

Utjecaj punila od betonskog otpada na svojstva samozbijajućeg betona

Lovrić, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:123:216581>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Mislav Lovrić

Split, 2016.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Mislav Lovrić

Utjecaj punila od betonskog otpada na svojstva samozbijajućeg betona

Diplomski rad

Split, 2016.

Utjecaj punila od betonskog otpada na svojstva samozbijajućeg betona

Sažetak:

Samozbijajući beton je beton koji se sam zbija i ispunjava oplatu bez upotrebe vibracijskih uređaja. SZB u odnosu na običan beton ima veći sadržaj sitnih čestica uz obaveznu upotrebu superplastifikatora. U ovom radu su se izradile mješavine SZB sa potpunom ili djelomičnom zamjenom uobičajenih punila sa punilom dobivenim mljevenjem betonskog otpada - šuta. Cilj istraživanja je utvrditi utjecaj ovakvog dodatka na svojstva SCC u svježem i očvrslom stanju. Provedena istraživanja su: V – lijevak, razastiranje slijeganjem, J – prsten, L – kutija, te tlačna čvrstoća nakon 7, 14 i 28 dana, dinamički modul elastičnosti i upijanje.

Ključne riječi: Samozbijajući beton, sitne čestice, punilo, betonski otpad, obradivost, tlačna čvrstoća.

Influence of filler concrete waste on properties of self compacting concrete

Abstract:

Self-compacting concrete, compacting and filling formwork without the use of vibrating devices. The composition of self-compacting concrete is similar to normal concrete, but with some important differences. Among other things, there is a higher content of fines and mandatory use of superplasticizer. In this study, mixture were made with complete or partial replacement of fillings, filled with concrete waste. The aim of the study was to see how the composition of the concrete affects the properties of the fresh and hardened state. Next studies have been performed: V - funnel , spreading settling, J - ring , L - box , and compressive strength after 7, 14 and 28 days , modulus of elasticity and absorption .

Keywords: Self-compacting concrete, small particles, filler, concrete waste, workability, compressive strength.

Sadržaj:

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | UVOD | 1 |
| 1.1. | RAZVOJ SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 1 |
| 1.2. | SVOJSTVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 3 |
| 1.3. | PRIMJENA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 4 |
| 2. | PROJEKTIRANJE SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 6 |
| 2.1. | MATERIJALI ZA IZRADU SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 6 |
| 2.1.1. | <i>Cement</i> | 6 |
| 2.1.2. | <i>Agregat</i> | 6 |
| 2.1.3. | <i>Kemijski dodaci</i> | 7 |
| 2.1.4. | <i>Mineralni dodaci [5]</i> | 8 |
| 2.1.5. | <i>Vlakna za mikroarmiranje</i> | 9 |
| 2.2. | OSNOVNE SMJERNICE ZA PROJEKTIRANJE SAMOZBIJAJUĆEG BETONA [6] | 9 |
| 2.2.1. | <i>Model projektiranja samozbijajućeg betona – CBI metoda [6]</i> | 10 |
| 3. | SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 15 |
| 3.1. | SVOJSTVA SVJEŽEG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 15 |
| 3.1.1. | <i>Sposobnost tečenja</i> | 15 |
| 3.1.2. | <i>Sposobnost popunjavanja</i> | 16 |
| 3.1.3. | <i>Sposobnost zaobilaženja prepreka</i> | 16 |
| 3.1.4. | <i>Otpornost prema segregaciji</i> | 16 |
| 3.1.5. | <i>Pumpabilnost</i> | 16 |
| 3.2. | SVOJSTVA OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 17 |
| 3.2.1. | <i>Tlačna čvrstoća</i> | 17 |
| 3.2.2. | <i>Vlačna čvrstoća</i> | 17 |
| 3.2.3. | <i>Statički modul elastičnosti</i> | 17 |
| 3.2.4. | <i>Puzanje</i> | 17 |
| 3.2.5. | <i>Skupljanje</i> | 18 |
| 3.2.6. | <i>Prianjanje za armaturu</i> | 18 |
| 3.2.7. | <i>Otpornost na posmičnu silu u ravnini spajanja betona</i> | 18 |
| 3.2.8. | <i>Otpornost na požar</i> | 19 |
| 3.2.9. | <i>Trajnost</i> | 19 |
| 3.3. | REOLOŠKA SVOJSTVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 19 |
| 4. | METODE ISPITIVANJA SVOJSTAVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 21 |
| 4.1. | METODE ISPITIVANJA SVOJSTAVA SVJEŽEG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 21 |
| 4.1.1. | <i>Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem [14]</i> | 21 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.1.2. | <i>Ispitivanje V-lijevkom [14]</i> | 24 |
| 4.1.3. | <i>Ispitivanje J-prstenom [14]</i> | 26 |
| 4.1.4. | <i>Ispitivanje L kutijom [14]</i> | 28 |
| 4.1.5. | <i>Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu [14]</i> | 30 |
| 4.1.6. | <i>Ostale metode [14]</i> | 31 |
| 4.2. | METODE ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA U OČVRSLJOM STANJU [14]..... | 32 |
| 4.2.1. | <i>Ispitivanje tlačne čvrstoće betona</i> | 32 |
| 4.2.2. | <i>Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa</i> | 33 |
| 4.2.3. | <i>Ostale metode</i> | 33 |
| 5. | REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA | 35 |
| 5.1. | KORIŠTENJE BETONSKOG OTPADA ZA NOVE KONSTRUKCIJE (R. SRI RAVINDRARAJAH) [20] | 35 |
| 5.1.1. | <i>Uvod</i> | 35 |
| 5.1.2. | <i>Izvori betonskog otpada</i> | 36 |
| 5.1.3. | <i>Kvaliteta i količina betonskog otpada</i> | 36 |
| 5.1.4. | <i>Svojstva betonskog agregata</i> | 37 |
| 5.1.5. | <i>Svojstva recikliranog betonskog otpada</i> | 38 |
| 5.1.6. | <i>Kalcijev silikatne opeke iz zdrobljenog betona</i> | 38 |
| 5.1.7. | <i>Zaključak</i> | 39 |
| 5.2. | PROUČAVANJE SVOJSTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S DODATKOM PRAHA OPEKE I PRAHA MRAMORA (ER. SINGH, ER. ROHIN KAUSHIK, ER. GURNIWAZ SINGH) [21]..... | 39 |
| 5.2.1. | <i>Uvod</i> | 39 |
| 5.2.2. | <i>Eksperimentalni dio</i> | 39 |
| 5.2.3. | <i>Zaključak</i> | 40 |
| 5.3. | UTJECAJ DODATKA MLJEVENE OPEKE NA SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLJOG SAMOZBIJAJUĆEG LAGANOG BETONA - SCLC (SANDRA JURADIN, KATARINA GRBEŠA) [22]..... | 40 |
| 5.3.1. | <i>Uvod</i> | 40 |
| 5.3.2. | <i>Materijal i sastav SCLC mješavina</i> | 40 |
| 5.3.3. | <i>Analiza eksperimentalnog dijela</i> | 42 |
| 5.3.4. | <i>Zaključak</i> | 43 |
| 5.4. | ISKORISTIVOST SRUŠENOG BETONSKOG OTPADA ZA NOVU KONSTRUKCIJU (HUSAIN A., AND ASSAS M.M.) [23] | 44 |
| 5.4.1. | <i>Uvod</i> | 44 |
| 5.4.2. | <i>Istraživanje</i> | 45 |
| 5.4.3. | <i>Eksperimentalne tehnike</i> | 46 |
| 5.4.4. | <i>Tlačna čvrstoća betona</i> | 50 |
| 5.4.5. | <i>Zaključak</i> | 51 |
| 5.5. | UPOTREBA UMJETNOG KAMENOG OTPADA KAO PUNILO U BETONIMA (E.K. SHIRAZI, R. MARANDI, N. AFSHAR, M.ALIBABAIE AND A. SOOKI) [24] | 53 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.5.1. | <i>Uvod</i> | 53 |
| 5.5.2. | <i>Materijali i metode</i> | 54 |
| 5.5.3. | <i>Rezultati i rasprava</i> | 55 |
| 5.5.4. | <i>Zaključak</i> | 57 |
| 5.6. | ANALIZA IZVODLIVOSTI PONOVRNOG KORIŠTENJA OTPADNOG PUNILA BITUMENSKE MJEŠAVINE ZA PROIZVODNJU SAMOZBIJAJUĆIH BETONA (J. MARTIN, J. R. MONTERO, F. MORENO, J.L. PIQUERAS SALA, M.C. RUBIO) [25] | 57 |
| 5.6.1. | <i>Materijali i metodologija</i> | 57 |
| 5.6.2. | <i>Rezultati i rasprava</i> | 59 |
| 5.6.3. | <i>Zaključak</i> | 62 |
| 6. | EKSPERIMENTALNI DIO RADA | 64 |
| 6.1. | UVOD | 64 |
| 6.2. | MATERIJALI | 65 |
| 6.2.1. | <i>Cement [27]</i> | 66 |
| 6.2.2. | <i>Agregat</i> | 68 |
| 6.2.3. | <i>Superplastifikatori</i> | 68 |
| 6.2.4. | <i>Ostali dodaci betonu</i> | 70 |
| 6.3. | PRORAČUN SASTAVA BETONA..... | 75 |
| 6.4. | NAČIN PRIPRAVE POKUSNIH MJEŠAVINA | 77 |
| 6.5. | REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA SVJEŽEG BETONA | 79 |
| 6.5.1. | <i>Metoda ispitivanja V-ljevaka</i> | 80 |
| 6.5.2. | <i>Metoda ispitivanja rasprostiranja – slijeganja</i> | 82 |
| 6.5.3. | <i>Metoda ispitivanja J – prstenom</i> | 85 |
| 6.5.4. | <i>Metoda ispitivanja L – kutijom</i> | 88 |
| 6.5.5. | <i>Ispitivanje temperature i volumne mase</i> | 90 |
| 6.6. | MOGUĆI UZROCI LOŠIM SVOJSTVIMA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA | 92 |
| 6.7. | REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA OČVRSLOG BETONA..... | 95 |
| 6.7.1. | <i>Ispitivanje tlačne čvrstoće</i> | 96 |
| 6.7.2. | <i>Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa i izračun dinamičkog modula elastičnosti</i> | 99 |
| 6.7.3. | <i>Ispitivanje kapilarnog upijanja</i> | 101 |
| 7. | ZAKLJUČAK | 105 |
| 8. | LITERATURA | 107 |

1. UVOD

Samozbijajući beton je beton superiorne sposobnosti tečenja, koji teče isključivo pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, tijekom čega se deaerira (nema zarobljenih mjehurića zraka) i u potpunosti popunjava oplatu zaobilazeći armaturu te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez upotrebe vibracijskih uređaja. To je građevinski materijal koji se sastoji od cementa, agregata, vode i aditiva kao i obični beton te još nekoliko novih sastavnica kao što su koloidni silikati, pucolanski materijali, portlandski leteći pepeo (PFA), mikrosilika, metakaolin, kemijski dodaci koji doprinose posebnim zahtjevima kao što su tečenje, čvrstoća, visoka obradivost, otpornost na kemijske i mehaničke utjecaje, otpornost segregaciji te trajnost. [1]

Prednosti samozbijajućeg betona:

- Lako se ugrađuje i ekonomičan je,
- Pogodan za sve primjene koje zahtijevaju vrhunsku izvedbu i završnu obradu,
- Smanjuje opseg poslova koji su potrebni za ugradnju, izravnavanje i završnu obradu,
- Primjeren za teške konstrukcije i složene kalupe,
- Povećana izvedivost i odlična rana čvrstoća,
- Samoizravnavanje smanjuje vrijeme ugradnje,
- Nije potrebno zbijanje,
- Smanjena buka i problemi i vezi sa zdravljem i sigurnošću,
- Glatka površina koja zahtijeva minimalnu daljnju završnu obradu.[2]

1.1. Razvoj samozbijajućeg betona

Kada je građevinska industrija u Japanu doživjela pad dostupne kvalificirane radne snage 1980. godine, osjetila se potreba za betonom koji bi prevladao problem nekvalitetne izrade. Potrebno je napomenuti da je problem trajnosti betona, odnosno betonskih konstrukcija, još mnogo ranije, negdje polovinom sedamdesetih godina, počeo ozbiljnije zaokupljati pažnju istraživača na području tehnologije betona, odnosno pažnju građevinskih inženjera – konstruktera. [4]



Slika 1.1.: Petronas Twin Towers izgrađen od samozbijajućeg betona 1998. godine [3]

Rješenje za navedene probleme ponudio je profesor Okamura sa Sveučilišta u Tokiju prvom „korisnom“ verzijom SZB završenom 1988. godine, imena „high performance concrete“ (performance engl. – svojstva), koja je kasnije preimenovana kao „ Self Compaction High Performance Concrete“. Ovakav beton je bio definiran na sljedeći način, u tri uobičajene faze starosti:

- u svježem stanju mora imati efekt samozbijanja
- u fazi očvršćivanja mora biti bez inicijalnih defekata
- nakon očvršćivanja očekuje se da bude otporan na vanjske utjecaje

Kasnije studije razvoja samozbijajućeg betona, uključujući osnovnu studiju obradivosti betona, iznijeli su Ozawa i Maekawa. [33]

Krajem 90-ih godina samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi. Ključni sastojak za izradu samozbijajućih betona jest nova generacija superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koja je omogućila projektiranje sastava betonske mješavine potrebne viskoznosti i granice tečenja.

Tako je prvi značajniji europski projekt izveden ovom vrstom betona bila izgradnja cestovne mreže u Švedskoj, gdje su ovu vrstu betona proučavali u Švedskom istraživačkom institutu (Concrete Research Institute CBI). Kasnije je primjeni ove vrste betona u Europi značajno pridonijelo udruženje *Europskih proizvođača samozbijajućeg betona* (EFNARC) koja je razvila

specifikacije i smjernice za korištenje SZB koje pokrivaju niz tema, od odabira materijala i recepture mješavina do značajnosti metoda ispitivanja. Od tih godina objavljeni su mnogi znanstveni radovi i održane konferencije za ovu vrstu betona što je bilo poticaj za daljnjom primjenom SZB u praksi.

O važnosti razvoja samozbijajućeg betona govore i podaci u sve većoj upotrebi takvog betona na značajnim objektima, ne samo u Japanu nego i u cijelom svijetu. [5]

1.2. Svojstva samozbijajućeg betona

Prilikom projektiranja sastava samozbijajućeg betona potrebno je prvenstveno prepoznati kakve zahtjeve rezultirajući beton mora ispuniti.

Pri tom se prate zahtjevi u skladu s Europskim smjericama poput:

- Razred tlačne čvrstoće
- Maksimalna veličina zrna agregata D_{max}
- Razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava :
- Maksimalni vodocementni faktor
- Minimalna količina cementa
- Dodatni zahtjevi za samozbijajući beton:
- Vrijednost T_{500} (rasprostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
- Ispitivanje L kutijom
- Otpornost segregaciji
- Temperatura svježeg betona
- Drugi tehnički zahtjevi

Karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju su:

- Tečenje: rast deformacija materijala bez povećanja naprezanja, procjenjuje se metodom rasprostiranja slijeganjem (Slump flow).
- Viskoznost: otpor materijala tečenju, procjenjuje se mjerenjem u reometru, empirijskim postupcima kao što je ispitivanje pomoću V-lijevka, a mogu se primijeniti i druge metode (određivanje parametara T_{500} , O-lijevak, Orimet).

