoća itd. U eksperimentalnom dijelu rada analizirali su se rezultati na betonu bez dodataka te na betonu s mineralnim dodacima. Kao dodaci koristili su se metakaolin, silicijska prašina te leteći pepeo.

Ključne riječi:

Beton bez dodataka, metakaolin, silicijska prašina, leteći pepeo, slijeganje, rasprostiranje, VB metoda, tlačna čvrstoća, ultrazvuk.

The effect of mineral additives on the properties of fresh and hardened concrete

Abstract:

Concrete is a building material that is formed by mixing a large number of components: binders, aggregates and water. In preparing concrete are used such supplements or additives are added to the concrete to obtain certain properties such as, slower curing, greater strength and so on. In the experimental part of the analyzed results to the concrete without additives, the concrete with mineral additives. As additives used were metakaolin, silica fume and fly ash.

Keywords:

The concrete without additives, metakaolin, silica fume, fly ash, shrug, spreading, VB method, compressive strength, ultrasound.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **STRUČNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: **ANTE RAKO**

BROJ INDEKSA: **1579**

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: **Građevinski materijali**

Tema: Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva svježeg i očvrslog betona

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti dodatke koji se dodaju betonu. U eksperimentalnom dijelu rada, potrebno je izraditi betone sa dodatkom metakaolina, silikatne prašine i letećeg pepela, te ih usporediti sa etalonom – betonom bez dodatka. U svježem stanju potrebno je ispitati slijeganje, razastiranje i Vebe vrijeme, a u očvrslom stanju dinamički modul elastičnosti i čvrstoću kod starosti uzoraka od 28 dana.

U Splitu, 17.10.2016.

Voditelj Završnog rada: Izv. prof.dr.sc. Sandra Juradin

SADRŽAJ:

1. UVOD 1
2. CEMENT 3
   2.1. HIDRATACIJA CEMENTA 6
   2.2. HIDRATACIJA GLAVNIH KONSTITUENATA PORTLAND-CEMENTA 7
3. AGREGAT 8
   3.1. PROIZVODNJA AGREGATA ZA BETON 9
   3.2. SVOJSTVA I ISPITIVANJE AGREGATA 11
      3.2.1. GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA 12
      3.2.2. GRANULOMETRIJSKA KRIVULJA 13
      3.3. FRAKCIONIRANJE AGREGATA 13
4. VODA 14
   4.1. VODA ZA NJEGOVANJE BETONA 15
5. LETEĆI PEPEO 16
   5.1. UTJECAJ LETEĆEG PEPELA NA SVOJSTVA CEMENTNIH KOMPOZITA . 16
6. SILIKATNA PRAŠINA 18
   6.1. ZNAČAJKE SILIKATNE PRAŠINE 18
   6.2. UTJECAJ SILIKATNE PRAŠINE NA HIDRATACIJU PORTLAND-CEMENTA 19
   6.3. PRIMJENA I UČINCI SILIKATNE PRAŠINE U CEMENTNOM KOMPOZITU19
7. METAKAOLIN 20

EKSPERIMENTALNI DIO RADA 22

UVOD 23

8. KORIŠTENI MATERIJALI 24
   8.1. CEMENT 24
   8.2. AGREGAT 25
   8.3. VODA 27
   8.4. SUPERPLASTIFIKATOR MasterGlenium Sky 629 28
   8.5. MINERALNI DODACI 28
9. PRIPREMA ISPITNE MJEŠAVINE 34
10. KORIŠTENE METODE 35
   10.1. METODA SLIJEGANJA (Slump Method) 35
   10.2. METODA RASPROSTIRANJA (Flow Method) 36
   10.3. VEBE METODA 40
   10.4. UGRADBA SVJEŽEG BETONA U KALUPE 42
   11. ISPITIVANJA NAKON 28 DANA 43

11.1. ISPITIVANJA TLAČNE ČVRSTOĆE BETONA 43
12. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA **44**
12.1. ISPITIVANJE ČVRSTOĆE BETONA NA PRITISAK **44**
12.2. ISPITIVANJE ULTRAZVUKOM **46**
13. ZAKLJUČAK **49**
14. LITERATURA: **51**

1. UVOD

Beton je građevinski materijal koji nastaje miješanjem većeg broja komponenti: veziva, agregata i vode. Pri izradi betona koriste se još i dodaci ili aditivi koji se dodaju betonu da bi se dobila određena svojstva kao npr. sporije vezivanje, veća čvrstoća itd. Količina zraka se mijenja za vrijeme miješanja i transporta betona, a smanjuje se na konačnu veličinu tek nakon završenog zbijanja. U praksi se beton zbija u kalup ili oplatu, a pri ispitivanju u posudu prikladnog oblika i veličine. Općenito govoreći, beton je nastao kao težnja da se napravi jeftin i čvrst građevinski materijal kojim će se moći brzo i jeftino graditi,uz prihvatljiv vijek trajanja građevine. Prvi je cilj u načelu postignut,dok je trajnost betona mnogo manja nego kod nekih drugih materijala kao što su kamen, staklo i keramika. Agregat je jeftini i inertni materijal koji čini pretežni dio volumena betonske mase.

Veziva su u pravilu mješavina kemijski aktivnih i ne aktivnih tvari koja nakon završenih fizičkih i kemijskih procesa tvori kemijski stabilnu masu i međusobno povezuje zrna agregata. Veziva mogu biti: hidraulična i zračna, umjetne smole i ugljikovodikova veziva. Upotrebom hidrauličnih veziva dobije se takozvani cementni beton, odnosno građevinski materijal s najširom primjenom.

Sastav se odabire tako da se postignu zadovoljavajuća svojstva:

-svježeg betona u svim fazama obrade od miješanja, transporta do ugradnje,

-očvrslog betona s obzirom na čvrstoće i druge mehaničke karakteristike,

-minimalni troškovi za prihvatljivu kakvoću.

Izvođači ga proizvode u centralnoj betonari ili na gradilištu te ugrađuju i kontroliraju postignutu kakvoću. U današnje vrijeme proizvodnja i primjena betona postaje visoka tehnologija i znanost koja traži dobro poznavanje i strogu kontrolu svojstva komponenata i svih faza proizvodnje i primjene.

Razlikujemo normalni,obični ili teški beton. Volumna masa običnog betona kreće se u granicama 2.0 – 4.0 g/cm^3. Najčešće se upotrebljava beton volumne mase oko 2.4 g/cm^3. Beton volumne mase veće od 2.4 g/cm^3 upotrebljava se za specijalne konstrukcije, primjerice za balaste, kao zaštita od radioaktivnog zračenja nuklearnih reaktora i slično. Laki beton obuhvaća sve vrste cementnog betona volumne mase 0.6 – 1.8 g/cm^3. Najčešće se izrađuje od agregata male volumne mase zrna koji se naziva laki agregat. [1], [2].

2. CEMENT

Naziv cement uglavnom podrazumijeva vezivnu komponentu u nekom kompozitnom materijalu, pri čemu se najčešće misli na beton ili mort. Danas se koristi više vrsta cementa. Osim portland-cementa, između ostalog koristi se i bijeli cement, aluminatni ili taljeni cement, metalurški cement, pucolanski cement, bušotinski cement i magnezij-oksikloridni cement.

Cement je hidrauličko vezivo, fino mljeveni anorganski materijal koji pomiješan s vodom daje cementno vezivo. Procesom hidratacije cementno vezivo se veže i otvrdnjava, nakon čega ostaje postojano i ispod vode.

Portland-cement (Slika 1.) je hidraulički cement proizveden mljevenjem u prah klinkera. Sastoji se uglavnom od hidrauličnih kalcijevih silikata, a najčešće sadrži jedan ili više oblika kalcijevih sulfata koji se dodaje tijekom mljevenja. Postupak proizvodnje otkriven je u 19. stoljeću. Na otkriće je utjecala graditeljska ostavština antičke Grčke i Rima kada je graditeljima, za razliku od starih Egipćana, bio poznat postupak dobivanja vapna pečenjem vapnenca. Otkriću cementa znatno su doprinijeli i pokusi građevinskog inženjera Johna Smeatona iz 1756. godine, kojima se trebao pronaći najotporniji mort za obnovu požarom uništenog svjetionika Eddystone u Engleskoj.

Smeaton nije jedini pronalazač hidrauličnog veziva, jer su i drugi u isto vrijeme proizvodili slična veziva. U Hrvatskoj su prvu tvornicu cementa izgradili 1856. godine Gillardi& Betizza u Splitu.

Cement se uglavnom proizvodi u rotacijskim pećima suhog postupka, a mokri postupak se sve rjeđe primjenjuje. U početku se proizvodnja obavljala u vertikalnim pećima sličnim pećima za vapno. Danas su vertikalne peći sasvim napuštene, ponajviše zbog nejednolikog pečenja.

Proizvodnja portland-cementa tehnološki je proces u kojem polazna sirovina bitno izmijeni svoj sastav i svojstva transformirajući se u portland-cementni klinker.

Klinker uslijed mljevenja s gipsom u primjeni (uz dodatak vode) kao cementno vezivo (cementna pasta) ponovno mijenja sastav. Taj niz promjena može se prikazati shemom koja ujedno upućuje i na osnovni oksidni sastav sirovinske smjese za proizvodnju portland-cementnog klinkera:

sirovina→ PC klinker→cementna pasta

Sastav:

CaO, SiO_2→C_3S, C_2S→C-S-H

Al_2O_3, Fe_2O_3→C_3A, C_4AF→AF_m, AF_t faze

Glavne sirovine za proizvodnju portland-cementa su vapnenac i glina. Tvornice se grade u neposrednoj blizini nalazišta vapnenca, odnosno prirodne mješavine vapnenca i gline. Glina treba imati odgovarajući sastav te se uobičajeno dovozi s udaljenog nalazišta. Po potrebi, mješavini prirodnih sirovina mogu se dodati tvari za korekciju sastava. Prirodna mješavina vapnenca i gline prikladna za proizvodnju cementa je lapor ili tupina. U svrhu postizanja optimalnog sastava, laporu se dodaje odgovarajuća količina vapnenca ili gline. Najveća nalazišta lapora pogodnog za proizvodnju cementa su u okolici Splita i Novosibirska u Rusiji.

Glavne razlike mokrog postupka proizvodnje u odnosu na suhi su sljedeće:

a) vapnenac i glina se ne suše,već se doziraju u mlin prirodno vlažni. U mlin se dodaje voda te iz mlina izlazi žitki mulj u kojem su sve krute čestice fino samljevene
b) mulj se u cilindričnom silosu homogenizira i uvodi direktno u prostor za sušenje. Budući da zahtijeva puno više energije nego suhi, mokri postupak se gotovo i ne koristi.

Procesi u rotacijskoj peći formiraju se u tri zone zavisno o temperaturi, i to:

1.zona – sušenje i zagrijavanje sirovine, temperatura 400 – 700 °C
2. zona – disocijacija $MgCO_3$ i $CaCO_3$, temperatura 900 – 1100 °C
3. zona – sinteriranje, temperatura oko 1450 °C

Prema vrsti, odnosno sastavu, cemente možemo podijeliti na:

CEM I – portland-cement

CEM II – portland-cement s miješanim dodatkom

CEM III - cement sa zgurom visokih peći (metalurški cement)

CEM IV - pucolanski cement

CEM V - miješani cement

Posebne vrste cementa



Slika 1. Portland cement [10]

Kvalitetu cementa se definira pomoću mehaničko-fizikalna svojstva:volumna masa,gustoća, finoća mliva,vlaga,postojanost volumena,vezanje,mehaničke čvrstoće, skupljanje i bubrenje.

[1], [2].

2.1. HIDRATACIJA CEMENTA

U portland–cementu postoje četiri glavna minerala koji utječu na ukupan kemijski proces: trikalcijski aluminat, alit,belit i celit. Zbog toga određeni mineral hidratizira nešto drugačije bez prisustva ostalih minerala. Osim toga, na cijeli proces utječu i primjese, odnosno sporedni minerali i oksidi, što otežava definiranje.

Uslijed dodira s vodom trikalcijski aluminat jako brzo hidratizira.Takva hidratacija dovela bi do vrlo brzog vezanja, tj. do smanjene obradivosti svježeg betona zbog čega kristalni trikalcijski aluminat nije poželjan u cementu. Trikalcijski aluminat glavni je nositelj čvrstoće cementnog kamena kroz prva 24 sata nakon kontakta s vodom.

Alit doprinosi ranom razvoju čvrstoće cementnog kamena, posebno prvih sedam dana. Nakon 28 dana je njegov doprinos neznatan.

Za razliku od alita, belit doprinosi razvoju čvrstoće cementnog kamena uglavnom jednoliko tijekom prvih 28 dana.Glavni je nositelj razvoja čvrstoće tog perioda. Budući da kristali alita i belita nisu u potpunosti stabilni, tijekom vremena se mijenjaju.

Feritna faza celita pri hidrataciji daje različite hidrate. U malim količinama spaja se sa sadrom i čak s finim česticama vapnenca. Ipak, većina hidrata je slična onima pri hidataciji trikalcijskog aluminata, ali ne mogu stvarati etringit u očvrslom cementnom kamenu.Feritna faza doprinosi čvrstoći cementnog kamena podjednako u svim periodima te njezin utjecaj na brzinu razvoja čvrstoće, u pravilu ,nije primjetan.

U kontaktu cementnih minerala s vodom stvaraju se potpuno novi minerali – hidrati, a kemijski procesi koji se tad događaju nazivaju se hidratacija cementa u širem smislu. Pod hidratacijom cementa u širem smislu obuhvaćena su dva osnovna procesa, pri čemu se oslobađa toplina. Prvi proces obuhvaća hidrataciju u užem smislu, odnosno postupak direktnog spajanja minerala s vodom. Nakon toga slijedi hidroliza, tj. raspadanje minerala u kontaktu s vodom uz njihovo istodobno spajanje u hidrate.

Procesom hidratacije mješavini anhidritnog portland-cementa i vode se povećava gustoća do potpunog skrućivanja,tj. struktura se iz tekuće potpuno mijenja u viskozno-elastičnu čvrstu strukturu koja je sposobna izdržati opterećenja pritiska bez velikih deformacija. Ugušćavanje je praćeno smanjenjem poroznosti, a očvršćavanje vodi razvoju konačnih mehaničkih svojstava. Reakcija hidratacije se odvija sve dok ne ponestane ili reaktanata ili slobodnoga prostora za formiranje hidratacijskih produkata. Napredovanje hidratacije cementa odražava se na razvoj kemijskih, fizikalnih, mehaničkih i električnih svojstava cementne paste ili betona, što je temelj za eksperimentalno praćenje hidratacije – mjerenje promjena kemijskog sastava, entalpije, brzine prolaska ultrazvuka, promjene volumena te promjene u konzistenciji i čvrstoći cementne paste. Kao i kod pojedinačnih minerala portalnd-cementnog klinkera,pojednostavljen, ali uobičajen način za praćenje napredovanja reakcija hidratacije portalnd-cementa jest registriranje krivulje razvijanja topline. Iako te krivulje ne daju reprezentativan odgovar na mehanistička pitanja, korisne su za korelaciju eksperimentalnih podataka prema pojedinačnom parametru,tj. .razvoju topline dQ/dt. [1].

2.2. HIDRATACIJA GLAVNIH KONSTITUENATA PORTLAND-CEMENTA

Da bi se razumjelo razvijanje fizikalnih svojstava cementnog veziva i djelovanje pojedinih vrsta dodataka za beton, potrebno je poznavati glavne aspekte hidratacije portland-cementa i karakteristike očvrsnule cementne paste. Sistem cement/voda u kojem se odvija reakcija hidratizacije sastoji se od velikog broja anhidrita (spojeva koji nastaju iz kiselina kad im se oduzme jedan ili više molekula vode),velikog broja krutih hidratiziranih spojeva i vodene otopine bogate raznim ionima. Tako kompleksnoj smjesi još je i danas teško definirati pojedine faze i ustanoviti uvjete postizanja ravnoteže.Budući da se hidratacija cementa može shvatiti kao reakcija između individualnih konstituenata nehidaratiziranog cementa i vode, potrebno je upoznati prvo jednostavnije sisteme, tj. definirati tok hidratacije pojedinih glavnih konstituenata portlandcementnog klinkera. Zbog toga što je portland cement složeni kompozit i proces njegove hidratacije vrlo je kompliciran, najprije treba pojedinačno promotriti hidrataciju za C_3S (alit), β-C2S (belit), C_3A (aluminatnu fazu) te C_4AF (feritnu fazu). Poznavanje reakcija hidratacije pojedinih konstituenata klinkera osnova je za interpretaciju kompleksnih reakcija koje se zbivaju u hidratizirajućem cementu u različitim uvjetima. [2].

3. AGREGAT

Agregat za obični beton dobiva se od kamena, zbog čega se često naziva kameni ili mineralni agregat. Može biti prirodni ili umjetno drobljen.

Prirodni agregat nastaje raspadanjem kamenih masiva. Raspadnute komade stijene valjaju potoci i rijeke, pri čemu se one dalje drobe i bruse.Iz tog razloga su zrna iz riječnih nanosa najbolje kvalitete jer su lošiji i krhkiji dijelovi razbijeni i odneseni vodom, a preostala zrna su zaobljena. Iako se nanosi agregata nalaze u samom riječnom koritu, čitave riječne doline često su prekrivene debelim slojem agregata različite krupnoće zrna.Prirodni agregat nastaje i djelovanjem ledenjaka koji također valjaju, drobe i bruse komade stijena i ostavljaju ih na svom donjem kraju u obliku ledenjačkog ili glacijalnog nanosa oblika jezika. Prirodni agregat sa zaobljenim zrnima naziva se i šljunak.

Umjetno drobljeni agregat dobiva se drobljenjem stijena u drobilicama. Najčešći naziv je samo drobljeni agregat, a stariji naziv je tucanik jer se prvobitno drobljeni agregat dobivao ručnim razbijanjem, odnosno tucanjem većih komada kamena. Za razliku od prirodnog i umjetno drobljenog agregata koji se dobiva od stijena, postoji specijalni agregat koji se upotrebljava za izradu betona velike volumne mase. Takav agregat je primjerice drobljeni barit, zrna željeza i slično. Zrna agregata moraju biti od kamena dobre kvalitete. Budući da kamen u prirodi i prirodni agregat uvijek sadrže neke nekvalitetne dijelove, njih bi bilo najbolje odstraniti.Međutim, taj postupak bio bi vrlo skup, a kako je istraživanjima dokazano da određene količine nekvalitetnog materijala nemaju štetnog utjecaja na kvalitetu betona, to nije nužno. Standardom je definirana dozvoljena količina kvalitetnih i nekvalitetnih zrna u agregatu, te je na toj osnovi moguća ekonomična proizvodnja agregata. Količina svih štetnih sastojaka zajedno, ne računajući sitne čestice u betonu, ne bi trebala biti veća od 4%.

Tri su osnovne vrste štetnih sastojaka u agregatu:

1) obavijena zrna- katkad u agregatu ima zdravih zrna koja su obavijena tankim slojem gline, blata ili finim česticama koje su slabo ili nedovoljno vezane za zrno karbonatima i oksidima. Takav ovoj sprječava kontakt paste i zdravog materijala zrna, te je veza između zrna i cementnog kamena određena kvalitetom slabog materijala ovoja.
2) meka,trošna i slaba zrna- agregat često sadrži zrna koja se pod utjecajem vode raspadaju ili postaju trošna. Takvi materijali su ,primjerice, grudve gline,lapor,ugljen,škriljevci i biljne čestice. Raspadnuta i trošna zrna imaju malu ili nikakvu čvrstoću, pa treba uzeti da su volumeni koje zauzimaju šupljine u betonu.
3) organske primjese- mnoge organske tvari stvaraju zračne mjehuriće i čine beton poroznim. Humusna kiselina štetno djeluje na hidrataciju cementa,a šećer usporava ili potpuno sprječava vezanje. Masti i ulja slabe vezu cementnog kamena i agregata. Sitne čestice,organske primjese,biljne čestice,glineni ovoj oko zrna i neki drugi štetni sastojci agregata mogu se u većini slučajeva djelomično odstraniti pranjem agregata u odgovarajućim postrojenjima. Kod suhog agregata sitne čestice mogu se odstraniti i strujom zraka. [1].

3.1. PROIZVODNJA AGREGATA ZA BETON

Agregat se prozvodi frakcioniranjem prirodnog agregata ili drobljenjem kamena i frakcioniranjem. Dio postrojenja za drobljenje kamena naziva se drobilana,a dio postrojenja za frakcioniranje agregata naziva se separacija. Frakcioniranje se u pravilu vrši uz pranje. Ako se frakcioniranje izvodi bez pranja, tada umjesto odvajača vode mora postojati još jedan silos za frakciju 0-4 mm. Kamen se najčešće usitnjava u dva stupnja. Najprije se kamena masa, koja sadrži komade čak i do veličine 1 m,drobi u primarnoj drobilici na veličinu koja odgovara sljedećem stupnju drobljenja. Primarna drobilica je obično čeljusnog tipa. Materijal se drobi pritiskom,što predstavlja gnječenje kamenog materijala. To se postiže pomicanjem pomične čeljusti drobilice. Ta čeljust visi na osovini oko čijeg se središta vrti zamašnjak. Na mjestu gdje je obješena čeljust osovina ima ekscentar,tako da se na tom mjestu pomična čeljust pokreće lijevo-desno i istodobno gore-

dolje. Kod pomicanja u horizontalnom smjeru otvara se i zatvara gornji dio čeljusti.Kada se pomična čeljust spušta,donji dio se udaljava od nepomične čeljusti i zdrobljeni materijal ispada iz drobilice. Djelomično zdrobljeni materijal dalje se drobi u udarnoj drobilici. To predstavlja drugi stupanj usitnjavanja,zbog čega se i drobilica naziva sekundarna drobilica. Masivni rotor vrti se brzinom 300-1200 okretaja u minuti. Na obodu rotora strše udarne grede od specijalnog čelika velike tvrdoće. Zbog sudara kamenih zrna s udarnim gredama i oklopom ona se lome, a zatim ispadaju na donjem kraju drobilice. Zrna iznad 31.5 mm obično se drobe u mlinu koji je najčešće u principu udarna drobilica,ali se također mogu vraćati na ponovno drobljenje u sekundarnu drobilicu. Ako je potrebno drobiti zrna koja nisu mnogo veća od 4 mm,tada se upotrebljava mlin koji zrna drobi pritiskom između dva valjka ili mlin sa šipkama od specijalnog čelika. Šipke se nalaze u bubnju s oblogom od čelika velike tvrdoće. Okretanjem bubnja oko horizontalne osi pokreću se i vrte šipke te se drobe zrna agregata.

Frakcioniranje agregata vrši se prosijavanjem na vibracijskim sitima. Sito se sastoji od otvorene kutije bez dna, umjesto kojega su su učvršćene i nategnute mreže. Približno na sredini kutije nalazi se elektromotor s ekscentrom na horizonatalnoj osi,koji proizvodi kružne vibracije u vertikalnoj ravnini. Pod utjecajem vibracija kameni materijal se pomiče po mreži i propada kroz otvore. Zdrobljeni materijal može se uspješno prosijavati na vibracijskim sitima samo ako je dovoljno suh. Vlažni materijal ne može se prosijavati jer se sitna zrna lijepe za žice mreže i zatvaraju otvore. U takvom slučaju, kameni materijal može se prosijavati samo uz upotrebu dovoljne količine vode koja stalno pere mrežu i potiskuje zrna kroz otvore. Mlazevi vode moraju biti dovoljno jaki da mogu probiti sloj kamenog materijal na mreži. Pri tome voda gura sitna zrna kroz otvore mreže i sprječava lijepljenje sitnih čestica o mrežu. Jakost mlaza podrazumijeva dovoljnu količinu vode i pritisak vode. Pri pranju se voda skuplja ispod mreže s najmanjim otvorima,primjerice 4 mm,koja se nalazi na najnižem mjestu. Voda je pomiješana sa zrnima 0-4 mm. Ostale frakcije odvajaju se od vode i djelomično cijede već na sitima, a razdvajanje se vrši u odvajaču vode. Krupne čestice tonu na dno,a spiralni uređaj(pužnica) ih povlači prema gornjem kraju,izvlači ih iz vode i gura izvan odvajača. Voda odlazi u preljev i sa sobom odnosi sitne čestice. [1].