- Sposobnost zaobilaženja prepreka: sposobnost svježeg samozbijajućeg betona da teče i zaobilazi gustu armaturu te popunjava oplatu, a da pritom ne dođe do segregacije.

- Otpornost segregaciji: izražava se kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu.

Osnovne karakteristike sposobnosti popunjavanja oplata samozbijajućim betonom su tečenje i viskoznost kojoj uvelike pridonosi udio superplastifikatora u mješavini.[6]

1.3. Primjena samozbijajućeg betona

Danas se samozbijajući beton ugrađuje u sve građevine i sve vrste elemenata, na način kako je propisano specifikacijama.



Slika 1.2.: Petronas Etihad, sportski stadion u Manchester, sidreni blokovi koji podupiru krov stadiona izgrađeni od samozbijajućeg betona, 2002. godine. [7]

Niskogradnja i visokogradnja: diljem svijeta, pogotovo u Japanu, primjena samozbijajućeg betona u izgradnji infrastrukturnih građevina primjenjuje se od 1980. godine. Potreba za radnom snagom, brza izgradnja i slično dovela je do primjene nove vrste specijalnog betona. Također, ideje arhitekata u neobičnim elementima, dovela je do potrebe nove vrste betona, koje će moći pratiti željenu geometriju i plijeniti pažnju promatrača, (slika 1.1., slika 1.2 i slika1.4.)

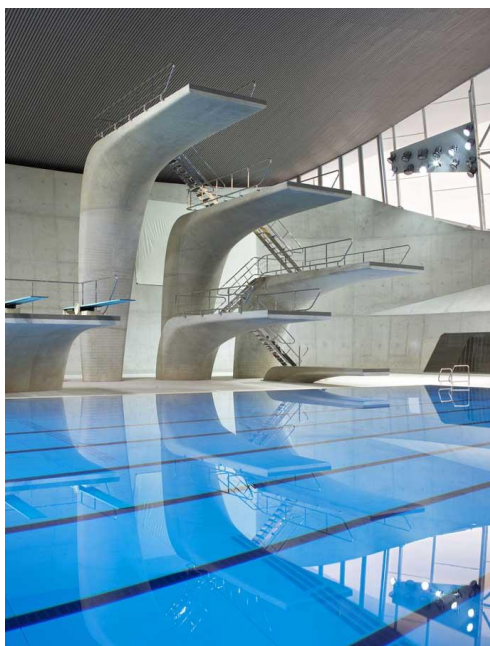
Tunelogradnja: kod tunelogradnje bitno je naglasiti kako je primjena samozbijajućih betona idealna za popunjavanje oplata profila tunela, na način upumpavanja sa jedne strane tunela, te izlaska betonske mješavine na vrhu i odzračivača (slika 1.3.)



Slika 1.3.: Niayesh tunel, tunel u Teheranu (Iran), izrađen od samozbijajućeg betona 2012. godine [8]

Ploče, podovi i zidovi: u visokogradnji, pored ekonomičnosti gradnje (što manje utrošenog materijala), vrlo je važno dobro popuniti oplatu tankih i gusto armiranih elemenata.

Sanacije: primjena samozbijajućih betona također je dobra za sanacije pojedinih konstruktivnih elemenata. Sanacija se uglavnom izvodi, do i iza prve armature od površine betona, te isto tako ako je velika korozija šipke potrebna je zamjena. Kako su to uglavnom tanki dijelovi za betoniranje, najbolje rješenje je upumpavanjem samozbijajućeg betona u oplatu. [5]



Slika 1.4.: Olimpijski bazen u Londonu, zakrivljeni toranj izgrađen od samozbijajućeg betona 2012. godine [9]

2. PROJEKTIRANJE SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

2.1. Materijali za izradu samozbijajućeg betona

Sastavni materijali za samozbijajući beton su slični, gotovo isti kao i oni za izradu običnog betona. Kontrola kvalitete pojedinih materijala za izradu samozbijajućih betona ispituje se prema normama.

Uz osnovne komponente cementa, agregata i vode, često se dodaju i kemijski dodaci poput superplastifikatora ili dodatka za modifikaciju viskoznosti. Uz to dodaju se i mineralni dodaci kao što su punila, leteći pepeo, silikatna prašina, pigmenti i drugi. Samozbijajući beton je jako osjetljiv i na male varijacije u pogledu kvalitete samih sastavnih komponenata i njihovog doziranja, te upravo zbog toga potrebno je posvetiti veliku pozornost kvaliteti i količini udjela sastavnih komponenata.

2.1.1. Cement

Izbor cementa za pojedine vrste samozbijajućeg betona određuju svojstva pojedinih cemenata i njihovih namjena, ali isto tako cement mora biti u skladu sa preporukama proizvođača i traženim svojstvima projektanta. Obzirom na veliku količinu praškastih materijala, što znači i veliku količinu cementa, potrebno je koristiti miješane portland cemente CEM II ili CEM I u kombinaciji sa mineralnim dodacima. Svojstva cementa koja utječu na reološka svojstva betona su finoća mliva i sadržaj trikalcijskog silikata (C_3S), koji je najvrjedniji cementni mineral, jer brzo razvija čvrstoću i najviše doprinosi konačnoj čvrstoći cementa. Međutim većom finoćom i većim sadržajem C_3S povećava se i plastična viskoznost, što znači da će se smanjiti sposobnost rasprostiranja. Prema preporukama Europskog udruženja proizvođača samozbijajućih betona *EFNARC* dozvoljeni sadržaj C_3S ne smije biti veći od 10%, jer će prouzročiti probleme kod obradivosti. Prema tim preporukama dozvoljena količina cementa je $350 - 450 \text{ kg/m}^3$, u protivnom sve više može dovesti do povećanog skupljanja.

2.1.2. Agregat

Agregat koji se koristi može biti prirodni ili drobljeni, maksimalne veličine zrna 20mm (u Hrvatskoj 16mm). Prilikom projektiranja sastava i izrade samozbijajućeg betona agregat dijelimo u dvije skupine: krupni i sitni agregat (pijesak).

Krupnim agregatom nazivaju se frakcije veličine 4 – 8 i 8 – 16 mm. Razmak šipki armature i zaštitni sloj betona od oplata, glavni su uvjeti koji određuju maksimalnu veličinu zrna. Sitnim

agregatom naziva se frakcija 0 – 4 mm. Utjecaji sitnog agregata na svojstva samozbijajućeg betona veća su od krupnog agregata. Svojim sitnim česticama (manjim od 0,125 mm) cementna pasta „podmazuje“ krupna zrna agregata, te je na taj način smanjen kut unutarnjeg trenja čestica agregata, isti efekt se postiže diskontinuiranom granulometrijskom krivuljom. Dijelovi agregata sitniji od 0,125 mm nazivaju se punilom, filerom ili praškastom frakcijom. Agregati za samozbijajuće betona moraju ispunjavati tehnička svojstva kao i agregati za obične betone, te ispunjavati opće i posebne zahtjeve bitne za krajnju namjenu betona. Analizom granulometrijskog sastava samozbijajućeg betona, došlo se do zaključka da je kod ove vrste betona velika potreba za sitnim česticama.

2.1.3. Kemijski dodaci

Kemijski dodaci su materijali, kojim se modificiraju svojstva svježeg betona, te se dodaju tijekom miješanja betona. Ako se koristi više od jednog kemijskog dodatka, tada je potrebno ispitivanjem dokazati kompatibilnost tih dodataka. Najučestaliji kemijski dodaci koji se koriste kod izrade samozbijajućih betona su superplastifikatori i dodaci za modifikaciju viskoznosti.

Superplastifikatori, treće generacije na bazi polikarboksilata je dodatak koji smanjuje količinu vode u betonskoj mješavini do 35%, uz poboljšanje obradivosti. Upotrebljavaju se za proizvodnju betona dobre fluidnosti i visoke čvrstoće. Oni su važna komponenta kod proizvodnje betona, a pogotovo kod samozbijajućeg, jer omogućuju postizanje tečenja betona. Superplastifikator povećava sposobnost tečenja bez utjecaja na viskoznost.

Modifikator viskoznosti, druga važna komponenta koja se primjenjuje za izradu samozbijajućih betona, koji kako sama riječ kaže mijenja viskozitet, odnosno plastičnu viskoznost. Često se ovi dodaci koriste kod betona za pumpanje, koji nemaju dovoljan viskozitet cementne paste, jer je vrlo malo cementa ili je veća količina superplastifikatora. Ovi dodaci za pumpabilnost se dobivaju kemijskim modificiranjem celuloze i hidrolizom škroba.

Modifikatori viskoznosti moraju zadovoljiti sljedeće:

- imati visoku topivost u alkalnoj sredini cementne paste
- ne smiju imati značajan utjecaj na hidrataciju
- sposobnost povećanja viskoziteta ili smanjenja viskoziteta
- mogućnost da se dodaju kao ostali dodaci u betonu

Modifikatori viskoznosti mogu imati dvojaku funkciju:

- da djeluju adsorpcijski na površini vrlo finih praškastih čestica
- neadsorpcijski, disperzija u vodi za miješanje betona

Modifikator viskoznosti primjenjuje se u vrlo malim količinama (0,1 – 0,2% na masu cementa). Učinkovitost modifikatora viskoznosti uvelike ovisi o vrsti superplastifikatora, te je vrlo bitno da su ta dva dodatka kompatibilna. Također, svaka vrsta modifikatora viskoznosti utječe u kombinaciji i sa mineralnim dodacima (leteći pepeo, punilo, silikatna prašina).

Ostali kemijski dodaci, poput aeranata, usporivača ili ubrzivača vezanja mogu se koristiti za postizanje određenih svojstava, baš kao i kod običnih betona. No isto tako, vrlo je bitno ispitati kompatibilnost tih dodataka s drugim dodacima u betonu.

2.1.4. Mineralni dodaci [5]

Mineralni dodaci dodaju se betonu da bi se poboljšala reološka svojstva, da bi povećali otpornost na pojavu segregacije, da bi smanjili toplinu hidratacije, ujedno i smanjili skupljanje betona, te smanjili utjecaj od alkalno-silikatne reakcije.

Mineralne dodatke možemo podijeliti na dva tipa. Tip I koji ne sudjeluje u kemijskim procesima, ali povoljno utječe na fizikalna svojstva svježeg betona, u tu skupinu spadaju punila i pigmenti. Tipu II, koji aktivno sudjeluje u procesu hidratacije pripisujemo pucolanski (leteći pepeo i silicijsku prašinu) i hidraulični (granulirala zgora) dodatak.

Punila ili filer, su sitne čestice koje prolaze kroz sito 0,125mm, ali zapravo najpovoljnija je frakcija koja ima prolazak kroz sito od 0,063 mm. Punilo svojim rasporedom čestica, oblikom i apsorpcijom uvelike utječe na zahtjeve za vodom. Iako, ne sudjeluje u procesu hidratacije, popunjava strukturu cementne paste.

Pigmenti su dodaci koji su ne topivi u vodi, čija je svrha obojiti građevne materijale na bazi cementa i vapna. Zbog veće fluidnosti samozbijajućeg betona, pigmenti se unutar smjese jednoliko rasprostiru i postiže se veća ujednačenost boje. Obzirom na veću količinu paste kod samozbijajućih betona, moguće je očekivati da će za postizanje potrebne gustoće boje biti potrebna i veća količina pigmenta nego u sastavu običnih betona. Dodaju se u samozbijajući beton samo zbog boje.

Leteći pepeo je fini prah, dobiven kao nusprodukt u termoelektranama koje imaju pogon na ugljen. Kemijski sastav pepela ovisi o vrsti ugljena koji se koristi kao gorivo. Upotrebom letećeg

pepela poboljšava se obradivost, smanjuje se toplina hidratacije te se smanjuje sadržaj cementa, a samim time i cijena proizvoda. Međutim prevelika količina ovog dodatka može uzrokovati toliku kohezivnost cementne paste da ona ne teče. Jedan dio letećeg pepela djeluje kao punilo, dok drugi dio djeluje kao vezivo.

Silikatna prašina je fini pucolanski materijal koji se sastoji od amorfnog silicijevog dioksida, a nastao je kao nusprodukt u elektrolučnim pećima kod proizvodnje elementarnog silicija ili ferosilicijskih legura. Fine silikatne prašine u sastavu pridonose boljoj koheziji, otpornosti segregaciji, te reduciraju izdvajanje vode u fazi očvršćivanja i povećavaju čvrstoću i svojstva trajnosti. Ukoliko se predoziraju mogu dovesti do neželjenih pojava

Zgura (troska, drozga, šljaka) dobiva se pri proizvodnji željeza u visokim pećima kao ostatak. Naglim hlađenjem tekuće zgure koja pliva na rastaljenom željezu ona se granulira u zrna klinkerskog oblika. Postoje dva oblika zgure bazična i kisela. Bazična zgura sadrži najmanje 50 % bazičnih oksida CaO i Al_2O_3 , a ostatak je najvećim dijelom SiO_2 . Kisela zgura sadrži znatno manje od 50 % bazičnih oksida CaO i Al_2O_3 a prevladava SiO_2 . Kao vezivo upotrebljava se samo bazična zgura. Zgura sama nema vezivna svojstva, ali svojstva dobije nakon dodavanja katalizatora (vapno, gips). Glavni mineral bazične zgure je belit koji ima produkte hidratacije skoro identične kao i hidrati belita iz cementnog klinkera. Odnosno proces hidratacije zgure i proces hidratacije portland cementnog klinkera su istog osnovnog tipa. [10]

2.1.5. Vlakna za mikroarmiranje

U sastavu samozbijajućih betona, također moguće je primijeniti i vlakna za mikroarmiranje. Najčešće se upotrebljavaju polimerna vlakna koja sprječavaju nastanak pukotina uzrokovanih skupljanjem betona. Također jednako često se upotrebljavaju i čelična vlakna koja povećavaju duktilnost i vlačnu čvrstoću betona. Njihova upotreba može smanjiti fluidnost i sposobnost popunjavanja betona, te povećati pojavu blokiranja.

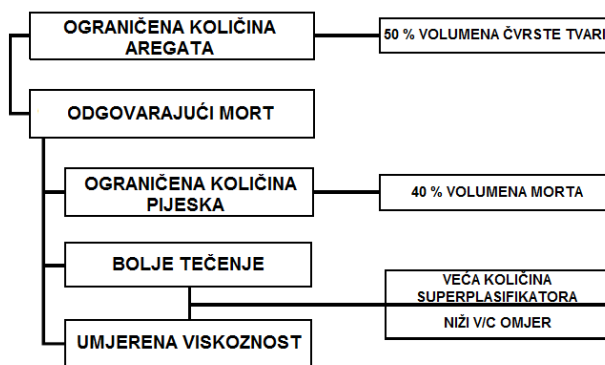
2.2. Osnovne smjernice za projektiranje samozbijajućeg betona [6]

Osnovni principi metode projektiranja samozbijajućeg betona koju su razvili Okamura i Ozawa [39]:

- volumen krupnog agregata u betonu je 50 %
- sve čestice agregata veće od 0,09 mm smatraju se agregatom, a manje od 0,09 mm vezivom

- vodovezivni omjer i količina superplastifikatora određuju se ispitivanjem morta s pomoću V-lijevka
- preporučuje se vrijednost rasprostiranja slijevanjem 650 mm te se prema tome prilagođava udio superplastifikatora.

Način dobivanja svojstva samozbijanja betona prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1.: Način dobivanja svojstava samozbijanja kod betona [11]

Na temelju ove metode nastale su mnogobrojne druge modificirane metode koje se mogu primijeniti za širi raspon materijala [34]. Razvijena je metoda kojom se može odrediti potreban udio sitnog agregata u mortu za sitni agregat različitog oblika zrna i granulometrijskog sastava. Također je za ispitivanje upotrebljen V-lijevak, za koji se smatra da daje pouzdanije rezultate od ispitivanja s pomoću U-kalupa. Zatim predložena još racionalnija metoda određivanja zadovoljavajuće kombinacije vodovezivnog omjera i udjela superplastifikatora. Na Sveučilištu u Delftu provedena su istraživanja samozbijajućeg betona zasnovana na modelu Ozawe i Okamure, ali s nizozemskim materijalima. Na University College London također su provedena opsežna istraživanja samozbijajućeg betona, a glavne su se razlike odnosile na povećani udio pijeska u mortu i mogućnost variranja većeg raspona udjela agregata. Razvijene su i druge metode projektiranja sastava, kao što su CBI metoda, JSCE metoda, LCPC pristup. [34-36]

2.2.1. Model projektiranja samozbijajućeg betona – CBI metoda [6]

CBI metoda za projektiranje sastava samozbijajućeg betona razvijena je u Švedskom institutu za istraživanje cementa i betona. Najvažnija razlika između ove i ostalih metoda je u određivanju sadržaja agregata i paste. Prednost ove metode je što uzima u obzir granulometriju kombiniranog agregata (drobljenog i riječnog), primjenjiva je za bilo koju specificiranu veličinu krupnog i sitnog agregata i uzima u obzir uvjete ugradnje.

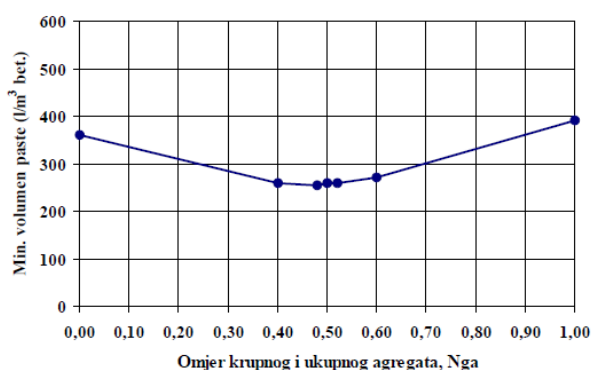
Princip projektiranja prema CBI metodi sastoji se u tome da se samozbijajući beton promatra kao zbroj tekuće faze, faze paste i krute faze - agregata. Pri projektiranju sastava potrebno je uzeti u obzir nekoliko kriterija:

1. Projektni zahtjevi, koji se temelje na specifičnim zahtjevima iz projekta, a odnose se na minimalnu tlačnu i vlačnu čvrstoću. Ovim kriterijem su obično uvjetovani v/c omjer i parametri trajnosti.

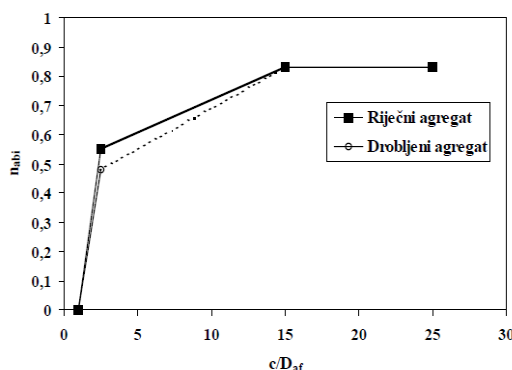
2. Kriterij detalja odnosi se na razmještaj armature te oblik presjeka koji uvjetuju minimalni potrebni volumen paste kontroliranjem razmaka krupnih zrna agregata.

3. Kriterij sadržaja šupljina odnosi se na određivanje minimalnog udjela paste prema omjeru količine krupnog agregata i ukupnog agregata (N_{ga}). No, volumen potreban za ispunjavanje šupljina između zrna agregata nije dovoljan, s obzirom da volumen paste mora biti veći od sadržaja šupljina kako bi beton mogao teći, pa se ovaj kriterij primjenjuje za određivanje optimalnoga volumnog omjera između krupnog i ukupnog agregata. Na slici 2.2. prikazan je primjer za mješavinu riječnog agregata 0-8 mm i drobljenog agregata 8-16 mm.

4. Kriterij blokiranja zasniva se na geometriji presjeka, a proračunom se dobiva minimalni potrebni volumen paste kako bi se izbjeglo blokiranje zrna agregata između armaturnih šipki. Povećanjem udjela paste povećava se unutrašnji razmak između zrna agregata. Na slici 2.3. prikazani su rezultati studije o riziku blokiranja agregata dobiveni ispitivanjima pri institutu CBI. Dvije krivulje na slici predstavljaju ovisnost između omjera blokiranja volumena agregata (n_{abi}) i između slobodnog prostora i promjera zrna agregata (c/D_{af}) za riječni i drobljeni agregat.



Slika 2.2.: Određivanje min. volumena paste prema kriteriju sadržaja šupljina [6]



Slika 2.3.: Ovisnost između volumena zaglavljelog agregata (n_{abi}) i omjera slobodnog prostora i promjera zrna agregata (c/D_{af}) [6]

$$n_{abi} = V_{abi}/V_t$$

V_{abi} – volumen zaglavljelog agregata

V_t – ukupni volumen betona

c – slobodni prostor između armaturnih šipki ili drugih prepreka

$$D_{af} = M_i - 1 + 0.75(M_i - M_{i-1})$$

M_i, M_{i-1} – najveća i najmanja veličina zrna agregata

Prema ovom modelu moguće je izračunati najveću količinu agregata (ili najmanji volumen paste) za izbjegavanje blokiranja agregata.

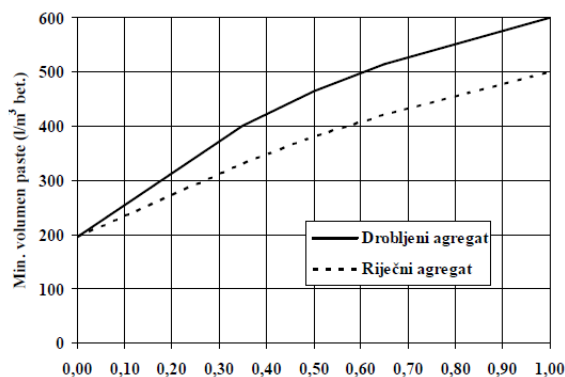
Rizik blokiranja:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_{ai}}{\eta_{abi}} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{ai}}{V_t} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ai}}{V_{abi}} = 1$$

V_{ai} – volumen agregata

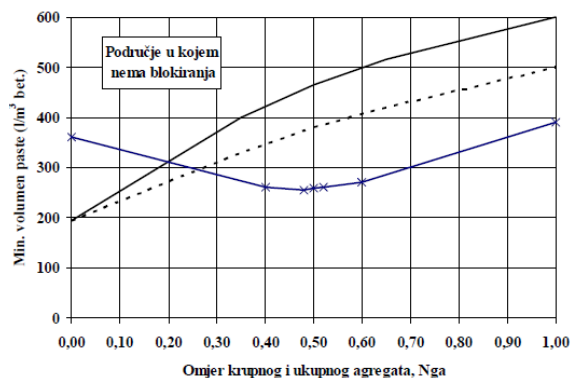
V_{abi} – volumen zaglavljelog agregata

Primjenom ove jednadžbe, uz variranje količine krupnih zrna u odnosu na ukupnu količinu agregata (N_{ga}) i upotrebom stvarne granulometrije agregata iz preliminarnih istraživanja, dobiva se dijagram kao na slici 2.4. Iz prikazanog se dijagrama za omjer krupnog agregata u ukupnom agregatu, N_{ga} , može odrediti minimalni potreban volumen paste.



Slika 2.4.: Određivanje minimalnog volumena paste prema kriteriju blokiranja zrna agregata[6]

Iz sumarnog dijagrama, prikazanog na slici 2.5., vidljivo je da je za udio krupnog agregata do približno 20 % mjerodavan kriterij sadržaja šupljina, a kod većeg udjela agregata dominira kriterij blokiranja. Na dijagramu se također vidi da je minimalna količina paste potrebna za vrijednost $N_{ga} = 0,4-0,55$. Proračun minimalne količine paste za izbjegavanje pojave blokiranja zrna agregata pretpostavlja razmak armature od 34 mm, vrijednost koja se uzima kao reprezentativna za građevine kao što su primjerice mostovi.

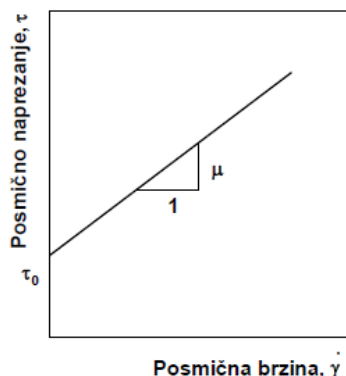


Slika 2.5.: Minimalni volumen paste[6]

Prethodnim koracima je određen minimalni volumen paste, maksimalni dopušteni vodocementni omjer, vrsta cementa i sadržaj zraka.

Odabere li se količina cementa i vode, samo je djelomično definiran sastav paste jer u njega ulaze i ostale sitne čestice. Pod pretpostavkom da je određen sadržaj cementa u betonu, moguće je proračunati dodatni volumen potreban za postizanje ukupnog minimalnog volumena paste koji čine punila i drugi mineralni dodaci. Zbog toga se u ovoj fazi projektiranja mjere reološka svojstva morta i zatim se bira najpovoljniji sastav.

Svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju mogu se dobro opisati Binghamovim modelom (slika 2.6.).



Slika 2.6.: Binghamov reološki model[6]

Materijal se do granice tečenja (τ_0) ponaša kao kruto tijelo, a nakon toga dolazi do posmičnog popuštanja i materijal počinje teći. Povećanje brzine tečenja prouzročit će povećanje otpora, a nagib μ nazivamo plastična viskoznost i ona označuje mjeru otpora povećanju brzine tečenja. Kod samozbijajućeg betona je granica tečenja niža, pa je potrebna velika viskoznost matrice da ne dođe do segregacije. Za postizanje stabilnosti betonske mješavine potrebno je formirati što viskozniju matricu (pasta i sitne čestice), a betonski kompozit što manje viskoznosti. Ako pasta ima premalu viskoznost, doći će do problema segregacije, a ako je viskoznost prevelika, smanjit će se obradivost mješavine. To može dovesti do pojave da beton teče presporo, prerano dolazi do skrućivanja betona (tikotropije), a posljedica je brzi prestanak tečenja.

3. SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

Beton, obični ili samozbijajući je složeni građevinski materijal čija svojstva je vrlo teško jednostavno odrediti. Kao materijal mora zadovoljiti dva osnovna zahtjeva:

- u svježem stanju mora biti dovoljno gibljiv i podatljiv, da bi mogao ispuniti sav prostor u kalupu ili oplati
- u očvrsлом stanju mora imati tražena fizikalno-mehanička svojstva.

Oba ova zahtjeva podjednako su važna za kvalitetu betonske konstrukcije. Ukoliko prvi zahtjev nije ispunjen, drugi ni ne može biti ispunjen. [26]

Način ugradnje betona utjecati će na njegova svojstva u očvrsлом stanju, pa se projektirani beton može razmatrati u tri faze:

- u svježem stanju mora imati efekt samozbijanja,
- u fazi očvršćivanja mora biti bez inicijalnih defekata,
- nakon očvršćivanja mora biti otporan na vanjske utjecaje. [12]

3.1. Svojstva svježeg samozbijajućeg betona

Da bi se odredile karakteristike svježeg običnog betona, često puta je bilo dovoljno ispitati konzistenciju, metodama slijeganjem ili rasprostiranjem. Međutim kod svojstava svježeg samozbijajućeg betona nije dovoljno ispitati samo svojstvo slijeganja i rasprostiranja, jer nam ne daje u potpunosti podatke o ostalim svojstvima svježeg betona, kao što su viskoznost, sposobnost prolaska zapreka, te pojave segregacije. Zbog toga, svojstva svježeg samozbijajućeg betona potrebno je definirati kroz nekoliko razreda konzistencije: rasprostiranje – slijeganjem (SF), viskoznost (VS), sposobnost prolaska (PA), te otpornost na segregaciju (SR). [5]

3.1.1. Sposobnost tečenja

Sposobnost tečenja je osnovno svojstvo koje definira sposobnost betona da sam teče pod vlastitom težinom, te se ispituje metodom rasprostiranja – slijeganjem. Ovo svojstvo je tek prvi parametar koji definira razred konzistencije. Ispitivanje sposobnosti tečenja je svojevrsna kontrola konzistencije na gradilištu prije ugradnje velikih količina betona. [5]

3.1.2. Sposobnost popunjavanja

Sposobnost betona da popunjava je sposobnost kojom beton vlastitom težinom teče i popunjava prostor u oplati. Tečenje betona definirano je njegovom fluidnošću, što daje ocjenu koliko „daleko“ će beton teći i koliko dobro će popuniti prostor u oplati.[5]

3.1.3. Sposobnost zaobilaznja prepreka

Sposobnost betona da zaobilazi prepreke određuje svojstvo tečenja u ograničenom i suženom prostoru, između šipki armature i oplata. Određivanjem svojstva betona da zaobilazi prepreke, saznaje se nivo rizika svježe betonske mješavine koja bi mogla narušiti ili potpuno blokirati krupni agregat, koji ne može proći između šipki armature ili same oplata. Prilikom definiranja sposobnosti zaobilaska prepreka potrebno je uzeti u obzir geometriju, gustoću armature, te maksimalnu veličinu zrna agregata u betonskoj mješavini.[5]

3.1.4. Otpornost prema segregaciji

Otpornost prema segregaciji možemo definirati kao sposobnost cementne paste da spriječi relativno kretanje krupnog agregata u betonu. Segregacija svježeg betona je fenomen koji se dovodi u vezu sa plastičnom viskoznošću i gustoćom cementne paste. Najčešće do segregacije dolazi ako je gustoća agregata veća od gustoće cementne paste i ako je viskoznost paste mala. Često puta segregacija betona je vidljiva tek nakon skidanja oplata, kada se na površini vidi tzv. „gnijezdo“, koje se stvorilo između zrna krupnog agregata, kojemu nedostaje cementnog morta. Kod pojave izdvajanja vode također može doći do segregacije, jer veća, odnosno teža zrna padnu na dno mješavine, dok na površini se nalazi cementna pasta i voda.