Slika 2. Prikaz kamenoloma [11]

3.2. SVOJSTVA I ISPITIVANJE AGREGATA

Za izradu betona smije se upotrijebiti samo agregat za kojeg je izdana svjedodžba (certifikat,atest) o kvaliteti. U našoj zemlji postupak provodi institucija ovlaštena za izdavanje svjedodžbe o kvaliteti agregata za beton i asfalt.Takva institucija na mjestu proizvodnje uzima uzorke svake frakcije agregata najmanje jedan put mjesečno kroz period od 6 mjeseci. Na jednom uzorku ovlaštena institucija ispituje sljedeća svojstva agregata:upijanje vode,volumnu masu u rastresitom i zbijenom stanju, čvrstoću na pritisak, mineraloškopetrografski sastav, sastojci koji sprječavaju hidrataciju cementa,volumnu masu zrna, otpornost na mraz poslije 5 ciklusa u zasićenoj otopini Na_2SO_4, sadržaj sumpora izražen kao SO_3, sadržaj klorida izražen kao Cl_2, sadržaj organskih tvari, volumni SI– indeks oblika, sadržaj grudvi gline, sadržaj trošnih zrna, lake čestice:ugljen,obavijenost površine zrna slabo vezanim česticama, otpornost protiv drobljenja, sitne čestice. [1].

3.2.1. GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA

Podaci koji definiraju od kakvih se veličina zrna sastoji agregat i kolika je količina svake vrste zrna nazivaju se granulometrijski sastav ili granulacija agregata. Granulometrijski sastav ispituje se prosijavanjem potpuno suhog uzorka agregata, na standardnim sitima. Utvrđuje se masa agregata koji je prošao kroz svako sito i izražava se u % ukupne mase uzorka. Svaki podatak naziva se prolaz.

Glavni nedostatak metode suhog prosijavanja je činjenica da dio zrna sitnijih od 0.063 m, zbog djelovanja privlačnih intermolekularnih sila, čvrsto prijanja uz površinu krupnijih zrna što ni najenergičnijim otresanjem nije moguće spriječiti. Zbog toga prolaz na situ može biti znatno manji od stvarnog. Ako se prosijavanje vrši uz pranje mlazom vode, privlačne sile se neutraliziraju, površine krupnijih zrna ostaju čiste, te se dobije stvarni prolaz na situ. Zbog ovog efekta, primjerice na situ 0.125 mm, mokrim prosijavanjem agregata može se dobiti gotovo dvostruko veći prolaz nego suhim prosijavanjem.

Sita su izrađena od mreže ili perforiranog lima s kvadratnim otvorima. Veličina otvora sita definirana je stranicom kvadrata. Promjer žice mreže i dimenzije lima propisani su standardima. Prema ISO (International Standard Organization) za ispitivanje agregata upotrebljava se standardna serija sita na sljedećim otvorima, u milimetrima: 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125. Osim navedenih, izrađuju se sita i drugih standardnih dimenzija, ali ona ne spadaju u standardnu seriju. Kod svih proračuna za posljednja sita u seriji uzimaju se vrijednosti 32,64 i 128 mm. Najvažniji razlog za odabiranje manjih stvarnih otvora je sljedeći: broj zrna na ovim sitima, pri jednakoj masi materijala, je znatno manji nego na sitima s manjim otvorima. Stoga svako zrno ima veću mogućnost da se povoljno namjesti i lakše prođe kroz otvor. Posljedica toga je da kroz sito prođe više zrna koja su neznatno manja od otvora,nego što je slučaj kod otvora manjih od 31.5 mm. Dakle, odabiranjem manjih otvora za tri posljednja sita izjednačavaju se uvjeti prosijavanja za sva sita u seriji. [1].

3.2.2. GRANULOMETRIJSKA KRIVULJA

Rezultati ispitivanja granulometrisjkog sastava mogu se prikazati dijagramom. Prolaz kroz sito nanosi se na ordinatu, a veličina otvora na apscisu. Radi bolje preglednosti, otvori sita nanose se u logaritamskom mjerilu, tj. umjesto veličine otvora nanosi se logaritam te vrijednosti. Najbolje je odabrati takav sustav sita gdje je otvor svakog sita dvostruko veći od prethodnog. Pri crtanju u logaritamskom mjerilu, bez obzira koja je baza logaritma, razmaci između oznaka za pojedine otvore sita tada su jednaki. Ovakav sustav sita prvi je uveo Amerikanac Tyler. Firma Tyler je i danas jedan od najvećih proizvođača laboratorijskih sita. Područje između dva susjedna sita standardne serije naziva se razred veličine zrna. [1].

3.3. FRAKCIONIRANJE AGREGATA

Svaki agregat nema granulometrijski sastav povoljan za izradu betona. Osim toga, agregat koji sadrži zrna različitih veličina sklon je segregaciji. Da bi se uklonili ti nedostaci, agregat se po veličini zrna razdvaja u više dijelova. Dio agregata koji sadrži zrna određenih veličina naziva se frakcija. Granice razdvajanja(frakcioniranja) odabiru se tako da frakcija sadrži samo onoliko različitih veličina zrna(razreda) da je segregacija pojedine frakcije smanjena na prihvatljivu mjeru. Općenito govoreći, sitnije frakcije su manje sklone segregaciji,te su i granice razdvajanja u tom području šire. Frakcioniranje se u pravilu vrši uz pranje, a kod drobljenog agregata često i bez pranja. Broj frakcija zavisi o maksimalnom zrnu agregata, a granice razdvajanja frakcija zovu se donja i gornja nazivna veličina frakcije. Gornja nazivna veličina najkrupnije frakcije u betonu je maksimalno zrno agregata. [1].

4. VODA

Smatra se da je voda za piće dobra i za spravljanje betona. Međutim, ako ta voda sadrži veću koncentraciju natrija ili kalija, postoji opasnost od alkalnoagregatne reakcije u betonu. Voda koja nije pitka može biti prikladna za spravljanje betona. Najčešće je dovoljno da je pH između 6 i 8 te da nije slana, odnosno da ne sadrži kloride. Manja kiselost vode nema veći utjecaj na svojstva betona, jer te kiseline neutraliziraju alkalni oksidi i velika količina vapna iz cementa, ali veći sadržaj humusnih kiselina može usporiti proces vezanja i smanjiti čvrstoću betona. Takve vode treba prije upotrebe detaljno ispitati i usporediti s kriterijima za vodu za spravljanje betona. Često puta se količine tvari izražavaju u jedinicama ppm (prema engleskom: parts per million).

Često se raspravlja o upotrebi morske vode za spravljanje betona. Ona sadrži oko 3,5% soli, od čega je najviše NaCl, zatim MgCl i MgS. Takve soli ubrzavaju vezanje cementa i rani prirast čvrstoća, a rezultiraju nešto manjim konačnim čvrstoćama. Osim toga, betoni pripravljeni s vodom koja sadrži kloride su higroskopni i stalno vlažni,a na površini se stalno izlužuju soli (eflorescencija). Prema tome, tamo gdje je važan izgled, ne može se koristiti morska voda za proizvodnju betona. Ni u slučaju armiranog betona ne smije se upotrebljavati morska voda jer povećava rizik korozije armature u betonu. Osim kemijskog ispitivanja vode i uspoređivanja s kriterijima, voda se može jednostavno provjeriti ispitivanjem i u gradilišnom laboratoriju izradom usporedne serije mortnih prizmica.Za jednu seriju koristi se voda koja se provjerava, a za drugu seriju poznata kvalitetna voda (npr. pitka voda). Ukoliko se rezultati ispitivanja sedmodnevne čvrstoće prizmica ovih paralelnih serija ne razlikuju za više od 10%,smatra se da je voda pogodna za spravljanje betona. [3].

4.1. VODA ZA NJEGOVANJE BETONA

Voda za spravljanje betona najčešće je prikladna i za njegovanje betona. Međutim, ako sadrži organske nečistoće ili željezne okside, te ako se u većim količinama polagano slijeva preko površine betona, to može ostaviti ružne tragove.

Previše intenzivno polijevanje vodom, naročito ako sadrži slobodni CO_2 ili je vrlo mekana voda, može izazvati površinska oštećenja mladog betona. Njegovanje armiranog betona morskom vodom je nedopustivo radi korozije armature. [3].

5. LETEĆI PEPEO

Leteći pepeo (Slika 3.) prema postanku je industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu spada u pucolane jer aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa. Nastaje kao sporedni proizvod u modernim termoelektranama koje imaju pogon na ugljen i koji mora prethodno biti samljeven. Dakle, leteći pepeo je fini prah koji se uglavnom sastoji od čestica sferičnog oblika, dobiven izgaranjem ugljene prašine, uz eventualno sporedne materijale za izgaranje. Leteći pepeo poboljšava svojstva betona na dva načina:

1) fizikalnim efektom povezanim s povišenjem udjela finih čestica- čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa
2) pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama

5.1. UTJECAJ LETEĆEG PEPELA NA SVOJSTVA CEMENTNIH KOMPOZITA

Dosadašnje studije pokazale su da je utjecaj letećeg pepela na cementni kompozitni materijal izuzetno dobar i poželjan, pogotovo ukoliko je riječ o cementima koji imaju svoju primjenu u agresivnim medijima, tj. medijima u kojima su prisutni sulfati i kloridi. Osim toga, leteći pepeo smanjuje potrebu za vodom i izdvajanje vode, poboljšava obradljivost i nepropusnost te usporava oslobađanje topline hidratacije. Negativna karakteristika ovakvih cementnih kompozitnih materijala je njihova niska rana mehanička čvrstoća, a veliki udio letećeg pepela može uzrokovati visoku kohezivnost mješavine i time otpornost na tečenje.

Većina čestica u letećem pepelu pojavljuje se u obliku čvrstih kuglica stakla. Ponekad mogu biti prisutne i šuplje kuglice koje su nastale od mnoštva malih kuglica. Općenito, pod elektronskim mikroskopom, sferični dijelovi letećeg pepela s malim udjelom kalcija izgledaju čišći od onih s velikim udjelom kalcija. To se objašnjava time da se u letećim pepelima s velikim udjelom kalcija javljaju veće količine alkalija i sulfata pa na površini

sferičnih čestica nastaju naslage alkalijskih sulfata. Čestice letećeg pepela mogu biti promjera manjeg od 1μmdo približno 100μm, s 50% masenog sadržaja manjeg od 20μm. Granulometrisjki sastav letećeg pepela, njegova morfologija i svojstva površine znatno utječu na potrebu za vodom i obradivost svježeg betona te na brzinu prirasta čvrstoće. [4], [7]



Slika 3. Leteći pepeo [12]

6. SILIKATNA PRAŠINA

Silikatna prašina (Slika 4.) vrlo je fini pucolanski materijal koji se sastoji uglavnom od amorfnog silicijevog dioksida koji se nastao kao nusproizvod u elektrolučnim pećima pri proizvodnji elementarnog silicija ili ferosilicisjkih slitina. [5], [6]

Filtarska SiO_2 prašina među onim je industrijskim nusproizvodima koji se u cementnim kompozitima rabe u novije vrijeme. Nevezano za normalne specifikacije,filtarska SiO_2 prašina može se promatrati i kao mineralni dodatak za beton. [2]



Slika 4. Silikatna prašina [13]

6.1. ZNAČAJKE SILIKATNE PRAŠINE

Proizvodnja silicij-metala i silicijskih slitina postupkom reduciranja rastaljenih sirovina u elektrolučnim pećima (1600-2000°C), osim po velikoj potrebi električne energije tipična je i po nastajanju specifičnog nusproizvoda. Redukcija kvarca,naime, nije izravna,pa se oko 10-15 % kvarca gubi u obliku Si i SiO para koje se u dodiru s kisikom iz zraka oksidiraju. Hlađenjem se te iste pare kondenziraju u obliku ultrafinih staklastih čestica. Zbog ekoloških razloga, te se čestice zajedno s ostalim česticama iz sagorijevnih plinova elektrolize zadržavaju u filtarskim uređajima(uglavnom vrećastim filtrima). Osnovna je sirovina kvarc (SiO_2), koji se u rastaljenom stanju reducira ugljikom. Izvor ugljika (najčistiji,ali i najskuplji) može biti koks ili ugljen (kao jeftinija mogućnost ako je tehnološki prihvatljiva). Ako se proizvodi slitina silicija i željeza,u sirovinskoj smjesi treba

postojati i izvor željeza. Kao izvor željeza može služiti otpadno željezo ili,u jeftinijem slučaju, željezna ruda. Osim slitina silicija i željeza postupkom elektrolize proizvode se i druge silicijske slitine,pri čemu nastaju prašinasti nusproizvodi koji se zadržavaju filtarskim uređajima. Pored visokog sadržaja SiO_2 (85-98 mas.%), silikatnu prašinu karakterizira i amorfna struktura po obliku sferičnih čestica kojih je radijus u području od 0,01μm do 0,3μm , a to je oko 70-100 puta finije od prosječne čestice cementa. Originalni, suhi oblik silikatne prašine zadržan filtarskim uređajem odlikuje se malom prostornom masom(najčešće oko 210 kg/m3), što je nepovoljno za transport (pogotovo za njegovu cijenu),a u primjeni traži i prilagođeni postupak doziranja. [2]