Kod samozbijajućih betona pojava segregacije minimizirana je dobrom cementnom pastom, međutim veliki utjecaj na segregaciju ima i sama ugradnja betona, zbog toga je definirana visina ugradnje samozbijajućih betona.[5]

3.1.5. Pumpabilnost

Svi razredi samozbijajućeg betona su pumpabilni. Otežano može biti samo kod betona visoke viskoznosti, sa malom veličinom zrna i velikom količinom punila ili vlakana. Ne postoji metoda kojom bi se ispitivalo svojstvo pumpabilnosti, te se to može prepustiti ocjeni iskusnog inženjera na gradilištu.[5]

3.2. Svojstva očvrsllog samozbijajućeg betona

Pri usporedbi običnog i samozbijajućeg betona po pitanju svojstava u očvrslom stanju, ne bi trebali biti velike razlike. Samozbijajući betoni mogu biti velikih razreda tlačnih čvrstoća kao i malih razreda tlačne čvrstoće. Međutim što se tiče trajnosti, beton se promatra na nivou mikrostrukture, koja se razlikuje između običnih i samozbijajućih betona. Samozbijajući betoni zbog svoje veće gustoće i kompaktnije strukture pokazali su bolja svojstva trajnosti.

Također vrlo važno je spomenuti da je jako teško usporediti obični i samozbijajući beton, jer bez obzira na isti w/c faktor, te količinu cementa, količina dodataka je znatno različita.

3.2.1. Tlačna čvrstoća

Ako usporedimo tlačne čvrstoće običnog i samozbijajućeg betona istog w/c faktora, samozbijajući beton će pokazati veću čvrstoću zbog jače veze između agregata i očvrslle paste. Također, na temelju dugogodišnjeg ispitivanja pokazalo se da su veće tlačne čvrstoće kod drobljenog agregata, nego kod prirodnih agregata.

3.2.2. Vlačna čvrstoća

Obzirom da količina paste nema značajnog utjecaja na čvrstoću betona može se pretpostaviti da je vlačna čvrstoća ista kao i kod standardnog betona istog razreda čvrstoće. Pri dimenzioniranju armirano – betonskih presjeka na pukotine, toplinsko širenje, mikroarmiranih betona i sl. koristi se vlačna čvrstoća betona dobivena ispitivanjem savijanjem betonske grede

3.2.3. Statički modul elastičnosti

Gledajući prostorni model betona volumno, agregat ima najveći udio, tako da vrsta i količina agregata najviše utječe na konačni modul elastičnosti betona. Ukoliko je agregat većeg modula elastičnosti, analogno tome je i beton većeg modula elastičnosti. Međutim, zbog većeg udjela cementne paste nego kod običnih betona, generalno govoreći, samozbijajući betoni imaju malo niži modul elastičnosti, što nije nužno pravilo. To je posebno važno znati, kod otpuštanja prednapetih šipki i užadi. Ispitivanja su pokazala da što je manja čvrstoća to je veća razlika u modulu elastičnosti između samozbijajućih betona i običnih betona.

3.2.4. Puzanje

Puzanje je definirano kao povećanje deformacije uzorka koji je izložen konstantnom naprezanju. Puzanje kod tlačno napreznih prednapetih elemenata smanjuje silu prednapinjanja i uzrokuje polagani prijenos opterećenja sa betona na ojačanja. Kod vlačno napreznih elemenata

puzanje može biti pozitivno jer djelomično oslobađa zaostala naprezanja od npr. skupljanja i temperaturnih promjena. Sama pojava puzanja događa se unutar cementne paste i uvjetovana je njenom poroznošću koja je vezana sa vodocementnim faktorom. Za vrijeme hidratacije, poroznost cementne paste se smanjuje. Na puzanje utječe i vrsta cementa. Cementi koji brže hidratiziraju imaju veću čvrstoću kod opterećenja, manji omjer naprezanja/deformacija i manje puzanje. Može se zaključiti da se zbog povećanog udjela cementne paste kod samozbijajućih betona očekuje veće puzanje, međutim ono je u dozvoljenim granica koje je definirano Eurocodom. [5]

3.2.5. Skupljanje

Skupljanje betona je volumna deformacija uslijed smanjenja vlažnosti, koja se manifestira u vidu smanjivanja dimenzija neopterećenih betonskih elemenata tijekom vremena, približno linearno u svim pravcima. Ova pojava može biti uzrokovana isparavanjem vode iz betona, hidratacijom cementa i karbonatizacijom. Na veličinu skupljanja velik utjecaj ima veličina i udio agregata te modul elastičnosti upotrijebljenog agregata u betonskoj mješavini. Veći volumni udio agregata i veći modul elastičnosti uzrokuje smanjenje skupljanja. Upotrebom krupnijeg agregata možemo smanjiti pojavu skupljanja, ali pri tome je potrebno voditi računa da imamo dosta paste za ispunjenje ostalih svojstava samozbijajućeg betona. [5]

3.2.6. Priljepljivanje za armaturu

Obzirom da je jedno od osnovnih svojstava samozbijajućeg betona fluidnost i kohezija, realno je za očekivati da će to dovesti do puno bolje veze betona i armature. U elementu je potrebno ostvariti i dostatan zaštitni sloj betona iznad šipki kako bi bilo omogućeno pravilno prenošenje naprezanja između armature i betona bez oštećenja konstrukcije. Kod običnih betona nerijetko dolazi do čupanja armature kada je dostignuto maksimalno naprezanje na spoju između betona i armature, međutim kod samozbijajućih betona dolazi samo do proklizavanja armature u zadržavanje dodatne prionjivosti. [5]

3.2.7. Otpornost na posmičnu silu u ravnini spajanja betona

Nakon ugradnje i očvršćivanja samozbijajućeg betona površina je glatka i nepropusna. Ukoliko se element izvodi u nekoliko slojeva i sa prekidima, potrebno je površinu između dva sloja tretirati kako bi omogućilo pravilno preuzimanje i prijenos posmične sile. Preporučeni postupci za tretman površine su premazivanje usporivačima vezanja, četkanje i postupci hrapavljenja površine. [5]

3.2.8. Otpornost na požar

Europska komisija je beton klasificirala kao nezapaljiv materijal koji ne pridonosi širenju plamena, otrovnih plinova, niti dima. Tijekom izlaganja elementa požaru zadržava se većina svoje čvrstoće uz polagano širenje topline kroz beton. Ponašanje samozbijajućih betona u požaru slično je ponašanju običnih betona uz razliku da imaju manju plinopropusnot (zbog velike gustoće mikrostrukture) što može uzrokovati jače ljuštenje i lakše otpadanje zaštitnog sloja zbog većeg pritiska pare i plinova unutar strukture. [5]

3.2.9. Trajnost

Smanjena trajnost običnog betona je bio jedan od problema koji je doveo do razvoja samozbijajućeg betona. Ukoliko je sastav pravilno projektiran samozbijajući beton odlikuje se homogenom strukturom sa minimalnim udjelom šupljina i glatkom nepropusnom površinom, što su preduvjeti povećane trajnosti građevina. Prilikom vibriranja betona, može doći do problema koji su uzrokovani nedovoljnim vibriranjem, npr. zarobljeni zrak, loše prijanjanje betona oko armature. Problem stvara i samo prekomjerno vibriranje koji može dovesti do segregacije. Ti svi problemi su eliminirani upotrebom samozbijajućeg betona koji se ugrađuje bez upotrebe vibratora i potpuno upotpunjuje oplatu djelovanjem vlastite težine. [5]

3.3. Reološka svojstva samozbijajućeg betona

Reologija je znanstvena disciplina koja proučava svojstva tečenja i deformabilnosti materijala. Često se koristi za opis tečenja fluida. Reološka ispitivanja izvode se u mnogim zemljama za istraživanja i kontrolu kvalitete materijala.

U smislu betona, reologija se koristi za opis njegove obradivosti. Samozbijajući beton možemo tretirati u reološkom smislu kao elasto-plastičan viskozni sustav u kojem su voda, čestice cementa i zrna agregata međusobno povezani unutarnjim silama veze. Reologija omogućava procjenu utjecaja različitih materijala na tečenje betona te se može koristiti i za proračun sastava samozbijajućeg betona i njegovu ocjenu ugrađivanja. Obzirom da je beton složen materijal sa vremenskim ovisnim svojstvima tečenja i različitim veličinama čestica, primjena reoloških ispitivanja nije jednostavna.

Koncept reologije se temelji na vezi između posmičnog naprezanja i brzine posmične deformacije koja se prikazuje na krivulji tečenja. Postoje mnogi modeli koji opisuju vezu posmičnog naprezanja i brzine posmične deformacije za različite materijale. Binghamov model

koristi se najčešće za opis tečenja betona zbog svoje jednostavnosti i najboljeg opisa većine betonskih mješavina.

Najčešći reološki parametri koji se koriste za opis obradivosti betona su granica tečenja i plastična viskoznost opisani Binghamovim modelom. U nekim slučajevima za bolji opis može se koristiti i Herschel-Bulkley model u kojem se računaju tri parametra, granica tečenja i dva koja se ne mogu izraziti fizikalnim svojstvima. Poznavanjem reoloških parametara granice tečenja i plastične viskoznosti dobiva se kvantitativna slika obradivosti betona. Binghamova jednadžba predstavlja linearnu vezu između posmičnog napona τ i brzine posmične deformacije $\dot{\gamma}$, u kojoj su granica tečenja τ_0 i plastična viskoznost η konstante.

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

U Binghamovoj jednadžbi τ_0 predstavlja granicu tečenja pri kojoj elasto-plastičan viskozan materijal prelazi u stanje tečenja (plastično stanje), a vrijednost mu se kreće od 50 – 200 N/mm².

Koeficijent plastične viskoznosti η predstavlja unutrašnji otpor prema fluidnom tečenju, a vrijednost mu je od 20 – 100 Pas (Paskal sekunde). Što je veća viskoznost, veći je i otpor tečenju, a betona se opisuje kao „ljepljiv“. [12]

4. METODE ISPITIVANJA SVOJSTAVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

4.1. Metode ispitivanja svojstava svježeg samozbijajućeg betona

U razmatranju ovih metoda, potrebno je uzeti u obzir nekoliko smjernica:

- jedna od glavnih poteškoća u osmišljavanju ovakvih testova je da moraju procijeniti tri različita, ali povezana, svojstva svježeg samozbijajućeg betona: njegovu sposobnost popunjavanja (tečenje), sposobnost zaobilaženja prepreka (bez blokiranja na armaturi) te otpornost na segregaciju (stabilnost). Ni jedan test do sada osmišljen ne može mjeriti sva tri svojstva istovremeno.

- ne postoji jasna veza između rezultata ispitivanja i izvedbe na gradilištu.

- nema jasnih smjernica o granicama usklađenosti.

- preporučuju se dupla ispitivanja.

- metode ispitivanja i rezultati iskazuju se za maksimalnu veličinu agregata do 20 mm; različiti rezultati ispitivanja i/ili različite dimenzije oprema mogu biti prikladne za ostale veličine agregata.

- različiti rezultati ispitivanja mogu biti prikladni za beton koji se stavlja u vertikalnim i horizontalnim elementima.

- različite vrijednosti ispitivanja mogu biti prikladne za različite gustoće armatura.

- u obavljanju ispitivanja, beton treba uzorkovati, u skladu s HRN EN 12350-1 .

- ispitivanja se provode prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12. [13]

4.1.1. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem [14]

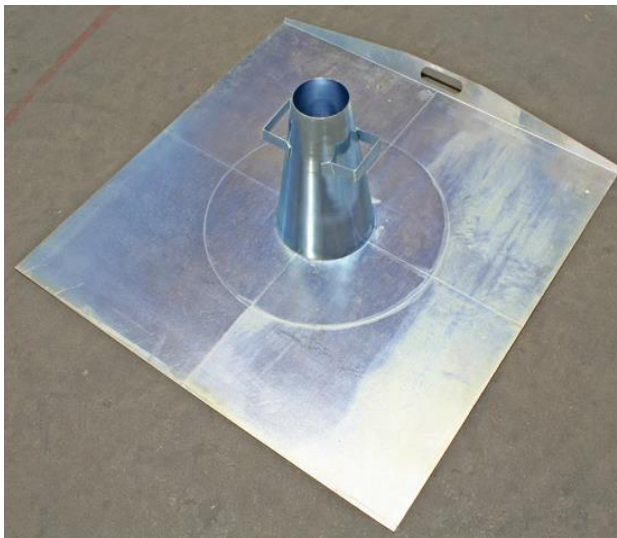
Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-8 kojom se određuje sposobnost punjenja i viskoznost samozbijajućeg betona, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće za maksimalnu veličina zrna agregata od 40mm.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- Abramsov kalup u obliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm (slika4.1.).

- osnovna ploča debljine minimalno 2cm, dimenzija 90x90cm, obilježena krugom u središnjem dijelu ploče za nalijeganje stošca, i koncentričnim krugom promjera 500 mm.

- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, ručnik



Slika 4.1: Abramsov kalup i osnovna ploča [15]

Postupak ispitivanja:

Ploču je potrebno postaviti na ravnu i stabilnu površinu, navlažiti ju spužvom ili krpom bez procjeđivanja vode na površini. Također je potrebno navlažiti i unutrašnju stranu stošca te ga postaviti na označeni središnji dio ploče.

Lopaticom se ispuni sav stožac s mješavinom. Beton se ne nabija već se ručnikom ili lopaticom poravna razina na vrhu stošca i odmakne višak.

Potom se vertikalno podigne stožac i pusti da beton slobodno isteče. Istovremeno se pokrene štoperica i zabilježi vrijeme potrebno da beton dosegne krug promjera 500mm.

Mjeri se i konačni promjer betona u dva okomita smjera. Prosjek zabilježena dva promjera je vrijednost rasprostiranja slijeganjem mjeren u mm.

Potrebno je i zapaziti svojstva vizualno, poput odvajanja vode, morta ili cementne paste na rubovima, isto tako i nakupine krupnog agregata na određenom mjestu (segregacija).

Rezultati ispitivanja:

Što je veća vrijednost rasprostiranja slijeganjem (SF), to je veća sposobnost da ispuni oplatu pod vlastitom težinom. Za samozbijajuće betone ta vrijednost mora biti najmanje 650 mm. Nema

općeprihvaćenih savjeta o tome koje su razumne granice tolerancije tih vrijednosti, no ± 50 mm se smatra optimalnim.

Vrijeme T_{500} je sekundarni pokazatelj protoka. Niže vrijednosti označavaju veću protočnost. Prema nekim istraživanjima vrijeme prihvatljivo za primjenu u građevinarstvu je 3-7 sekundi, dok se za stambene primjene preporuča vrijeme tečenja od 2-5 sekundi.

Kod veće segregacije najviše će krupnog agregata ostati u središnjem dijelu ploče dok će mort i cementna pasta isteći na rubovima. Kod manje segregacije mort se odlijeva na rubovima betona.

Vrijednost SF je srednja vrijednost promjera d_1 i d_2 zaokružena na 10mm:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

gdje je:

SF - razred rasprostiranja-slijeganjem [mm]

d_1 - najveći promjer rasprostrtog betona [mm]

d_2 - promjer rasprostrtog betona za 90° u odnosu na d_1 [mm]

Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja su prikazani u tablici 4.1.