6.2. UTJECAJ SILIKATNE PRAŠINE NA HIDRATACIJU PORTLAND-CEMENTA

Hidratacija normalnog potland-cementa s dodatkom silikatne prašine je ubrzana. Kvantitativnom rendgenskom analizom nakon prva tri dana utvrđeno je da se hidratacija u prisutnosti silikatne prašine usporava,odnosno da je stupanj hidratacije bio jednak u portland-pastama bez dodatka silikatne prašine. Kasnije,do 28 dana, hidratacija uz prisutnost silikatne prašine opet je ubrzana u usporedbi s pastom silikatne prašine. [2]

6.3. PRIMJENA I UČINCI SILIKATNE PRAŠINE U CEMENTNOM KOMPOZITU

Eksperimentalno etablirana količina silikatne prašine koja se dodaje kreće se do 10 % od mase cementa. Dodatkom silikatne prašine u normalni betonski sastav postiže se povećana čvrstoća. Pri tome silikatna prašina može zamijeniti istu masu cementa i tada će povišenje čvrstoće biti manje (za neke slučajeve i potpuno anulirano) ili se silikatna prašina dodaje povrh količine cementa,kada će povećanje čvrstoće biti izrazitije. Uz povećanje čvrstoće očvrslog betona,a to je jedno od najčešće ispitivanih svojstava u kompozitima s dodatkom silikatne prašine,signifikantno se poboljšanje očituje i na obradljivosti i kohezivnosti . svježe mase te na nepropusnosti očvrslog materijala. [2]

7. METAKAOLIN

Metakaolin (Slika 5.), kemijske formule $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, amorfni je proizvod dehidratacije kaolinita koji se odlikuje visokom pucolanskom aktivnošću. U prosjeku sadrži 50-55% SiO_2 i 40-45% Al_2O_3.Kao komercijalno dostupan proizvod koji se koristi kao dodatak cementu u primjeni je od sredine devedesetih godina dvadesetog stoljeća, dakle može se zaključiti da je to relativno novi mineralni dodatak za beton. Po svojoj pucolanskoj reaktivnošću usporediv je sa silicijskom prašinom, ali je jeftiniji od nje.



Slika 5. Metakaolin [14]

Osnovna i najčešće korištena sirovina za proizvodnju metakaolina je kaolinska glina. Iz nje se termičkom aktivacijom proizvodi metakaolin. Ostale sirovine koje se mogu koristiti su lateriti i otpadni talog iz industrije za reciklažu papira.

Jedan od osnovnih konstituenata kaolinskih glina je mineral kaolinit – hidratizirani aluminijdisilikat ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Od temperature aktivacije gline zavisi pucolanska aktivnost rezultirajućeg proizvoda. Glina je u svom najreaktivnijem stanju kada

temperatura aktivacije vodi ka gubitku hidroksidnih iona i rezultira u gubitku i preuređenju strukture gline. Temperatura kalcinacije koja dovodi do aktivnog stanja je 600-800 ^{o}C.

Da bi se metakaolin koristio kao dopunski materijal, potrebno je da se postigne gotovo postupna dehidroksilacija bez pregrijavanja. Zagrijavanjem ispod temperature potrebne za dehidroksilaciju (600 ^{o}C) dolazi do sintetiziranja i formiranja mulita koji nije reaktivan. Na temperaturama iznad 850 ^{o}C dolazi do rekristalizacije u kvarc i mulit (inertni materijali), što posljedično dovodi do opadanja reaktivnosti. Dakle, da bi se postigla optimalna transformacija kaolinita u metakaolin, za svaku sirovinu potrebno je odrediti optimalnu temperaturu kalcinacije, brzinu zagrijavanja, vrijeme zadržavanja u peći i režim hlađenja.

Najčešće se kaoliniti kalciniraju u rotacijskim pećima ili korištenjem procesa u fluidiziranom sloju, čime se vrijeme kalcinacije skraćuje iz sati u minute. Ispitivanja su vršena i procesom brze kalcinacije da bi se vrijeme kalcinacije skratilo na sekunde. Taj se proces sastoji od brzog grijanja, kalcinacije i hlađenja.

Polazna sirovina može se direktno podvrgnuti termičkom postupku ili se može prethodno pročistiti, a nečistoće u polaznoj sirovini mogu djelovati kao razblaživači. Optimalna temperatura termičke aktivacije zavisi od mineralnog sastava polazne sirovine i to je kritični parametar procesa. Istraživanja su pokazala da do povećane tlačne čvrstoće i sniženja sadržaja kalcijevog hidroksida u očvrslom betonu dolazi kada polazna sirovina ima visok sadržaj kaolina (≈ 90%).

Glavna reakcija događa se između metakaolina i kalcijevog hidrokisda koji nastaje hidratacijom cementa. Nastali kristalni proizvod uglavnom ovisi o odnosu metakaolin/kalcijev hidroksid i temperature reakcije. Pored toga, ako su prisutni i slobodni karbonati, može doći do formiranja karbo-aluminata. [8]

EKSPERIMENTALNI DIO RADA

UVOD

Beton je danas najviše korišten građevinski materijal na svijetu (10-12 milijardi tona godišnje). U toj količini čovjek koristi samo još vodu. Gotovo stoljeće i pol, koliko se beton primjenjuje, pokrivao je oko 70 % potreba u građenju. Beton ovisi o karakteristikama svih komponenti od kojih se proizvodi. Zadatak ovog eksperimentalnog dijela rada je određivanje utjecaja mineralnih dodataka na svojstva betona. Budući da će na svojstva betona utjecaj imati samo različiti mineralni dodaci, sve ostale komponente betona ostaju nepromijenjene. Tako će se osigurati da ostale komponente, koje općenito utječu na svojstva betona, u ovom slučaju nemaju nikakav utjecaj.

Za potrebe ovog ispitivanja izradilo se 4 serije betonskih uzoraka, koje se razlikuju samo u mineralnim dodacima.

UZORAK 1-prva serija uzoraka je beton bez dodataka

UZORAK 2-druga serija uzoraka kao mineralni dodatak ima metakaolin

UZORAK 3-treća serija uzoraka kao mineralni dodatak ima silikatnu prašinu

UZORAK 4-četvrta serija uzoraka kao mineralni dodatak ima leteći pepeo

Svojstva betona su ispitana u svježem i očvrslom stanju. Uzorcima je u svježem stanju ispitano slijeganje, razastiranje te Vebe vrijeme, a u očvrslom stanju dinamički modul elastičnosti i čvrstoća.

Uzorci su čuvani u vlažnoj komori na temperaturi 20 ± 2°C.

Na uzorcima su vršena ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti i čvrstoće nakon 28 dana.

U nastavku slijedi detaljan opis upotrijebljenih materijala, postupka ispitivanja te dobivenih rezultata. [5]

8. KORIŠTENI MATERIJALI

8.1. CEMENT

Za pripremu mješavina betona upotrijebljen je (CEM II/B-M (S-LL) 42,5N), a to je miješani portlandski cement s udjelom 65–79% klinkera i 21–35% dodataka. Potvrda o sukladnosti prema zahtjevima HRN EN 197-1, HRN EN 197-2, BAS EN 197-1 i BAS EN 197-2.

Ovakva vrsta cementa sadrži:

TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + hips (G)	66 – 74%	65-79
Zgura (S)	26 – 34%	21-35
Vapnenac (LL)	26 – 34%	21-35
Sporedni sastojci	0%	0-5

Slika 6. Tablica podataka za korišteni beton [15]

Karakteristike: visoka konačna čvrstoća, sporiji pad konzistencije i zadržavanje prikladne ugradivosti te izvrsna reološka svojstva morta i betona (ugradivost, pumpabilnost), reducirana tendencija skupljanja/svjetlija boja prikladnija za kombiniranje s pigmentima.

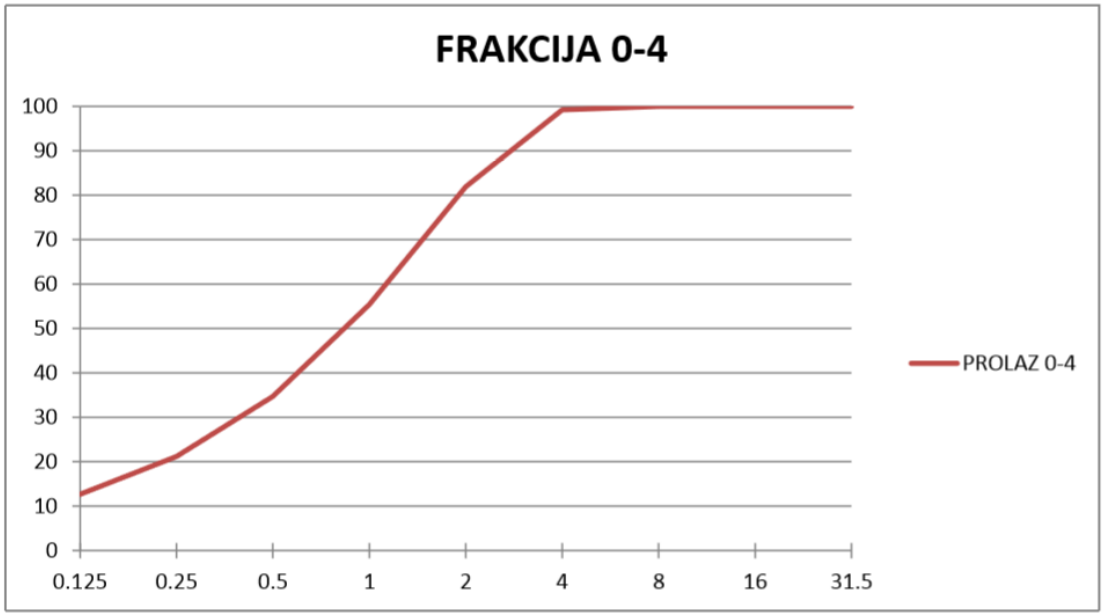
Preporuke za primjenu: betoni za široku primjenu, betoni s različitim vrstama aditiva, izrada nosivih konstrukcijskih elemenata u visokogradnji, izrada betonskih blokova, reparaturnih mortova, monolitizacija polumontažnih međukatnih konstrukcija, za cementne estrihe (plivajuće podove), izvođenje svih vrsta rekonstrukcijskih radova. Osobito je prikladan za proizvodnju transportnog betona, za izradu svih vrsta armiranobetonskih konstrukcija, za proizvodnju betona izloženog umjereno agresivnom okolišu.

Transport i skladištenje: transportirati u sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage. Transportna sredstva prije punjenja cementom moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa. Skladištiti u betonskim ili čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja, posebice od utjecaja vlage. Pri skladištenju u silos osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima. Uz pravilan transport i skladištenje, cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke. [6]

8.2. AGREGAT

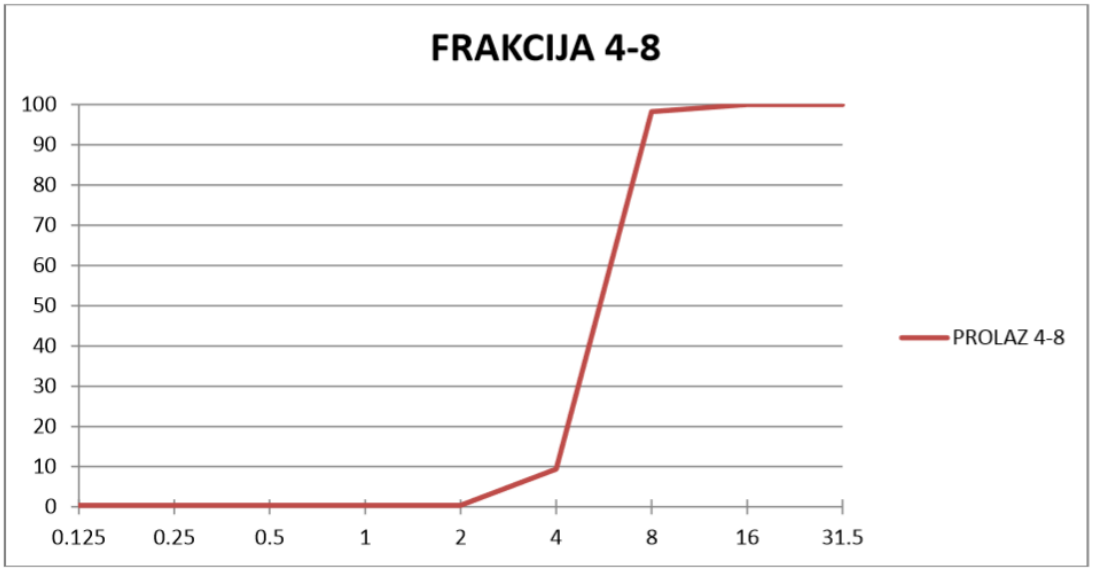
Za potrebe ovog istraživanja korišten je drobljeni agregat sa nalazišta Klis-Kosa. Frakcije agregata do 4 mm čini sitni agregat ili pijesak,a frakcije iznad toga krupni pijesak. Drobljeni agregat je obično ujednačenijeg mineralnog sastava i vrlo povoljne hrapave površine, koja osigurava dobru prionjivost cementnog kamena .Koristile su se ukupno 3 frakcije: 0-4 mm,4-8 mm i 8-16 mm. Granulometrijski sastav svake pojedine frakcije agregata prikazan je na slikama 8.1.-8.3.,kao i odabrana granulometrijska krivulja agregata za beton (Fuller), slika 8.4.

Udio frakcije 0-4 mm iznosi 50%.



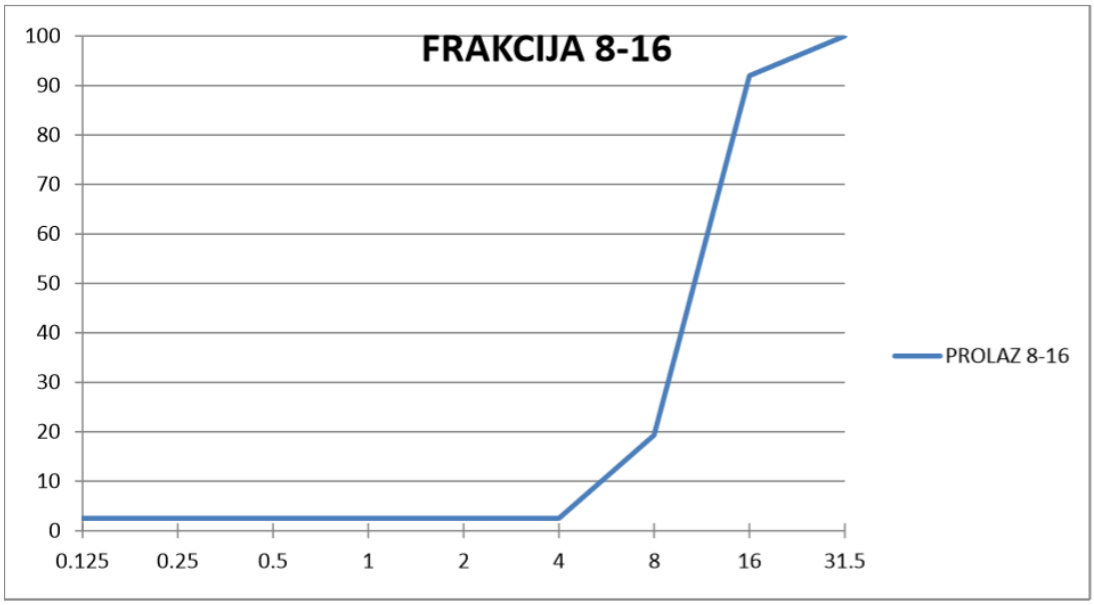
Slika 7. Granulometrijska krivulja agregata frakcije 0-4mm

Udio frakcije 4-8 mm iznosi 15%.

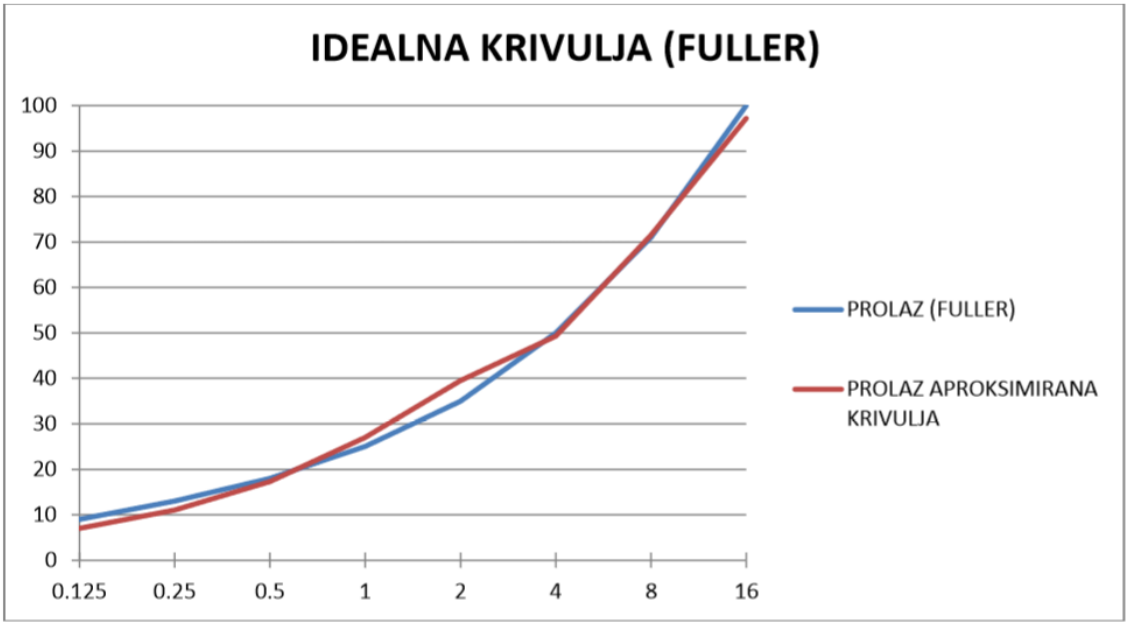


Slika 8. Granulometrijska krivulja agregata frakcije 4-8mm

Udio frakcije 8-16 mm iznosi 35%.



Slika 9. Granulometrijska krivulja agregata frakcije 8-16mm



Slika 10. Prikaz idealne krivulje (Fuller)

8.3. VODA

Zahtjevi za kvalitetu vode koja je pogodna za izradu betona su:

• voda ne smije imati primjese koje sprječavaju normalno vezivanje i očvršćivanje lakog betona (muljevite vode, vode koje sadrže kiseline i soli preko određene mjere, tj. vode čiji je pH faktor manji od 4,5%),

• voda ne smije sadržavati sulfate, ne više od 0,3%,

• ne smije biti zagađena šećerom, uljima, naftom, mazutima itd.,

• morska voda smije sadržavati do 2% soli da bi se mogla upotrijebiti za masivne nearmirane konstrukcije. [6]

8.4. SUPERPLASTIFIKATOR MasterGlenium Sky 629

Mehanizam djelovanja superplastifikatora je u načelu isti kao kod plastifikatora, ali je svaki pojedinačni efekt u ukupnom mehanizmu znatno jače izražen. Njihovom upotrebom moguće je 3 do 4 puta smanjiti količinu vode koja je potrebna za izradu betona u odnosu na beton izrađen s plastifikatorom. Molekule superplastifikatora izgrađene su u obliku molekulskog lanca te u adsorbiranom sloju znatno bolje pokrivaju površinu čestica u svježem betonu. Upotreba superplastifikatora kod izrade betona ima brojne prednosti, a to su:

• povećanje slijeganja i tečenja,

• poboljšanje ugradljivosti, zagladivosti i izgleda površine,

• velike uštede vode i cementa,

• povećanje tlačne čvrstoće,

• ubrzavanje razvoja čvrstoće.

Količina koja je korištena u ovom ispitivanju je 1L/100kg veziva. [1]

8.5. MINERALNI DODACI

Oblik i upijanje vode mineralnih dodataka može utjecati na potrebu za vodom i stoga su primjenjivi za upotrebu u proizvodnji betona.

Općenito se mineralnim dodacima za beton smatraju fino zrnato dispergirani materijali, koji mogu biti dodavani u beton u relativno velikim količinama obzirom na masu cementa (20-100%).

U eksperimentalnom radu korišteni su sljedeći mineralni dodaci:

1) Silikatna prašina

2) Leteći pepeo

3) Metakaolin

8.5.1. SILIKATNA PRAŠINA

Silicijska prašina je sporedni proizvod koji nastaje kod proizvodnje silicijskih i ferosilicijskih legura u elektrolučnim pećima. To je fina prašina raznih nijansi sive boje koja se u literaturi javlja pod različitim nazivima: mikrosilika, condesed silica fume (CSF), silica fume (SF) itd. Mikrosilika je zapravo komercijalni naziv za prašinu SiO_2.

Silicijska prašina se sastoji od nekristaliziranih sferičnih amorfnih čestica silicijevog dioksida. Nastaje u procesu redukcije kvarca u metalni silicij pri temperaturi od oko 2000C^o.

Pojedinačne čestice silicijske prašine vrlo su male, 50-100 puta manje nego čestice cementa i imaju veličinu u prosjeku 0,1-0,5 μm. Zbog finoće čestica, velike specifične ploštine (10 do 25 m^2/g) i visokog sadržaja SiO_2, silicijska prašina je vrlo reaktivan pucolan kada se upotrebljava u betonu. Silicijska prašina ima nasipnu gustoću približno 150-250 kg/m^3. Specifična gustoća mikrosilike iznosi približno 2200 kg/m^3.

Silicijska prašina utječe na svojstva betona s dva mehanizma: pucolanskim reakcijama i učinkom sitnih čestica. Pucolanskim reakcijama povećava se količina C-S-H gela, a sitne čestice doprinose poboljšanu obradljivost i povećavaju kohezivnost te zapunjavaju unutrašnju strukturu, jer su znatno sitnije od čestica cementa. Silicijska prašina utječe na povećanje čvrstoće i smanjenje propusnosti betona. Obzirom na veliku specifičnu ploštinu, silicijska prašina utječe na povećanje potrebe za vodom.

Silicijska prašina se može dodati u beton u količini do 15%, no uobičajeno doziranje je između 7-10% na količinu cementa. Silicijska prašina povećava potrebu za vodom u betonu te se preporuča rabiti ju zajedno s kemijskim dodatkom plastifikatorom ili superplastifikatorom.

Beton s dodatko silicijske prašine ima povećanu koheziju i stoga nema sklonosti segregaciji i izdvajanju vode. Primjena silicijske prašine u betonu poboljšava svojstva očvrsnulog betona, jer povećava čvrstoću. [4]

8.5.2. LETEĆI PEPEO

Leteći pepeo je fini prah koji se sastoji od čestica sferičnog oblika, dobiven izgaranjem ugljene prašine, uz eventualno sporedne materijale za izgaranje.

Za vrijeme izgaranja ugljena u termoelektranama, ugljen u visokoj peći prolazi kroz područja s visokom temperaturom. Pri tome izgaraju lebdeća tvar i ugljik, dok se većina mineralnih nečistoća kao što su glina, kvarc i feldspati tale na visokoj temperaturi. Otopljena tvar se brzo prenosi u područja s manjom temperaturom gdje očvršćava u sferične čestice stakla. Neki od aglomerata minerala padaju na dno, dok većina finih čestica lebdi sa strujom dimnih plinova i naziva se leteći pepeo. Pepeo se potom uklanja iz plina centrifugalnim odvajanjem, elektrostatskim taloženjem i filtriranjem.