Tablica 4.1.: Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja[32]

| RAZRED | Tečenje betona (mmm) | Primjena |
|---------------|-----------------------------|---|
| SF1 | 550-650 | - nearmirani ili slabo armirani betonski elementi - ugradnja pumpama (npr. tunelska obloga) - elementi malih dimenzija koji ne zahtijevaju veliko horizontalno tečenje betona |
| SF2 | 660-750 | - prikladno za većinu radova (zidovi, stupovi...) |
| SF3 | 760-850 | - za elemente s gustom složenom armaturom složenog oblika |

Vrijednost T_{500} se zaokružuje na desetinku sekundi i ona karakterizira viskoznost betona.

Pri tome se svrstavaju u razrede viskoznosti prikazani u tablici 4.2.

Tablica 4.2.: Razredi viskoznosti[32]

| RAZRED | $T_{500}(s)$ | Primjena |
|---------------|--------------------------------|--|
| VS1 | $<2,0$ | - elementi s gusto postavljenom armaturom, horizontalni elementi, elementi složeno poprečnog presjeka i oblika (velikih širina i dužina) |
| VS2 | $\geq 2,0$ | - prikladan za većinu radova (zidovi, stupovi...) |

4.1.2. Ispitivanje V-lijevkom [14]

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-9 i koristi se za određivanje viskoznosti i sposobnosti popunjavanja (sipkosti) betona maksimalne veličine agregata od 20mm. Iako je ispitivanje osmišljeno da mjeri protočnost, rezultat je pod utjecajem drugih svojstava betona. Oblik obrnutog stošca je odgovoran za blokiranje betona ukoliko isti sadrži previše krupnog agregata. Duže vrijeme protoka može biti povezano s niskom deformabilnosti zbog visoke viskoznosti paste te s velikim trenjem među česticama.

Iako je uređaj jednostavan, učinak suženja lijevka na protok betona nije potpuno poznat.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- V-lijevak (slika 4.2.)
- kanta za prihvat betona
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ručnik

Postupak ispitivanja:

Postavi se V- lijevak na čvrstu i ravnu površinu te se navlaži unutrašnja površina lijevka. Vrata na dnu kalupa se drže otvorena kako bi višak vode mogao oteći. Vrata se zatvore i postavi se kanta ispod lijevka.

Lijevak se u potpunosti ispuni s betonom bez zbijanja ili nabijanja, a lopaticom se poravna i očisti višak betona.

U prvih desetak sekundi se otvore vrata na dnu posude nakon punjenja i dopusti betonu da proteče pod vlastitom težinom. Pokrene se štoperica onog trenu kad se vrata otvore i zapiše vrijeme potrebno da se izvrši pražnjenje lijevka (vrijeme protoka). Trenutak koji se uzima da se ispraznio lijevak je onaj trenutak kad se nadzire svjetlost kroz lijevak odozgo gledano.

Cijelo ispitivanje se mora obaviti u roku od 5 minuta.



Slika 4.2: V-lijevak sa stalkom [16]

Rezultati ispitivanja:

Ovo ispitivanje mjeri sposobnost protoka betona odnosno kraće vrijeme protoka pokazuje veću protočnost. Optimalno vrijeme protoka samozbijajućeg betona je oko 10 sekundi. Ograničeni protok kroz V-lijevak i produženo vrijeme protoka mogu dati naznake o osjetljivosti mješavine na blokiranje. Vrijeme protoka se značajno povećava što je beton skloniji segregaciji. Razredi viskoznosti prikazani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3.: Razredi viskoznosti (V-lijevak) [32]

| RAZRED | Vrijeme tečenja (s) |
|---------------|----------------------------|
| VF1 | <9,0 |
| VF2 | 9,0-25,0 |

4.1.3. Ispitivanje J-prstenom [14]

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-12 kojom se definira svojstvo popunjivosti i prolaznosti samozbijajućih betona te se koristi i za ispitivanje otpornosti prema segregaciji.

Prilikom ovog ispitivanja mjeri se razastiranje, vrijeme razastiranja T_{500} i stopa blokiranja.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- Abramsov kalup u obliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm
- osnovna ploča debljine minimalno 2cm, dimenzija 90x90cm, obilježena krugom u središnjem dijelu ploče za nalijeganje stošca, i koncentričnim krugom promjera 500 mm
- J prsten - čelični prsten koji je izbušen kako bi se vertikalno mogle postaviti šipke armature različitih promjera i na različitim razmacima (optimalno da je tri puta veći razmak od vrijednosti veličine maksimalnog zrna agregata). Promjer prstena je 300mm , a visina 100 mm.
- ravna šipka duljine 400mm
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, ručnik



Slika 4.3.: Oprema za ispitivanje J- prstenom[17]

Postupak ispitivanja:

Prvenstveno je potrebno navlažiti ploču i unutrašnju površinu stošca. Na ravnu podlogu se postavlja ploča na koju se centrično namješta kalup oblika krnjeg stošca, a oko kalupa J-prsten tako da bude smješten koncentrično kalupu i čvrsto pritisnut (slika 4.3.). Beton se ulijeva u

stožac i pripremi se za vertikalno podizanje stošca istovremeno mjereći vrijeme razastiranja (vrijeme potrebno da beton dosegne promjer od 500mm). Izmjereno vrijeme označava se s T_{500j} .

Mjeri se konačni promjer betona u dva međusobno okomita smjera. Izračuna se prosjek dvaju izmjerenih promjera u milimetrima.

Zatim se postavlja ravna šipka na J-prsten te se mjeri relativna visinska razlika između donjeg dijela šipke i površine betona u središtu Δh_0 četiri visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima Δh_{x1} , Δh_{x2} , Δh_{y3} , Δh_{y4} . Provjerava se segregacija rasprostrtog betona i odvajanja paste na rubovima betona.

Razastiranje J-prstena SF_j srednja je vrijednost promjera d_1 i d_2 .

$$SF_j = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

gdje je:

SF_j - rasprostiranje [mm]

d_1 - najveći promjer rasprostiranja [mm]

d_2 - promjer rasprostiranja okomit na d_1 [mm]

T_{500j} izražava se u sekundama s točnošću od desetinke sekunde.

Stopa blokiranja dobije se iz izraza:

$$PJ = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0$$

gdje su Δh izmjerene visine.

Tablica 4.4.: Razredi ispitivanja J-prstenom[32]

| RAZRED | Uvjet |
|---------------|--------------------------|
| PJ1 | $PJ \leq 10$ 12 šipki |
| PJ2 | $PJ \leq 10$ 16 šipki |

Rezultati ispitivanja:

Kod ovog ispitivanja mjerenje protoka i sposobnosti zaobilazanja prepreka daju međusobno ovisne rezultate. Izmjereni protok je zasigurno uvjetovan stopom blokiranja kroz šipke armature. Količina blokiranja je manje uvjetovana obilježjima protoka, a jasnije je da za veću razliku u visini je manja sposobnost prolaza betona kroz prepreke. Blokiranje i/ili segregacija često se pouzdanije definira vizualno nego proračunom. Razredi ispitivanja J-prstenom, prikazani su u tablici 4.4.

4.1.4. Ispitivanje L kutijom [14]

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-10 kojim se određuje sposobnost prolaznosti samozbijajućeg betona kroz uske otvore između dvije ili tri armaturene šipke bez segregacije i blokiranja. Isto tako se vizualnim putem može utvrditi i ozbiljan nedostatak stabilnosti mješavine (segregacija).

Potrebna oprema za ispitivanje:

- L – kutija - kalup oblika L koji se sastoji od vertikalnog i horizontalnog dijela s kojim je odijeljen pomičnom pregradom i šipkama armature (3 glatke šipke na razmaku od 41mm ili 2 glatke šipke promjera 12mm na razmaku od 59mm) (slika4.4.)

- dodatna oprema: lopatica, štoperica i ručnik

Postupak ispitivanja:

Potrebno je postaviti kutiju na ravnu i čvrstu podlogu, osigurati da se klizna vrata mogu otvoriti slobodno i zatim ga zatvoriti. Namoči se unutarnja površina uređaja, ukloni višak vode i ispuni vertikalni presjek aparata s betonskim uzorkom. Ostavi se tako ispunjena kutija da odstoji 1 minutu. Vizualno se provjeri i zabilježi da li je došlo do segregacije. Podignu se klizna vrata i dopusti betonu da isteče van u horizontalni dio.

Kad gibanje betona prestane, mjeri se visinska razlika na kraju uređaja između površine betona i gornjeg dijela posude te između površine betona i donjeg dijela posude. Mjerenja se vrše na tri mjesta, dva na krajevima i jedno u sredini i iz tih vrijednosti se izračunaju srednje vrijednosti ΔH_1 i ΔH_2 . Razlika visina posuda i tih vrijednosti daju vrijednosti H_1 i H_2 potrebne za proračun omjera blokiranja koji najbolje definira sposobnost prolaza betona.

Cijelo ispitivanje mora se obaviti unutar 5 minuta.



Slika 4.4.: L-kutija [18]

Sposobnost prolaza betona računa se po formuli:

$$p_A = \frac{H_2}{H_1},$$

gdje je:

p_A - omjer sposobnosti prolaska

H_1 - srednja dubina betona u vertikalnom dijelu kutije [mm]

H_2 - srednja dubina betona na kraju horizontalnog dijela kutije [mm]

Tablica 4.5.: Razredi ispitivanja L kutijom[32]

| <i>RAZRED</i> | <i>Uvjet</i> | <i>Primjena</i> |
|---------------|-------------------------------|--------------------|
| <i>PA1</i> | $H_2/H_1 \geq 0,8$ 2 šipke | Razmak 80 – 100 mm |
| <i>PA2</i> | $H_2/H_1 \geq 0,8$ 3 šipke | Razmak 60 – 80 mm |

Rezultati ispitivanja:

Ako beton teče slobodno, u mirovanju će biti horizontalan, tako da je $H_2/H_1=1$. Stoga, što je omjer bliži vrijednosti 1, tj. što su vrijednosti H_1 i H_2 bliži, bolji je protok betona. Europsko udruženje je predložilo minimalnu prihvatljivu vrijednost od 0,8. Vizualno se može ustanoviti blokiranje agregata iza šipki armaturi bez obzira na računsku vrijednost sposobnosti zaobilazanja prepreka. Razredi ispitivanja L – kutijom prikazani su u tablici 4.5.

4.1.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu [14]

Ispituje se prema normi HRN EN 12350-7 koja specificira metodu određivanja sadržaja zraka u svježem betonu, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće te maksimalne veličine zrna agregata od 63 mm.

Poroznost svježeg betona se ispituje porometrom (slika 4.5.). U posudu poznatog volumena stavi se uzorak i zatim poklopi te se prostor između uzorka i poklopca popuni vodom. U poklopcu je tlačna komora poznatog volumena u kojoj se napumpa zrak do pritiska oko 1 bar, što se točno očita na manometru kao pritisak p_0 . Otvaranjem ventila pritisak se raspodijeli u posudi i tlačnoj komori pa se na manometru aparata za mjerenje sadržaja zraka (porometra) očita sadržaj zraka „z“ u % volumena posude za beton, bez računanja.



Slika 4.5.: Uređaj za ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu [18]

4.1.6. Ostale metode [14]

Određivanje segregacije sijanjem

Ispituje se stabilnost pomoću sita prema normi HRN EN 12350-11 kojom se određuje otpornost prema segregaciji mjereći pritom prolaznosti uzorka betona kroz sito veličine 5 mm. Ako samozbijajući beton ima slabu otpornost prema segregaciji, njegova pasta ili mort lako prolazi kroz sito.

Oprema koja se koristi kod ove metode je perforirano sito kvadratnih otvora veličine 5 mm s okvirom promjera 300 ili 315 mm, visine 40 ili 75 mm.

Koristi se i vaga digitalnog te kanta kapaciteta 10 – 12 litara s maksimalnim promjerom 300 ± 10 mm.

Nakon uzorkovanja, svježi beton se ostavi stajati 15 minuta i zabilježi se bilo kakvo izdvajanje vode. Gornji dio uzorka se zatim izlije u sito s otvorima 5 mm kvadratnih. Nakon dvije minute težina materijala koja je prošla kroz sito je zabilježena. Omjer segregacije se tada izračunava kao omjer uzorka koji je prošao kroz sito.

Ispitivanje U posudom

Ovo ispitivanje pruža izravnu procjenu sposobnosti tečenja koji ujedinjuje i zahtjev sposobnosti zaobilaženja prepreka.

Otvor s kliznim vratima je postavljen između dva dijela. Šipke promjera 13 mm (3 šipke) su postavljene na vratima s razmacima od 50 mm. To stvara svijetli otvor od 35 mm između rešetaka. Postoji i varijanta rešetke promjera 10mm (5 šipki) koja se odabire ovisno o stvarnom stanju u konstrukciji. U lijevom odjeljku se napuni samozbijajući beton do visine 680 mm. Zatim se podignu vrata i pusti beton da isteče prema drugom odjeljku. Mjeri se visina betona u svakom odjeljku.

Ako beton slobodno teče poput vode, u mirovanju će biti horizontalna razina betona pošto će visina u lijevom (h_1) i visina u desnom (h_2) odjeljku biti iste. Što je ta razlika bliže nuli beton se smatra tečniji i ima veću sposobnost zaobilaženja prepreka.

Samozbijajućim se smatra onaj beton koji se izdigne iznad razine minimalno 300mm.

Fill posuda (Kajima uređaj)

Ispitivanje se koristi za mjerenje sposobnosti punjenja samozbijajućeg betona s maksimalnim zrnom agregata veličine 20 mm. Uređaj se sastoji od spremnika s ravnom i glatkom podlogom. U spremniku se nalazi 35 prepreka izrađenih od PVC-a promjera 20 mm i međusobne udaljenosti 50 mm.

Na gornjoj strani je postavljena cijev za punjenje promjera 100 mm i visine 500 mm sa lijevkom na vrhu visine 100 mm. Spremnik se napuni s betonom, a razlika u visini između dviju strana spremnika je mjera sposobnosti popunjavanja betona.

Ovo ispitivanje je vrlo teško izvesti na gradilištu zbog složenosti uređaja i velike težine betona, no daje dobre smjernice o samozbijajućim karakteristikama betona.

Čak i beton s visokom sposobnošću punjenja se može pokazati lošim ako prilikom ispitivanja pokaže slabu sposobnost zaobilazanja prepreka i slabu otpornost prema segregaciji.

4.2. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju [14]

4.2.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Ispituje se tlačna čvrstoća betona prema normi HRN EN 12390-3.

Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 123390-2. Oblika su kocke ili cilindra, a dimenzije su određene normom HRN EN 123390-1. Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Uzorak je potrebno površinski očistiti prije nego se postavi u prešu. Uzorci oblika kocke se u prešu postavljaju okomito na smjer ugradnje i moraju se postaviti u sredinu preše kako bi opterećenje koje se nanosi bilo ujednačeno. Opterećenje se mora nanositi jednoliko, bez udara i mora biti između 0,2 MPa/s i 1,0 MPa/s. Maksimalno opterećenje (F) pri kojem je došlo do sloma se zabilježi kao rezultat pokusa. Tlačna čvrstoća betona se računa prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [N/mm^2]$$

gdje je:

f_c – tlačna čvrstoća betona [N/mm²]

F – maksimalno opterećenje pri slomu [N]

A_c – površina uzorka [mm²]

4.2.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12504-4 kojom se određuje brzina širenja impulsa ultrazvučnih longitudinalnih valova u betonu.