Veličina čestica u letećem pepelu pojavljuje se u obliku čvrstih kuglica stakla. Ponekad mogu biti prisutne i šuplje kuglice te kuglice koje su nastale od mnoštva malih kuglica. Čestice letećeg pepela mogu biti promjera manjeg od 1μm do približno 100μm, s 50% masenog sadržaja manjeg od 20μm.

Leteći pepeo poboljšava svojstva betona na dva načina:

1) fizičkim efektom povezanim s povišenjem udjela finih čestica – čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa (1-20μm) i

2) pucolanskim i/ili hidrauličnim reakcijama. [4]

8.5.3. METAKAOLIN

Metakaolin je rafinirana kaolinska glina koja je kalcinirana (zagrijavana na 700 – 900 C^o) pod kontroliranim uvjetima u različitim trajanjima ovisno o procesu, s ciljem proizvodnje amorfnog aluminijevog silikata koji je reaktivan u betonu. Ponaša se kao i drugi pucolani, u betonu reagira s produktima kalcijevog hidroksida (vapnom) nastalima tijekom hidratacije cementa. Obično se upotrebljava u količini od 5-15% zamjene portlandskog cementa. Veličina čestica metakaolina je 1-2 μm i općenito je velike reaktivnosti.

Metakaolin pridonosi:

porastu čvrstoće, olakšava završnu obradu, smanjuje eflorescenciju, smanjuje vodoupojnost, smanjuje mogućnost pojave alkalnosilikatne reakcije, smanjuje deformacije skupljanja i olakšava zadržavanje boja betona, posebno kod bijelih betona. [4]

SASTAV ISPITNIH MJEŠAVINA:

1.SASTAV ISPITNE MJEŠAVINE

BEZ DODATAKA:

SASTAV ZA 15L MJEŠAVINE		SASTAV ZA 1m^3 MJEŠAVINE	
Cement	5,25 kg	Cement	350 kg
Voda	2,13 kg	Voda	142 l
Superplastifikator	0,0525 kg	Superplastifikator	3,5 kg
Dodataka	0,00 kg	Dodataka	0,00 kg
Agregat 0-4 mm	14,62 kg	Agregat 0-4 mm	974,67 kg
Agregat 4-8 mm	4,39 kg	Agregat 4-8 mm	292,67kg
Agregat 8-16 mm	10,24 kg	Agregat 8-16 mm	682,67 kg

Tablica 1. Iskaz sastava ispitne mješavine za beton bez dodataka.

2.SASTAV ISPITNE MJEŠAVINE S

DODATKOM METAKAOLINA:

SASTAV ZA 15L MJEŠAVINE		SASTAV ZA 1m^3 MJEŠAVINE	
Cement	4,73 kg	Cement	315 kg
Voda	2,13 l	Voda	142 l
Superplastifikator	0,0525 kg	Superplastifikator	3,5 kg
Metakaolin	0,53 kg	Metakaolin	35 kg
Agregat 0-4 mm	14,58 kg	Agregat 0-4 mm	972 kg
Agregat 4-8 mm	4,37 kg	Agregat 4-8 mm	291,33 kg
Agregat 8-16 mm	10,21 kg	Agregat 8-16 mm	680,67 kg

Tablica 2. Iskaz sastava ispitne mješavine za beton s dodatkom metakaolina.

3.SASTAV ISPITNE MJEŠAVINE S

DODATKOM SILIKATNE PRAŠINE:

SASTAV ZA 15L MJEŠAVINE		SASTAV ZA 1m^3 MJEŠAVINE	
Cement	4,73 kg	Cement	315 kg
Voda	2,13 l	Voda	142 l
Superplastifikator	0,0525 kg	Superplastifikator	3,5 kg
Silika	0,53 kg	Silika	35 kg
Agregat 0-4 mm	14,54 kg	Agregat 0-4 mm	969,33 kg
Agregat 4-8 mm	4,36 kg	Agregat 4-8 mm	290,67 kg
Agregat 8-16 mm	10,18 kg	Agregat 8-16 mm	678,67 kg

Tablica 3. Iskaz sastava ispitne mješavine za beton s dodatkom silikatne prašine.

4.SASTAV ISPITNE MJEŠAVINE S

DODATKOM LETEĆEG PEPELA:

SASTAV ZA 15L MJEŠAVINE		SASTAV ZA 1m^3 MJEŠAVINE	
Cement	4,73 kg	Cement	315 kg
Voda	2,13 l	Voda	142 l
Superplastifikator	0,0525 kg	Superplastifikator	3,5 kg
Leteći pepeo	0,53 kg	Leteći pepeo	35 kg
Agregat 0-4 mm	14,53 kg	Agregat 0-4 mm	968,67 kg
Agregat 4-8 mm	4,36 kg	Agregat 4-8 mm	290,67 kg
Agregat 8-16 mm	10,17 kg	Agregat 8-16 mm	678 kg

Tablica 4. Iskaz sastava ispitne mješavine za beton s dodatkom letećeg pepela.

9. PRIPREMA ISPITNE MJEŠAVINE

Količina svake mješavine izmjerena je na preciznoj vagi. Nakon toga su se svi uzorci mješavina stavili u laboratorijsku miješalicu gdje su se sastojci izmiješali. Iza pripremljene mješavine uslijedilo je mjerenje iznosa slijeganja i rasprostiranja.



Slika 11. Laboratorijska miješalica

[slike zabilježene tijekom ispitivanja]



Slika 12. Digitalna vaga

[slike zabilježene tijekom ispitivanja]

10. KORIŠTENE METODE

10.1. METODA SLIJEGANJA (Slump Method)

Nakon što se pripremila mješavina betona, uslijedilo je ispitivanje. Prvo se započelo sa mjerenjem konzistencije metodom slijeganja(Slump Method). Preoblikovanje i tečenje svježeg betona najjednostavnije je definirati mjerenjem promjena oblika i dimenzija pod utjecajem vanjskih sila. Ovo je metoda koja se primjenjuje oko 90 godina, jednostavna je i prilično pouzdana te je praktična za primjenu i na mjestu gradnje. Ovom metodom konzistenciju slijeganja ispitujemo pomoću krnjeg stošca h=30cm koji se puni betonom u 3 približno jednaka sloja. Svaki nivo betona se zbija sa određenom šipkom promjera 16mm,dužine 60cm. Kod prvog sloja šipka ne smije udarati o podlogu, a kod svakog sljedećeg šipka mora malo ulaziti u prethodni sloj, pri čemu se svaki sloj zbija sa 25 udaraca standardnom šipkom. Kada se kalup napuni, površina betona se poravna, kalup se podiže za 5-10sekundi i odmah slijedi mjerenje slijeganja svježe betonske mase. Na kraju se površina betona poravna, kalup vertikalno izvuče i izmjeri se slijeganje(u cm). Slijeganje se mjeri kao visina kalupa 30cm i najviše točke slegnute betonske mase. [6]



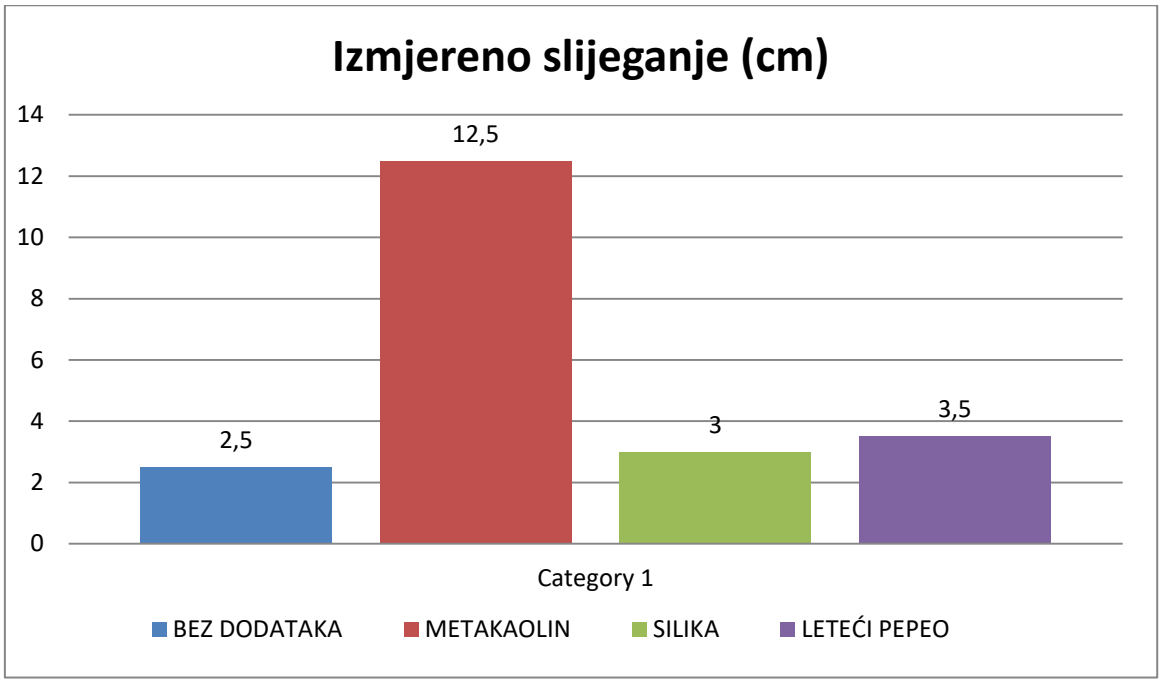
Slika 13.



Slika 14.

Slike 17.,18. Prikaz slijeganja betona iz krnjeg stošca [slike zabilježene tijekom ispitivanja]

Rezultati izmjerenih slijeganja :



Slika 15. Prikaz rezultata izmjerenih slijeganja.

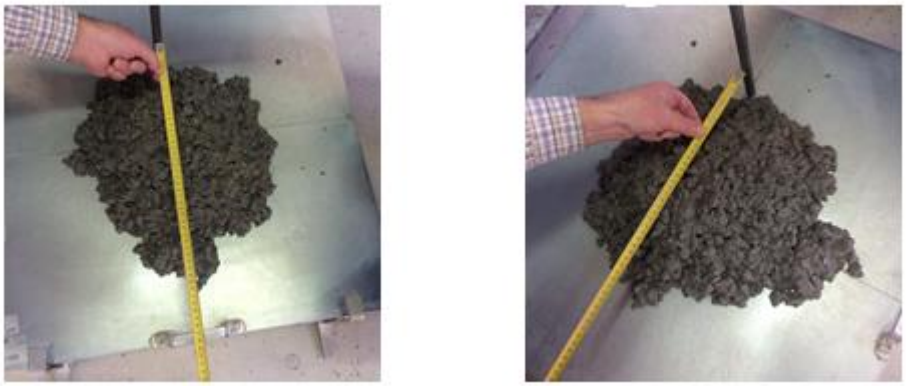
Na slici 15 prikazani su rezultati slijeganja. Prema dobivenim rezultatima najbolju obradivost ima beton s dodatkom metakaolina, dok ostale tri mješavine imaju približno jednaku obradivost i dosta nižu vrijednost.