Uređaj za ispitivanje se sastoji od generatora električnih impulsa, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka dolaska na prijemni pretvarač. Mjerenje brzine omogućuje kalibracijska šipka.

Na glatku i čistu površinu betona se postavi lice pretvarača. Prethodno je potrebno premazati glatki dio betona sa medijem za spajanje kao što je mast, mazivo, mekani sapun ili kaolinska/glicerolska pasta kako bi se osigurao dobar akustični spoj između betona i pretvarača. Uz lagano pritiskanje licem pretvarača, očitaju se brzine valova na tri mjesta na površini betona, dva krajnja i jedno u sredini.

U tablici 4.6. prikazane su ocjene kvalitete betona obzirom na brzinu ultrazvučnih valova.

Tablica 4.6.: Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala [33]

| <i>Brzina ultrazvučnog vala (m/s)</i> | <i>Kvaliteta betona</i> |
|---------------------------------------|-------------------------|
| <i><1600</i> | Vrlo slab |
| <i>1600 - 2000</i> | Slab |
| <i>2000 - 2800</i> | Zadovoljavajući |
| <i>2800 - 3600</i> | Dobar |
| <i>3600 - 4400</i> | Vrlo kvalitetan |

4.2.3. Ostale metode

Ispitivanje savojne čvrstoće betona

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12390-5 koja određuje savojnu čvrstoću očvrstlog betona.

Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 12390-2. Oblika su prizme, a dimenzije su određene normom HRN EN 12390-5. Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Za ispitivanje je potrebna preša podešena u skladu s normom HRN EN 12390-5.

Ležajevi se prvotno postave na propisane udaljenosti. Potom se uzorci prizme postave u prešu tako da su centrirane na ležajevima okomito na smjer opterećenja kako bi se nanosilo jednoliko opterećenje, bez udara i između 0,04 i 0,06 MPa/s.

Ispitivanje kapilarnog upijanja

Provodi se prema normi DIN-U.M8.300 i određuje mjeru kapilarnog upijanja vode homogenih građevinskih materijala. Nakon njegovanja uzorka u trajanju od 28 dana u vlažnoj komori, uzorci se osuše u sušioniku na $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ do stalne mase. Nakon sušenja uzorka do stalne mase, drže se 24 h na relativnoj vlažnosti iznad 90 %.

Oprema za ispitivanje: posuda za vodu s rešetkastim podešavajućim nosačem, spužva, sredstvo za brtvljenje, vaga točnosti $d=0.01$ g i štoperica.

Uzorak se brtvi sa strana na minimalnoj visini od 10 mm te se vodoupojna površina uranja u posudu s vodom na dubini od 2 do 5 mm. Uranjaju se koso u odnosu na vodeno lice kako ne bi došlo do stvaranja mjehurića zraka. Mjerenja se određuju u određenim vremenskim intervalima i prekida se kada se mjerne točke mogu povezati s dovoljnom točnošću ravnom crtom, u protivnom se mjerenja nastavljaju i preko 24 sata.

Koeficijent upijanja se računa prema formuli:

$$A = \frac{\Delta m_v}{\Delta \sqrt{t}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}^{0.5}} \right]$$

gdje je:

A- koeficijent upijanja

m_v - kapilarno upijanje vode

t- vrijeme

5. REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Budući da će se u ovom radu izrađivati i ispitivati samozbijajući beton s dodacima punila od betonskog otpada („šuta“) koji sadrži opeku, mort, beton, ljepilo, pločice i slično, kroz nekoliko idućih naslova vidjeti će se rezultati i analize dosadašnjih sličnih ispitivanja.

5.1. Korištenje betonskog otpada za nove konstrukcije (R. Sri Ravindrarajah)

[20]

5.1.1. Uvod

Recikliranje materijala korištenih u konstrukcijama kojima je istekao vijek trajanja je vjerojatno staro kao i sama civilizacija. Proces recikliranja može biti definiran kao sanacija i zatim korištenje materijala za proizvodnju i / ili izrade istog ili sličnog proizvoda od kojeg je nastao otpad. U mnogim državama, rušenje i sama upotreba konstrukcije određuje značajnu kvalitetu otpada. U betonskoj industriji otpad se može iskoristiti na mnogo načina. Najbolji pristup korištenja otpada je sa minimalnom obradom, kao materijal rasutog punila. Ipak, ovo se ne čini kao najbolja metoda, ponekad s ekonomskog stajališta može biti opravdano.

Betonski otpad, kada je primjereno dodan može biti korišten kao tampon ili površinski materijal u cestovnim konstrukcijama. Betonski lom sa manjim stupnjem zagađenja mogu biti korišteni u proizvodnji agregata za novi beton. Čestice zdrobljenog betona frakcije 5 mm standardnog sita mogu biti korišteni kao zamjena za kvalitetni grubi agregat u novom betonu. Također je moguće zamijeniti prirodni fini agregat da zdrobljenim betonom finoćom ispod 5 mm novog betona.

Potreba za recikliranjem betona proizlazi iz:

- zamjena kvalitetnih prirodnih agregata
- osiguranje dovoljno agregata u betonskoj industriji
- smanjenje raspoložive površine za odlaganje otpada unutar urbanih sredina
- izbjegavanje ekološkog utjecaja na morske organizme, ograničavajući neselektivno odlaganje visokoalkalnih ($\text{pH} > 12,5$) metala u more.

5.1.2. Izvori betonskog otpada

Rušenje betonskih konstrukcija je glavni izvor odakle dolazi betonski otpad. Stambene zgrade koje su projektirane na životni vijek 50 i više godina su nekada djelomično ili potpuno srušene prije vijeka iz nekoliko razloga:

- visoki troškovi popravka i održavanja
- konstruktivne greške, tipa projektiranje ili materijal
- prenamjena objekta

Komercijalne i industrijske zgrade koje imaju manji životni vijek od stambenih, su često podvrgnute obnovi i rekonstrukciji kod promjene vlasništva ili zahtjeva dodatnih sadržaja. Inženjerske zgrade poput zračnih pista, pločnika, mostova, luka itd. su podvrgnute znatnom „trošenju“ tijekom njihovog korištenja. Ovakve konstrukcije zahtijevaju stalnu kontrolu i visoke troškove popravka i održavanja. Ponekad je ekonomičnije rekonstruirati, nego održavati stare konstrukcije.

Betonski otpad je određen direktno ili indirektno od uporabe konstrukcije. Kod betona pripremljenih u betonarama ili na gradilištu nije neuobičajeno da znatna količina neželjenog betona nastaje iz viška proizvodnje ili odbijanja kao rezultat neispunjavanja zahtjeva. Današnjom tehnologijom je moguće vratiti agregat iz viška svježeg ili neprihvaćenog betona za ponovnu upotrebu za nove betonske konstrukcije. Ipak, za neke proizvođače betona to može biti ne ekonomično, prije svega imati takva postrojenja i reciklirati stvrdnuti beton.

Ponašanje same konstrukcije određuju količinu betonskog otpada.

5.1.3. Kvaliteta i količina betonskog otpada

Betonski otpad proizlazi kao direktni rezultat rušenja zgrade ili neke konstrukcije. Objavljena je godišnja proizvodnja otpada u EEC (European Economic Community) koja iznosi oko 72 milijuna tona. Procijenjene količine betona su 37% mase otpada. Ukupna količina otpada i betona u njemu će se povećavati u budućnosti zbog prekomjernog korištenja betona. Godišnja proizvodnja otpada u SAD-u, UK, Japanu, Kanadi i Švedskoj procjenjuje se na 25, 21-23, 7-12, 3 i 2-5 milijuna tona, od toga betona 67%.

Prirodna katastrofa, kao potres može proizvesti znatnu količinu betonskog otpada. 1971. godine potres u San Fernandu i SAD-u proizveo je 5 milijuna tona betonskog otpada. Čovjek stvara katastrofu ratovima koji također rezultiraju velikim količinama betonskog otpada.

Betonski otpad od zgrada je onečišćen različitim materijalima kao čelikom, opekom, gipsom, drvom, plastikom i staklom. Za usporedbu, beton sa autocesta nije onečišćen takvim materijalima. Betonski otpad dobiven od lučkih i pomorskih građevina sadrži kloride i sulfate. Ne savjetuje se takav beton reciklirati za proizvodnju agregata.

5.1.4. Svojstva betonskog agregata

Zrna krupnog agregata, nastale drobljenjem betonskog otpada u čeljusnoj drobilici, su višekutne u odnosu na prirodni agregat. Oni se sastoje od prirodnog agregata koji je potpuno ili djelomično obavijen mortom. Količina morta zalijepljenog na agregat se smanjuje sa povećanjem veličine samog agregata. U tablici 5.1. prikazana su fizička, dok su u tablici 5.2. prikazana mehanička svojstva betonskog agregata.

Tablica 5.1.: Fizička svojstva betonskog agregata[20]

| <i>Tip agregata</i> | <i>Uglatost</i> | <i>Specifična težina</i> | <i>Upijanje vode (%)</i> |
|---------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>granit</i> | 11 | 2.67 | 0.30 |
| <i>pijesak</i> | - | 2.61 | 0.60 |
| <i>beton:</i> | | | |
| <i>> 5 mm</i> | 16 | 2.26-2.44 | 4.50-6.40 |
| <i>< 5 mm</i> | - | 2.23-2.37 | 6.70-11.3 |

Tablica 5.2.: Mehanička svojstva betonskog agregata[20]

| <i>Tip agregata</i> | <i>BS udar (%)</i> | <i>BS drobljenje (%)</i> | <i>ASTM abrazija (%)</i> |
|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>granit</i> | 14.6 | 16.9 | 18.1 |
| <i>beton</i> | 25-31 | 20-33 | 28-40 |

Budući da je mort porozniji i slabije čvrstoće, specifična težina, otpornost upijanju i otpornost na mehaničke aktivnosti poput udara, drobljenja i abrazije su manji kod ovakvog agregata u odnosu na prirodni agregat. Ako je kvaliteta originalnog betona loša, onda je i kvaliteta njegovog agregata loša. Krupni agregat (veći od 5 mm) proizveden od originalnog betona ima tlačnu čvrstoću od oko 20 MPa, te vrijednost abrazije i drobljenja su niži od onih koji su navedeni u Američkim i Britanskim standardnim specifikacijama. Da bi agregat bio prihvaćen, ASTM C – 33 zahtjeva da vrijednost abrazije po metodi *Los Angeles* bude manja od 50% i BS 882 zahtjeva da vrijednost drobljenja bude manja od 45%. Rezultati pokazuju da krupni agregat zadovoljava u svojoj kvaliteti prema navedenim standardima.

5.1.5. Svojstva recikliranog betonskog otpada

Reciklirani betonski agregat je definiran kao beton koji sadrži zdrobljeni beton sa krupnim i/ili sitnim agregatom. Tablica 5.3. rezimira tipične efekte korištenja betonskog agregata umjesto prirodnog agregata. Korištenjem krupnog betonskog agregata čvrstoća i modul elastičnosti su manji dok su upijanje i puzanje veće.

Tablica 5.3.: Svojstva recikliranog betonskog agregata[20]

| Vrsta agregata | 28-dnevna čvrstoća (MPa) | | | Modul elastičnosti (GPa) | Skupljanje sušenjem ($\mu\text{m/m}$) |
|---|--------------------------|-----------|--------|--------------------------|---|
| | Tlačna | Savijanje | Vlačna | | |
| <i>Granit + prirodni pijesak</i> | 33,8 | 4,88 | 2,41 | 29,0 | 205 |
| <i>Granit + grubi betonski agregat</i> | 29,4 | 4,39 | 2,13 | 20,9 | 335 |
| <i>Grubi betonski agregat + fini betonski agregat</i> | 28,0 | 4,15 | 1,93 | 19,7 | 405 |

Smanjenje čvrstoće uzrokovan korištenjem betonskog agregata može biti uravnoteženo djelomično ili potpuno sa dodavanjem pucolana kao leteći pepeo ili kondenzirane silikatne prašine. Smanjenje skupljanja je također reducirano dodavanjem pucolana. Prisutnost pucolana pridonosi čvrstoći njegovom reakcijom sa kalcijevim hidroksidom oslobođenog iz cementne hidratacije prisutnoj u zdrobljenim betonskim česticama. Ipak modul elastičnosti recikliranog betona je uvijek niži zbog manjeg modula starog morta.

Znanje o tehnologiji betona može biti korišteno za poboljšati kvalitetu recikliranog betonskog agregata na različite načine. Prilagodbe omjera sastojaka u mješavinama, smanjenje vode u vodocementnom faktoru... Ove prilagodbe će pomoći povećati čvrstoću kao i smanjenje dugotrajnih svojstava poput skupljanja i puzanja.

5.1.6. Kalcijev silikatne opeke iz zdrobljenog betona

Kada se betonski otpad drobi u čeljusnoj drobilici za smanjenje veličine zrna, aproksimativno 20% mase zdrobljenog betona se generira kao fine čestice. Ove fine čestice sadrže značajne količine kalcijevog hidroksida koji potječe od hidratacije cementa. Nedavna istraživanja pokazuju da se korištenje mljevenog betonskog otpada, odnosno čestica može proizvesti opeke

tlačne čvrstoće od 9 do 15 MPa. Kalcijev hidroksid i silikatne čestice predstavljaju u betonu čestice koje reagiraju te daju kalcijev silikatne produkte koji su slični pješčano-vapnenim opekama. Kada se pucolan poput letećeg pepela i silikatna prašina dodaju, tlačna čvrstoća se penje do 25 MPa. Daljnja istraživanja su potrebna za proučavanje svojstava ovakvih opeka prije prihvaćanja istih za upotrebu u konstrukcijama.

5.1.7. Zaključak

Betonski otpad može biti klasificiran u 2 kategorije, onečišćen i pročišćen. Ako se betonski otpad koristi za proizvodnju agregata za nove betonske konstrukcije tada mora biti pročišćen. Istraživanja svojstava recikliranog agregata pokazuju da se agregat može smatrati granične kvalitete s negativnim utjecajima na svojstva betona. Ipak, sa nekim modifikacijama te dodacima aditiva i pucolana, moguće je napraviti reciklirani agregat prihvatljive kvalitete. *Hankins* i *Borg* [37-38] objavili su uspješnu reciklažu betonskog pločnika starog 20 godina, kao grubog agregata za rekonstrukciju, sa znatnom uštedom novca i dobrog kvalitetnog prirodnog agregata.

Mogućnost korištenja mljevenih betonskih čestica u skupu sa pucolanom poput letećeg pepela i silikatne prašine za proizvodnju opeke nudi odličan potencijal za korištenje betonskog otpada u industriji konstrukcija.

5.2. Proučavanje svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom praha opeke i praha mramora (Er. Singh, Er. Rohin Kaushik, Er. Gurniwaz Singh) [21]

5.2.1. Uvod

Upotreba materijala kao što su prah opeke, mramorni prah i viskozne modificirajuće smjese utjecale su na znatno poboljšanje svojstava samozbijajućeg betona (prvenstveno na fluidnost). U ovom eksperimentalnom istraživanju znanstvenici su zamijenili fini agregat s prahom opeke i mramornim prahom.

Cement korišten u eksperimentu specifične je težine s početkom i krajem vezanja 125 min i 215 min.

5.2.2. Eksperimentalni dio

Svrha istraživanja je proučiti ponašanje SCC u čiju mješavinu su dodani prah opeke i mramorni prah.

Provedena su sljedeća ispitivanja:

- Ispitivanje tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana na uzorcima s dodatkom praha opeke i mramornog praha
- Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa nakon 7 i 28 dana

5.2.3. Zaključak

Sve betonske mješavine izrađene s dodatkom praha od opeke i mramora su ispunile kriterije za svježi i očvrslu samozbijajući beton.

Dobra svojstva očvrslu betona, ostvarena su sa 25% dodatka mramornog praha koji se može smatrati optimalnim sadržajem za visoke tlačne čvrstoće.

Svojstva očvrslu betona nakon 28 dana bila su poboljšana zbog veće hidratacije cementa.

Prah opeke i mramora mogu se učinkovito koristiti za proizvodnju kvalitetnih samozbijajućih betona sa zadovoljavajućim slijeganjem.

Pod određenim uvjetima, zamjena sitnog agregata sa prahom opeke i mramora, može povećati čvrstoću samozbijajućih betona.

5.3. Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrslu samozbijajućeg laganog betona - SCLC (Sandra Juradin, Katarina Grbeša) [22]

5.3.1. Uvod

Samozbijajući lagani beton (SCLC) je kombinacija samozbijajućeg betona (SCC) i laganog betona. SCLC je pogodan za izgradnju građevina koje ne zahtijevaju visoke tlačne čvrstoće betona, ali zahtijevaju male težine. Korištenjem agregat od ekspandirane gline moguće je postići zadovoljavajuće čvrstoće. U posljednje vrijeme je sve veća pozornost usmjerena na okoliš i održiv razvoj pa se beton počeo izrađivati od različitih recikliranih materijala.

Cilj eksperimentalnog istraživanja je bio utvrditi utjecaj mljevene opeke kao punila ili kao agregata na obradivost i tlačnu čvrstoću samozbijajućeg laganog betona.

5.3.2. Materijal i sastav SCLC mješavina

U pripremljanju pokusnih mješavina upotrebljeni su sljedeći materijali:

- Cement CEM I 42,5 R

- Liapor lagani agregat frakcija 0-2 mm i 4-8 mm
- Superplastifikator FTF
- Silikatna prašina
- Metakaolin
- Mljevena opeka
- Punilo od recikliranog betona
- Punilo od kamenog brašna

Za potrebe istraživanja utjecaja mljevene opeke na SCLC, izradilo se 5 različitih mješavina SCLC-a.

Cement (3.14 kg/dm^3) i superplastifikator (1.06 kg/dm^3) su korišteni u svim mješavinama. Betonske mješavine su sadržavale dvije frakcije ekspaniranog glinenog agregata: sitni lagani agregat 0-2mm i krupni lagani agregat 4-8mm. Mljevena opeka je podijeljena u dvije frakcije: kao filer ($<0.125 \text{ mm}$) i kao agregat($0.125 - 0.5\text{mm}$).

Omjeri i oznake mješavina pripremljenih u ovom radu su dane u tablici 5.4.

Tablica 5.4.: Sastav i oznake mješavina[22]

| Mješavina | cement | voda | Mljevena opeka | | Filer2 | Filer3 | silica | PCE | agregat | |
|-----------|--------|------|----------------|----------|--------|--------|--------|-----|---------|-------|
| | | | <0.125mm | >0.125mm | | | | | 0-2 | 4-8 |
| | kg | kg | Kg | kg | kg | kg | kg | kg | kg | |
| SCLC1 | 400 | 200 | 65 | - | - | - | | 4,8 | 498,2 | 513,3 |
| SCLC2 | 400 | 200 | 32 | - | - | 43,5 | | 4,8 | 498,6 | 513,7 |
| SCLC3 | 400 | 200 | 32 | - | - | - | 37 | 4,8 | 498,6 | 513,7 |
| SCLC4 | 400 | 200 | - | 173,3 | - | 156 | | 4,8 | 334,2 | 491,9 |
| SCLC5 | 400 | 200 | - | 173,6 | 142 | - | | 4,8 | 334,2 | 491,7 |

Karakteristike dodataka su dane u tablici 5.5.

Tablica 5.5.: Vrsta i oznake dodataka[22]

| Dodatak | Type of admixture | Specifična površina po Blaine-u (cm^2/g) | Specifična težina (g/cm^3) |
|---------|-------------------|--|--|
| Filer1 | Mljevena opeka | 4992 | 2.4 |
| Filer2 | Reciklirani beton | 7891 | 2.45 |
| Filer3 | Kameno brašno | - | 2.7 |
| Silica | Silica fume | > 15000 | 2.3 |

Sastav svake mješavine je određen u skladu s CBI metodom. Minimalni potrebni volumen paste za sve mješavine je određen u skladu s kriterijima sadržaja šupljina i blokiranja korištenjem krivulje za agregat.

5.3.3. Analiza eksperimentalnog dijela

5.3.3.1. Svježi beton - obradivost betona

Obradivost SCLC je ispitana na svježem betonu metodom rasprostiranja-slijeganjem, vizualnom provjerom stabilnosti, T₅₀₀ vrijeme te V- lijevak, L kutija i J - prsten metodom. Na temelju rezultata ispitivanja, betonske mješavine mogu postići različite oznake konzistencije po klasama Europskog udruženja EFNARC (tablica 5.6.).

Tablica 5.6.: Rezultati ispitivanja i klasifikacije prema EFNARC klasama[22]

| Mješavina | Rasprostiranje slijeganjem (mm) | | T500 (s) | | V-ljevak (s) | | PL | | PJ | |
|-----------|---------------------------------|--------|-----------|--------|--------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | rezultati | razred | rezultati | razred | rezultati | razred | rezultati | razred | rezultati | razred |
| SCLC1 | 762.5 | SF3 | 1.16 | VS1 | 6.96 | VF1 | 0.95 | PL2 | 15 | - |
| SCLC2 | 757.5 | SF3 | 1.87 | VS1 | 8.97 | VF2 | 0.96 | PL2 | 23.75 | - |
| SCLC3 | 655 | SF2 | 2.47 | VS2 | 7.31 | VF1 | 0.83 | PL2 | 31.75 | - |
| SCLC4 | 572.5 | SF1 | 2.17 | VS2 | 10.31 | VF2 | 0.46 | - | 46.75 | - |
| SCLC5 | 700 | SF2 | 1.00 | VS1 | 7.00 | VF1 | 0.73 | - | 36.25 | - |

Prema tablici 5.6., samo su SCLC1 i SCLC2 postigle klasu SF3 ali vizualnom provjerom su se uočile segregacija i odvajanje vode na rubovima na tim mješavinama. Ostale mješavine su stabilne, ali ljepljive (slika 5.13.b). Mješavina SCLC5 je imala zadovoljavajuće T₅₀₀ vrijeme, ali nakon dobrog početnog toka došlo je do naglog zaustavljanja. Postoji mogućnost da se pojavila tiksotropija.

Prema tablici 5.6., samo 3 mješavine zadovoljavaju kriterije L-kutije, a niti jedna mješavina nije zadovoljila norme EFNARC klasifikacije za J-prsten.

SCLC1 i SCLC2, mješavine su rezultirale odvajanjem vode na rubovima u ovim ispitivanjima isto kao i kod metode rasprostiranja-slijeganjem.

Mješavine SCLC3, nisu imale sposobnost da ispune kalup i zaobiđu prepreke pod utjecajem vlastite težine. Korištenjem aditiva poput HRWR (superplastifikator) i tekućeg modifikatora viskoznosti (VMA), trebalo bi doći do značajnog smanjenja granice tečenja i povećanja protoka.

Analizom sastava mješavina samozbijajućeg laganog betona pokazalo se da je volumen paste izvan preporučenih EFNARC raspona. U promatranim mješavinama, volumen paste je preko 42%, što je znatno veći od preporučenog raspona od 30 do 38. Odabrani minimalni zahtjevani volumen paste je bio previsok za samozbijajući lagani beton. Smanjena količina paste bise trebala dobiti po CBI metodi ali s obzirom na prirodnu krivulju agregata.

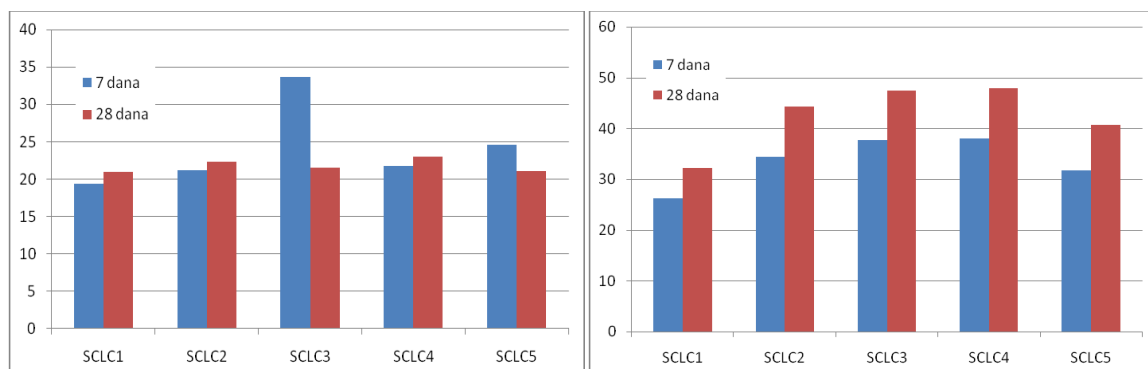
5.3.3.2. Očvršli beton - tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti

Rezultati dinamičkog modula elastičnosti su prikazani na slici 5.1.(lijevo). Prema slici 5.1 najveće su razlike u rezultatima SCLC3 nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka. To se može objasniti pogreškom mjerenja. Vrijednosti modula elastičnosti u razdoblju od 28 dana se izjednačio: 21-23 GPa.

Tlačna čvrstoća je određena nakon 7 i 28 dana. Dobiveni rezultati su prikazani na slici 5.2. (desno). Najveća tlačna čvrstoća je postignuta mješavinama SCLC4 i SCLC3. Kod SCLC4 mljevena opeka je zamijenila dio sitnog agregata, a kod mješavine SCLC3 mljevena opeka je bila punilo. Mješavina SCLC1 je također imala mljevenu opeka kao punilo, ali znatno manju čvrstoću.

SCLC1 je imala najveću količinu ovog punila dok su druge dvije mješavine (SCLC2 i SCLC3) imale manje.

Prema slici 5.1., uzorci s kombinacijom dvaju punila su rezultirale većim čvrstoćama.



Slika 5.1.: Dinamički modul elastičnosti (slika lijevo) i tlačne čvrstoće (slika desno) uzoraka različitih starosti[22]

5.3.4. Zaključak

Iz ovih rezultata se može zaključiti sljedeće:

- Mješavine imaju znatno veći volumen paste od preporučenog EFNARC raspona. Minimalni volumen potrebne paste za mješavine s laganim agregatom se treba odrediti prema kriteriju sadržaja šupljina i kriteriju blokiranja, ali koristeći krivulju za prirodni agregat.

- Mješavina s dodatkom mljevene opeke i silike su pokazala najbolja svojstva; nema segregacije i nema odvajanja vode, ali je mješavina spora. Trebali bi se dodati VMA (modifikator viskoznosti) i HRWR (reduktor vode-superplastifikator) radi smanjenja granice tečenja i povećanja protoka.

- Korištenje mljevene opeke kao punila, u kombinaciji s drugim punilima, rezultiraju većim tlačnim čvrstoćama.

- Mljevena opeka kao punilo bi trebala imati sitnije čestice, manje od 0,04 mm.

5.4. Iskoristivost srušenog betonskog otpada za novu konstrukciju (Husain A., and Assas M.M.) [23]

5.4.1. Uvod

Povećana zabrinutost za zaštitu okoliša i za promicanje načela održivog razvoja doveo je do uvođenja zakona za poticanje korištenja recikliranih agregata u odnosu na prirodni agregat. Najčešći način je sniziti prodajnu cijenu recikliranog agregata u odnosu na prirodni agregat, i to u velikoj mjeri se postiže povećanjem troškova odlagališta. Srušena mjesta su izvori velike količine otpada, koje se danas koriste kao obična odlagališta. S druge strane, građevinski zahvati su takvi da materijali koji se mogu ponovno upotrijebiti budu pomiješani sa kamenjima i zemljom, koji smanjuju vrijednost materijala, otežavaju recikliranje ili postaje neekonomično. Recikliranje otpada od srušenih zgrada je moderan pristup za zaštitu okoliša kroz dva načina, prvi je reduciranje otpada, a drugi je smanjenje upotrebe prirodnog agregata. Ponovna upotreba otpada srušenih zgrada je relativno nov problem za svijet, usprkos znatnim količinama otpada i značajnim promjenama u pravilima zaštite okoliša.

Kada su zgrade srušene kao posljedica katastrofa, njihov otpad sadrži fragmentirane građevinske komponente, namještaj i organske tvari koje je teško odvojiti. S druge strane, da je moguće selektivno srušiti zgradu, moguće bi bilo ponovno upotrijebiti većinu građevinskih materijala i komponenti. Prema istraživanjima sadržaja otpada u Nizozemskoj objavljeno je da je 20% drva, 90% čelika i 100% drugih metala poput cinka, olova i bakra su uklonjeni iz strukture ostavivši otpad zgrade, koja u prosjeku se sastoji od:

- Opeka 62%
- Betonski otpad 24%
- Lom opeke (razlomljeno) 6,1%
- Pločice 2,3%
- Bitumenizirani materijal 0,2%
- Drvo 4,7%

- Čelik 0,1%

- Ostalo 0,6%

Iako je volumen otpada velik, mnogo toga je inertno. Ipak, velike količine još uvijek će završiti na odlagalištu umjesto da se recikliraju. Otpad koji sadrži boje, otapala i razne kemikalije su potencijalno opasni i građevinski otpad koji mogu biti kontaminirani azbestom moraju tretirati kao opasan materijal.

Utvrđeno je da materijali i komponente izvađene iz razrušenih zgrada se mogu ponovno koristiti za nove građevinske radove, kao i renoviranje projekata, posebno u zajednicama s niskim prihodima u zemljama u razvoju. Također je istaknuto da se materijal koji se nije uzimao u obzir za recikliranje, odnosno ponovnu upotrebu, prije nekoliko godina pojavio na tržištu nakon nedavne globalne gospodarske krize. Na primjer, čelične armature iz srušenih zgrada reciklirana natrag u čelik! Međutim, sada se smatra isplativim donijeti mjere kako bi se olakšalo njegovo ponovno korištenje kao građevinski materijal. U međuvremenu, izvođači rušenja su također postali sve više svjesni izvedivosti samog rušenja da bi se materijali mogli lakše, ponovno upotrijebiti u novim konstrukcijama. Slijedom toga, oni daju veliku važnost za pravilno razvrstavanje, pohranjivanje i prikaz njihovih dobara. Brz razvoj industrije uzrokuje ozbiljne probleme u cijelom svijetu, kao što su iscrpljivanju prirodnih agregata i stvaranje ogromnih količinu otpadnog materijala iz građevinskog aktivnosti. Jedan od načina za smanjenje tih problema je korištenje recikliranog agregata u novim izgradnjama betonskih konstrukcija.