10.2. METODA RASPROSTIRANJA (Flow Method)

Svrha korištenja ove metode je također mjerenje konzistencije svježeg betona. Za potrebu ove metode, osim krnjeg stošca te štapa za nabijanje, potreban je i Grafov stol. On omogućuje slobodan pad uzorka sa visine od 4 cm. Postupak se sastoji od punjenja stošca betonom u dva sloja, a svaki sloj se zbija sa 10 ravnomjerno raspoređenih udaraca. Površina betona u kalupu se izravna i vertikalno podiže, a zatim slijedi podizanje-spuštanje betonske mase 15 puta slobodnog pada sa 4cm. Tada se betonska masa rasprostire poprimajući kružni oblik kod kojeg mjerimo dva okomita promjera. Na osnovu srednje vrijednosti zaokruženih na najbliži 10mm definiramo konzistenciju betona. Ova metoda nije pogodna za mršave betone, ali ni za betone koji imaju krutu konzistenciju. [6]



Slika 16. Rasprostiranje betona s dodatkom metakaolina [slike zabilježene tijekom ispitivanja]



Slika 17. Rasprostiranje betona s dodatkom silikatne prašine [slike zabilježene tijekom ispitivanja]



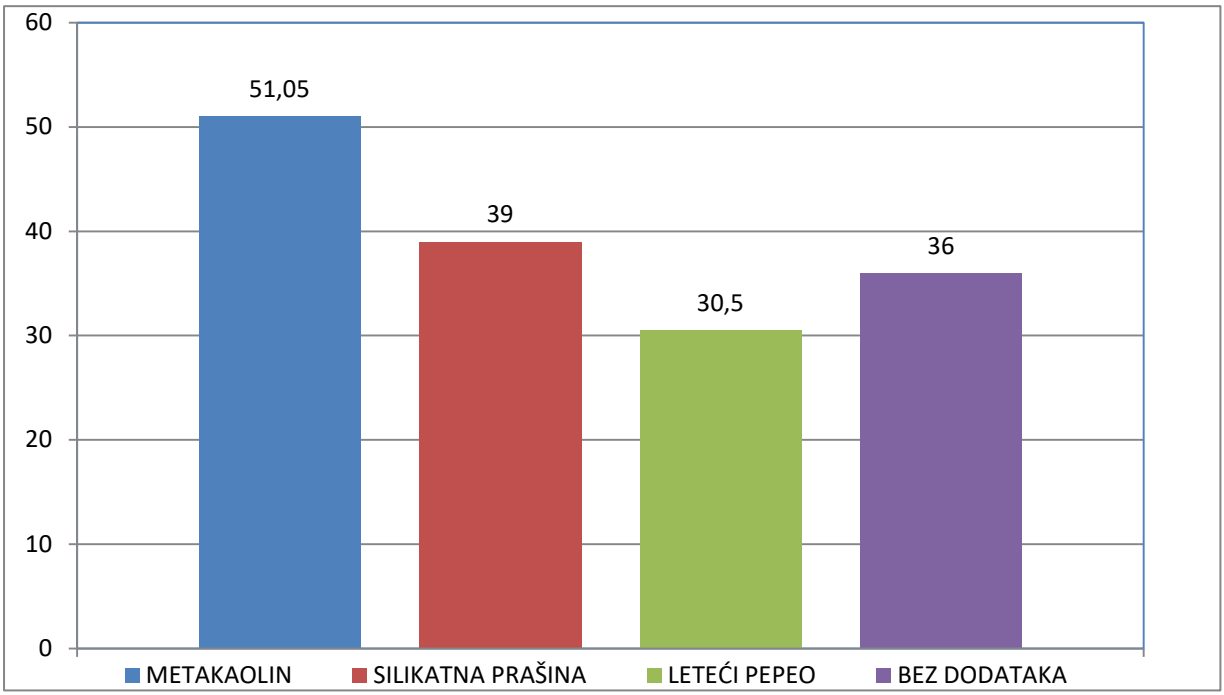
Slika 18. Rasprostiranje betona s dodatkom letećeg pepela [slike zabilježene tijekom ispitivanja]



Slika 19. Rasprostiranje betona bez dodataka [slike zabilježene tijekom ispitivanja]

Metakaolin	50,6 x 51,5cm
Silikatna prašina	37 x 41cm
Leteći pepeo	29 x 32cm
Bez dodataka	33 x 39

Tablica 5. Prikaz izmjerenih slijeganja.



Slika 20. Prikaz reultata izmjerenog razastiranja na uzorcima.

Na slici 20 prikazani su rezultati razastiranja. Prema dobivenim rezultatima najveću obradivost ima beton s dodatkom metakaolina.

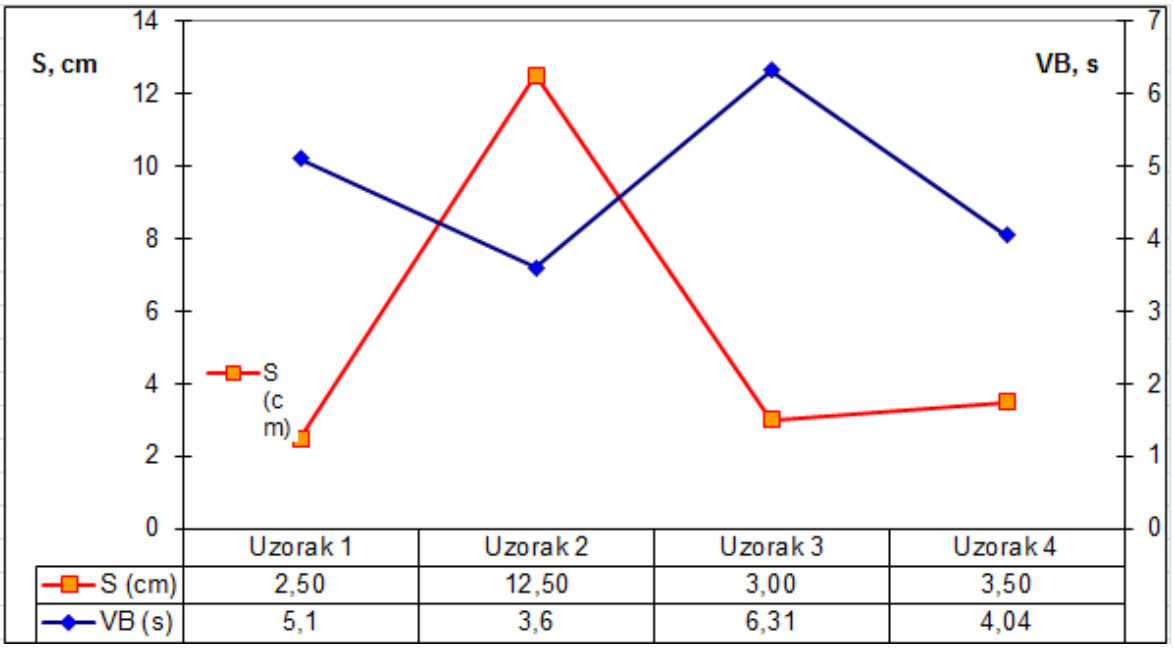
10.3. VEBE METODA

Prilikom korištenja ove metode također mjerimo konzistenciju svježeg betona,ali na jedan drugačiji način. Za ovu metodu potreban nam je Vebe aparat (konzistometar), stožac koji centrično postavimo u cilindričnu posudu. Stožac punimo kao i kod metode slijeganja u tri sloja te nabijamo sa 25udaraca. Nakon toga slijedi podizanje stošca te se izmjeri slijeganje, a nakon toga se na uzorak postavi prozirna ploča mase 2.8kg. Metoda se zasniva na principu mjerenja utroška energije da bi se zbijenom betonu promijenio oblik i poravnala površina. Beton se ponovo zbija vibriranjem dok ploča potpuno nalegne na površinu betona. Zato se ploča radi prozirna kako bi se točno moglo uočiti trenutak potpunog nalijeganja. Mjeri se vrijeme t od uključivanja vibratora do potpunog nalijeganja ploče s preciznošću od 0.1s. Ova metoda je prikladna za beton tvrđe konzistencije. [6]



Slika 21. Mjerenje konzistencije Vebe metodom

[slike zabilježene tijekom ispitivanja]



Slika 22. Prikaz mjerenog slijeganja i VB vremena

Iz prikazanog dijagrama na slici 22 vidi se da uzorci koji imaju veće slijeganje imaju kraće VB vrijeme, jer imaju bolju obradivost. I kod ove metode je uzorak sa metakaolinom imao najbolju obradivost, tj. najniže Vebe vrijeme.

10.4. UGRADBA SVJEŽEG BETONA U KALUPE

Iza obavljenih svih ispitivanja svježeg betona: slijeganje, rasprostiranje, vebe metoda, slijedi ugradnja svježeg betona u pripremljene kalupe (Slika 23). Pripremljeni svježi beton stavljamo u kalupe da bi nakon toga u svaki od 3 kalupa uranjali vibrator. Vibriranje se vrši sve dok iz betona izlaze mjehurići zraka i dok se površina betona ne poravna sa vrhom kalupa. Nakon 24h uzorci su izvađeni iz kalupa te su stavljeni u komoru za njegu betona.



Slika 23. Kalupi za svježi beton

[slika zabilježena tijekom ispitivanja]

11. ISPITIVANJA NAKON 28 DANA

11.1. ISPITIVANJA TLAČNE ČVRSTOĆE BETONA

Tlačna čvrstoća betona ispitana je nakon 28 dana standardnim postupkom. Ispitivanja su vršena na ispitnim tijelima oblika kocke veličine brida 15 cm. Uzorci su stajali u kalupima 24 sata i to u kontroliranim uvjetima, odnosno pri relativnoj vlažnosti zraka većoj od 90% i na temperaturi od 20±2°C . Nakon 24 sata uzorci suizvađeni iz kalupa i potopljeni u vodu gdje su sečuvali do dana ispitivanja. Na dan ispitivanja uzorci suizvađeni iz vode, obrisani tako da im površina bude suha i zatim suizvagani. Nakon toga su spremni za ispitivanje. Tlačna čvrstoća ispitana je na zasićenim uzorcima pomoću preše za određivanje tlačne čvrstoće betona. Ispitivanje se izvodi na način da se uzorak stavi u prešu i opterećujemo brzinom od 0.6±0.4 MPa/s do loma, a zatim se očita naprezanje i sila u uzorku u trenutku sloma. Osnovno ispitivanje modula elastičnosti i čvrstoće se radi kod betona starosti 28 dana. Kvaliteta svakog uzorka varira, pa se prilikom obrade rezultata kao mjerodavna vrijednost uzima srednja vrijednost od 3 uzorka. [6]



Slika 24.

Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće te 3 uzorka

[slike zabilježene tijekom ispitivanja]



Slika 25.

Ispitivanje tlačne čvrstoće na kocki

12. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA

12.1. ISPITIVANJE ČVRSTOĆE BETONA NA PRITISAK

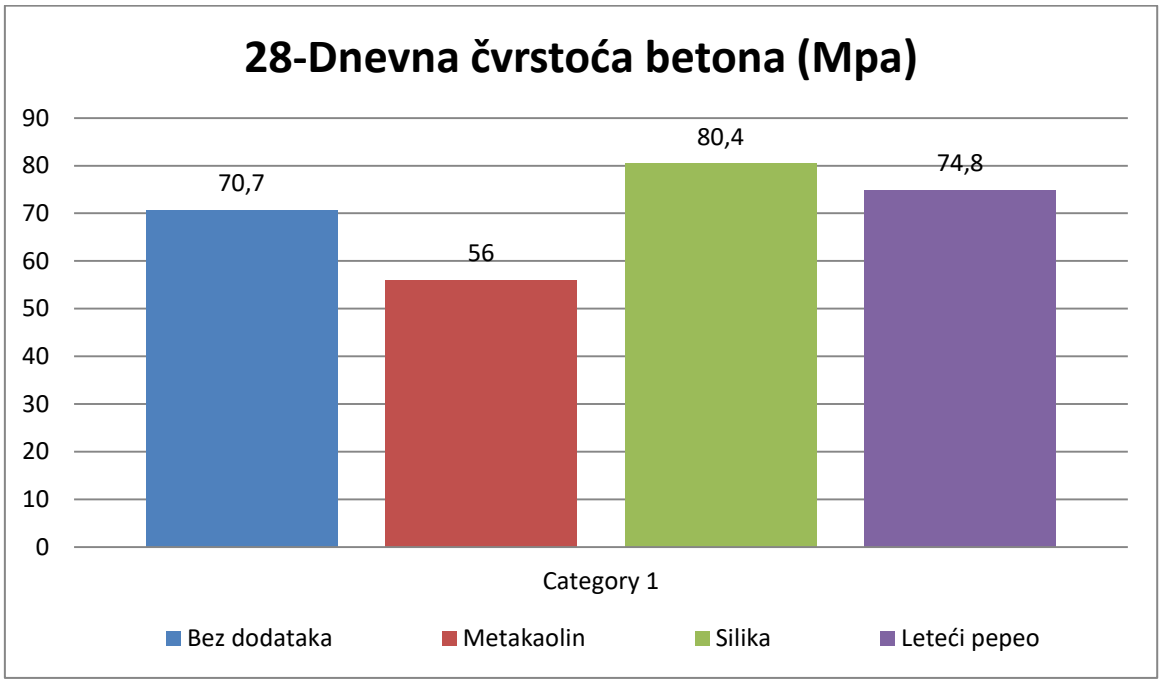
Čvrstoća betona na pritisak ispitivana je standardnim postupkom. Ispitivanje se mora vršiti u području 0.2 i 0.8 kapaciteta preše. Ispitno tijelo mora biti u zasićenom stanju, te površine moraju biti obrisane. Prvo moramo izmjeriti masu uzorka i sve dimenzije ispitnog tijela. Nakon toga tijelo stavimo u prešu i opterećujemo brzinom od 0.6±0.4 MPa/s do loma. Rezultat ispitivanja je čvrstoća na pritisak svake kocke posebno i iznosi:

$$fk=F/A$$

gdje je:

F-sila u trenutku loma

A-površina poprečnog presjeka u sredini ispitnog tijela



Slika 26. Prikaz čvrstoće materijala nakon 28-dnevne starosti beton

Na slici 26 je prikaz čvrstoća koje su uzorci postigli nakon 28 dana. Svi uzorci su imali jednaku ukupnu količinu veziva. Najveću čvrstoću ima uzorak sa silikatnom prašinom. Silikatna prašina doprinosi kako konačnoj čvrstoći betona tako i povećanju njegove trajnosti. Kako su čestice silike sitnije od čestica cementa, tako one popunjavaju unutrašnju strukturu cementnog kamena. [5]

Najnižu vrijednost ima uzorak sa metakaolinom, nižu i od betona bez dodataka. Ako se uzme da beton bez dodataka ima referentnu čvrstoću onda se dobije da uzorak sa metakaolinom ima 79 % vrijednosti čvrstoće, sa letećim pepelom 106 % a sa silikom 114% čvrstoće betona bez dodataka.

12.2. ISPITIVANJE ULTRAZVUKOM

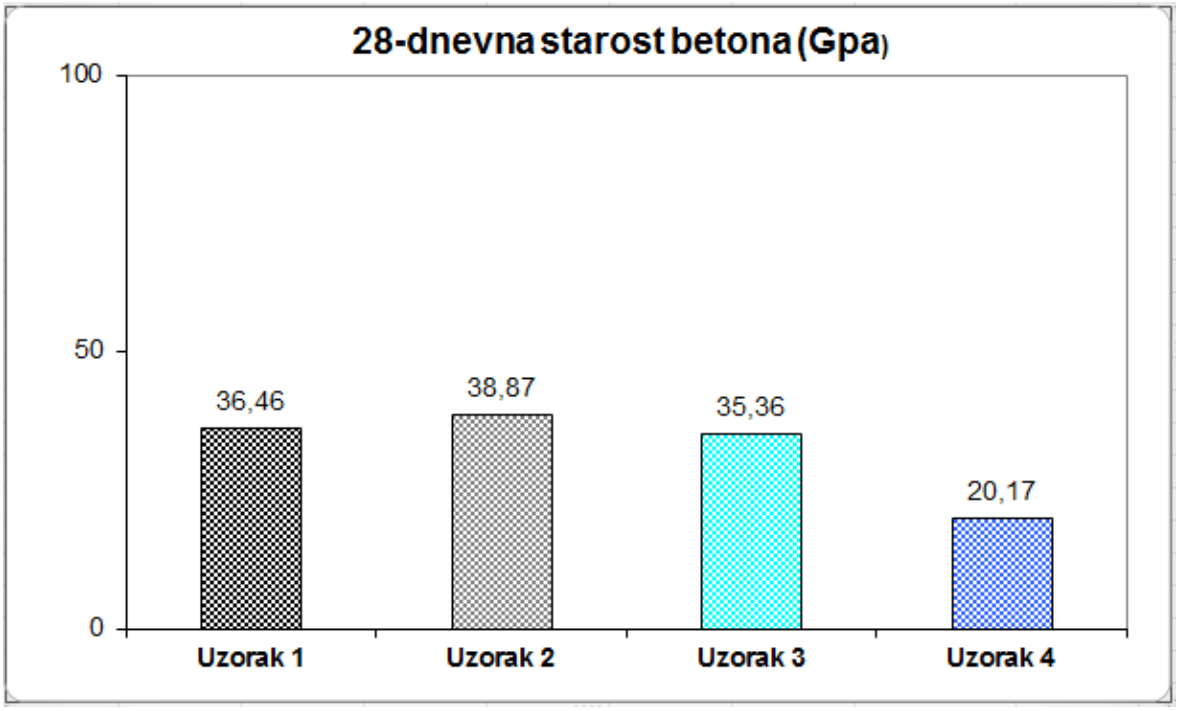
Ovom metodom mjeri se brzina prolaska longitudinalnog ultrazvučnog impulsa prema odgovarajućoj normi. Mjerenje se provelo na labaratorijskim uzorcima triju kocki brida 15cm ultrazvučnom metodom. Ultrazvučna metoda spada u grupu nerazornih metoda, a zasnovana je na principu odbijanja ultrazvučnih valova. Zadatak ove metode je da se osigura kvaliteta tijekom izvođenja konstrukcije, za ispitivanje osnovnih konstrukcija zgrada i otkrivanje grešaka betonskih konstrukcija.

Posebna zadaća ultrazvučnog ispitivanja je da odredi debljinu konstrukcije te da lokalizira pukotine na jednoj strani konstrukcije.

Uređaj za određivanje brzine ultrazvučnog impulsa se sastoji od generatora, para pretvarača, pojačala i električnog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka njegovog dolaska na prijemni pretvarač. [6]



Slika 27. Ispitivanje ultrazvukom [slika zabilježena tijekom ispitivanja]



Slika 28. Prikaz modula elastičnosti materijala nakon 28-dnevne starosti betona

Vrijeme širenja ultrazvuka kroz beton mjeri se kako bi se izračunao dinamički modul elastičnosti koji računamo po formuli:

$$E_{din} = \frac{v^2 \rho (1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} [GPa],$$

gdje je:

v - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

ρ – gustoća betona [kg/m3]

μ – Poissonov koeficijent [μ =0.2]

	Starost betona – 28 dana					
Oznaka	V	T(prosjek)	v(m/s)	Gustoća(kg/m 3)	μ	Edin (GPa)
Uzorak 1	0,003375 0,003398 0,003375	35,267 37,367 37,800	4253,308 4041,035 3968,254	8,113 8,267 8,212	0,2	39,14 35,76 34,48 **36,46**
Uzorak 2	0,003177 0,003242 0,003242	35,533 35,833 35,867	4136,961 4130,233 4126,394	8,0711 8,177 8,1991	0,2	39,14 38,73 38,76 **38,87**
Uzorak 3	0,003353 0,003364 0,003375	37,200 37,200 37,467	4005,376 4040,541 4003,559	8,137 8,241 8,194	0,2	35,04 36,00 35,02 **35,36**
Uzorak 4	0,00342 0,003353 0,00342	45,133 55,633 49,500	3367,799 2678,25 3070,707	8,1422 8,1679 8,2546	0,2	24,30 15,73 20,48 **20,17**

Tablica 6. Dinamički modul elastičnosti nakon 28 dana.

Nakon 28 dana provedeno je ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti na temelju kojeg je utvrđeno da najveću vrijednost ima beton s dodatkom metakaolina, a najmanju vrijednost ima beton s dodatkom letećeg pepela.

13. ZAKLJUČAK

Beton je gradivo mješavine cementa,vode i agregata, a u novije vrijeme je nemoguće zamisliti izradu betona bez aditiva i mineralnih dodataka. On pokriva oko 70% potreba građenja, a primjenjuje se u sve složenijim i najrazličitijim konstrukcijama. Današnja proizvodnja betona postaje visoka tehnologija i znanost, jer je cilj u što kraćem roku napraviti građevinu bez obzira na složenost njene izvedbe. Beton se pravi na gradilištu ili u betonarama odakle se transportira na gradilište. Faze u procesu proizvodnje su: doprema i skladištenje sastojaka betona, doziranje i miješanje, vanjski transport, gradilišni transport, ugradnja, završna obrada slobodne površine betona te njegovanje betona.

U ovom radu napravljena je receptura za beton prema zahtjevima projektnog zadatka. Proračunom je određen sastav betona te su temeljem proračuna napravljeni ispitni uzorci. Napravljena su ispitivanja u svježem stanju: metoda slijeganja, metoda rasprostiranja, VEBE metoda, te u očvrslom stanju nakon 28 dana ispitivanje tlačne čvrstoće i metoda ultrazvuka da bi se dobio dinamički modul elastičnosti. Analizom rezultata brzine ultrazvučnog vala nakon 28 dana ispitni beton se može klasificirati kao vrlo kvalitetni beton.

Beton s mineralnim dodatkom metakaolina ima najveće slijeganje u usporedbi sa svim uzorcima, te također kod metode rasprostiranja (flow method) beton s dodatkom metakaolina je pokazao najveće rasprostiranje. Usporedbom slijeganja i VB vremena dokazano je da uzorci koji imaju veće slijeganje imaju kraće VB vrijeme jer imaju bolju obradivost. U ovom slučaju beton s dodatkom metakaolina ima najveće slijeganje te najkraće VB vrijeme, te iz toga proizlazi da beton s dodatkom metakaolina ima i najbolju obradivost. Kod čvrstoće uzoraka 28-dnevne starosti dobiveno je da uzorak sa silikatnom prašinom ima najveću čvrstoću materijala. Čvrstoća uzoraka sa metakaolinom je najniža,

samo 79 % vrijednosti čvrstoće betona bez dodataka. Kako su ti uzorci imali najbolju obradivost, smanjenjem količine vode, obradivost bi bila u rangu sa ostala tri uzorka ali bi se zbog nižeg vodovezivnog faktora mogla očekivati veća čvrstoća. Očekuje se porast čvrstoće uzoraka sa letećim pepelom, pa bi ispitivanje čvrstoće nakon 90 dana vjerojatno dalo nešto drukčije rezultate i odnose. Isto tako, istraživanje je napravljeno samo sa jednom količinom cementa i vodocementnim, odnosno vodovezivnim faktorom. Za bolje zaključke trebalo bi napraviti još mješavina varirajući količine cementa, dodataka i vode.

14. LITERATURA:

[1] Krstulović P.: Svojstva i tehnologija betona, Građevinsko – arhitektonski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.

[2] Đureković,A.:Cement,cementni kompozit i dodaci za beton,Institut građevinarstva Hrvatske i Školska Knjiga,Zagreb,1996

[3] UkrainczykV.: Beton-Struktura svojstva tehnologija

[4]Juradin S., Krstulović P.: Samozbijajući beton; Predavanja iz Građevinskih materijala

[5] Frane Mršić-Božinović.: Završni rad na temu: Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona. 2015.godina Split

[6] Završni rad- Pajičić Petar: *Utjecaj mineralnih dodataka (vapnenca i silike) na svojstva svježeg i očvrslog betona*; Diplomski rad; Sveučilište u Splitu - Građevinsko-arhitektonski fakultet; Split, 2009.

[7] Ivan Krstić.: Završni rad na temu: Određivanje sastava betona i ispitivanje njegovih svojstava u svježem i očvrslom stanju. 2016.godina Split

[8] Jelena Mandić, PRIMJENA LETEĆEG PEPELA U PRIPRAVI GEOPOLIMERA, DIPLOMSKI RAD, KTF, 2009

[9] Vlajić Dražan Analiza utjecaja silicijske prašine i metakaolina na svojstva samozbijajućeg betona, diplomski rad , FGAG 2012

[10]https://www.google.com/search?q=portland+cement&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiNuPvyp4rSAhVGG5oKHaKYCAgQ_AUICCgB#imgrc=ZqQIskt9_G_YBM:

[11]www.gredinmarkovec.si/kamenolom/kameni-agregat-pridobivanje/

[12]www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1425/820/britanski_rocktron_reciklira_pepeo_u_maleziji_za_proizvodnju_cementa

[13]http://srb.sika.com/sr/solutions_products/02/02a001.html

[14]https://www.google.com/search?q=metakaolin&oq=metakaolin&aqs=chrome..69i57j69i60j69i61l2j69i60.1678j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8

[15] http://www.cemex.hr/Userfiles/pdf/Tehnicke%20upute/CEM%20II%20B-M%20S-LL%2042,5%20N-SvKajo.pdf