5.4.2. Istraživanje

Izvješća pokazuju da količina srušenog betona svake godine u Europi je oko 50 – 60 milijuna tona. Vrlo malo srušenog betona se trenutno koristi u zemljama, čak se ne koristi ni kao posteljica u izradi autocesta, odbačen je kao običan otpad. „krajnje je vrijeme da se ozbiljno razmisli o ponovnom korištenju srušenog betona za proizvodnju recikliranog betona u našoj zemlji (Indija)“. Recikliranjem, ne samo da bi se uštedjeli resursi, već bi se također promovirali siguran i ekonomičan način korištenja ovakvog betona koji je potreban sad za zemlje poput Indije, Saudijske Arabije i slično.

Istraživanja pokazuju na pozitivan rezultat rastućeg recikliranja betona, za pločnike. Ipak, tu su određeni limiti za korištenje u strukturama. Sveobuhvatno istraživanje je u tijeku otklanjanja tih ograničenja i time zagovaraju sigurno i ekonomično korištenje recikliranog betona u budućnosti nakon utvrđivanja određenih smjernica. Neki eksperimentalni radovi koji su bili provedeni 80-tih godina, istražili su svojstva betona sa recikliranim agregatom. SAD trenutno

koristi cca. 2.7. milijarde tona agregata. Od čega za pločnike ide 10-15%, dok za druge ceste i radovi ide 20-30%, a većina od oko 60 do 70% agregata koristi se u betonu za konstrukcije. Reciklirani agregat u SAD-u je proizveden od proizvođača prirodnog agregata. U nekim zemljama mnoge tehnologije za recikliranje betona su razvile i neke smjernice za recikliranje. U procesu praktičnog ponovnog korištenja, recikliranje betonskog otpada zahtjeva daljnje razbijanje i drobljenje srušenog betona. Općenito, dva tipična razreda zdrobljenih betonskih agregata može se proizvesti i klasificirati prema veličini frakcije. Jedan je grubo reciklirani betonski agregat, od kojih se tek dio može koristiti u novim betonskim ili cestovnim materijalima. Drugi je fino reciklirani betonski agregat koji je dobiven od lomljenog betona ili morta čija frakcija ne prelazi 5mm. Recikliranje, vrednovanje i primjena oba dijela su raspravljani u različitim istraživanjima.

5.4.3. Eksperimentalne tehnike

Betonski otpad je dobavljen sa rušilišta. Otpad je transportiran, zdrobljen i razdvojen. Provedeno je nekoliko testova na izdvojenom betonu u laboratoriju poput upijanja vode, granulometrijske analize agregata, ispitivanje drobljenja agregata, ispitivanja žilavosti agregata, ispitivanje abrazije, obradivosti i tlačne čvrstoće kocaka prirodnog i recikliranog agregata. Otpad je prosijan kroz sita za dobivanje finog agregata.

Istraživanjem djelomične zamjene srušenog otpada u novom betonu, pokazan je učinak otpada na čvrstoću betona. Izrađene su više od 180 kocaka u laboratoriju, pomoću dvije nazivne mješavine M15 i M20 (1:2:4 i 1:1,5:3). Efekt djelomične zamjene srušenog otpada je napravljen da bi se usporedila čvrstoća betona. Ista količina i kvaliteta cementa i finog agregata je korištena za obje mješavine. Dobivene su 7-dnevne i 28-dnevne tlačne čvrstoće kocaka u kojima je novi krupni agregat bio zamijenjen u odnosima 0%, 25%, 50%, 75% i 100%. Običan Portland cement je bio korišten u obje mješavine. Lokalno dostupni grubi pijesak je bio korišten kao sitni agregat. Lokalno dostupni drobljeni kamen je bio korišten u veličinama od 4.75 do 20 mm u cijelom istraživanju. Pitka voda se koristila, a vodocementni faktor su bili 0.60, 0.625 i 0.65.

5.4.3.1. Upijanje vode

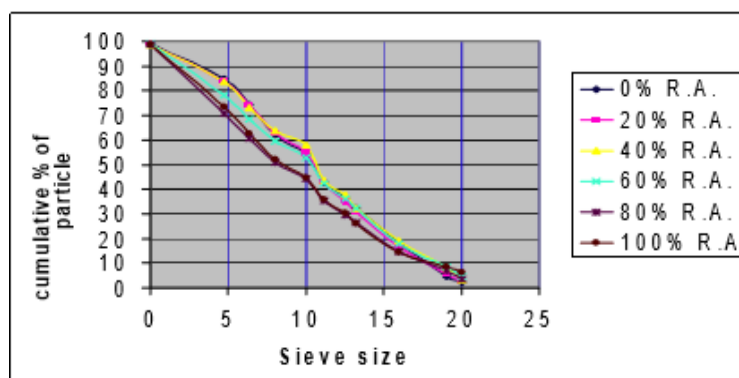
U tablici 5.7. prikazano je povećano upijanje betona s većim sadržajem recikliranog agregata zbog sadržaja starog poroznog morta na sebi.

Tablica 5.7.: Upijanje vode [23]

| | <i>Materijal</i> | <i>Promatrana vrijednost (%)</i> |
|----|--------------------------|----------------------------------|
| 1. | 0% reciklirani agregat | 1.50 |
| 2. | 25% reciklirani agregat | 2.05 |
| 3. | 50% reciklirani agregat | 2.87 |
| 4. | 75% reciklirani agregat | 3.40 |
| 5. | 100% reciklirani agregat | 4.60 |

5.4.3.2. Analiza ispitivanja agregata

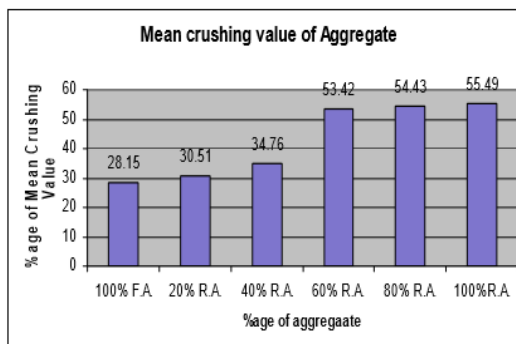
Na slici 5.2. prikazana je prosječna analiza prosijavanja agregata



Slika 5.2.: Prosječna analiza prosijavanja agregata [23]

5.4.3.3. Ispitivanje drobljenja agregata

Na slici 5.3. prikazana je srednja vrijednost drobljenog agregata sa različitim postocima recikliranog agregata.



Slika 5.3.: Srednja vrijednost drobljenog agregata sa različitim postocima recikliranog agregata[23]

5.4.3.4. Ispitivanje žilavosti agregata

Žilavost je svojstvo agregata da odoli udaru. Zbog prometnih opterećenja, cestovna kamenja su podvrgnuti udarnom djelovanju ili utjecaju, a postoji mogućnost razbijanja kamenja na manje komade. U tablici 5.8. prikazani su vrijednosti udara na različite postotke recikliranog agregata.

Tablica 5.8.: Vrijednost udara na različite postotke recikliranog agregata[23]

| | <i>Agregat</i> | <i>Vrijednost udara (%)</i> |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------|
| <i>1.</i> | <i>10% Novi agregat</i> | <i>24.67</i> |
| <i>2.</i> | <i>20% Reciklirani agregat</i> | <i>31.41</i> |
| <i>3.</i> | <i>40% Reciklirani agregat</i> | <i>34.74</i> |
| <i>4.</i> | <i>60% Reciklirani agregat</i> | <i>36.46</i> |
| <i>5.</i> | <i>80% Reciklirani agregat</i> | <i>38.74</i> |
| <i>6.</i> | <i>100% Reciklirani agregat</i> | <i>41.17</i> |

5.4.3.5. Ispitivanje habanja metodom Los Angeles

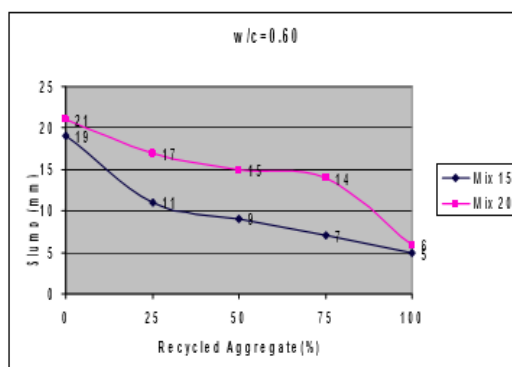
Princip Los Angeles habanje testa je pronaći postotak trošenja zbog relativnog trenja, između agregata i čeličnih kuglica. Vrijednost abrazije Los Angeles metodom prikazani su u tablici 5.9.

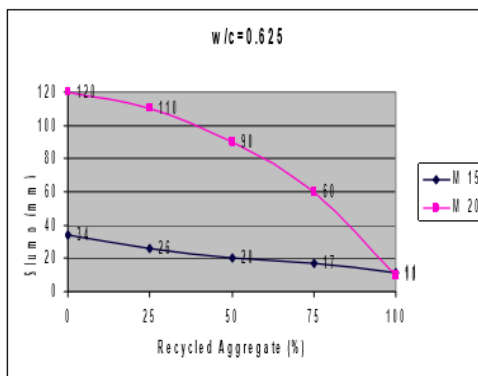
Tablica 5.9.: Vrijednost abrazije Los Angeles metodom[23]

| | <i>Agregat</i> | <i>Vrijednost abrazije (%)</i> |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|
| <i>1.</i> | <i>100% Novi agregat</i> | <i>27.02</i> |
| <i>2.</i> | <i>20% Reciklirani agregat</i> | <i>28.40</i> |
| <i>3.</i> | <i>40% Reciklirani agregat</i> | <i>29.76</i> |
| <i>4.</i> | <i>60% Reciklirani agregat</i> | <i>31.20</i> |
| <i>5.</i> | <i>80% Reciklirani agregat</i> | <i>34.28</i> |
| <i>6.</i> | <i>100% Reciklirani agregat</i> | <i>35.72</i> |

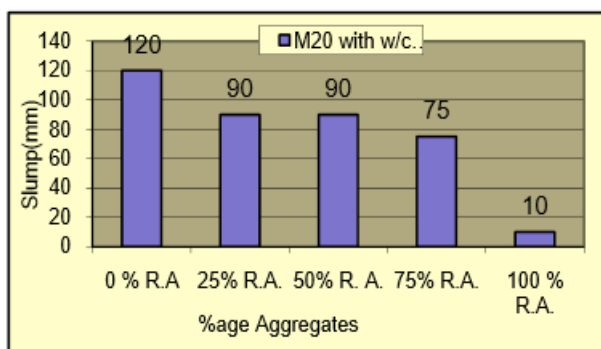
5.4.3.6. Obradivost

Tijekom izrade uzoraka, ispitano je slijeganje kako bi se utvrdila obradivost različitih mješavina. Slika 5.4 - 5.6. pokazuje promjenu pada vrijednosti slijeganja sa različitom količinom recikliranog agregata, kao i različitom vrijednošću vodocementnog faktora. Beton sa većim dodatkom recikliranog agregata ima manje slijeganje, zbog zaostalog morta na zrnima koji upijaju vodu i smanjuju obradivost, pa samim tim i slijeganje.

**Slika 5.4.: Slijeganje mješavina M15 i M20 sa $w/c=0,6$ [23]**



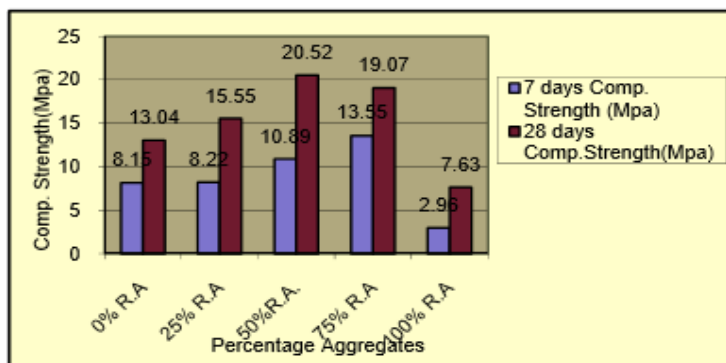
Slika 5.5.: Slijeganje mješavina M15 i M20 sa w/c=0,625[23]



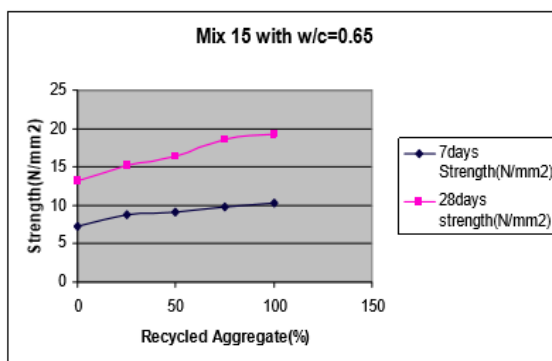
Slika 5.6.: Slijeganje mješavine M20 sa w/c=0,650[23]

5.4.4. Tlačna čvrstoća betona

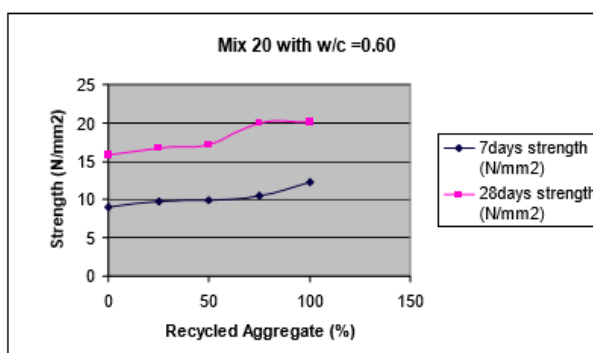
Beton je bio miješan u nagibnom bubnju miješalice velikog kapaciteta. Minimalno 30 uzoraka je napravljeno za svaki vodocementni faktor (0.6, 0,625 i 0.65) za dvije mješavine (M15 i M20) te je time bilo više od 180 uzoraka kocaka. Pet kompleta kocaka je bilo zamijenjeno, na način da je umjesto novog agregata bio reciklirani (0%, 25%, 50%, 75% i 100%). Svi uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24sata i stavljeni u vodu. Tlačna čvrstoća je određena preko preše, rezultati su prikazani na slikama 5.7. - 5.10.



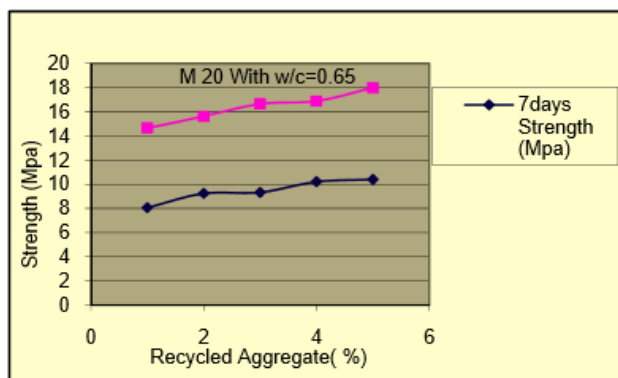
Slika 5.7.: Tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana mješavine M15 sa w/c=0,60[23]



Slika 5.8.: Tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana mješavine M15 sa $w/c=0,65$ [23]



Slika 5.9.: Tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana mješavine M20 sa $w/c=0,60$ [23]



Slika 5.10.: Tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana mješavine M20 sa $w/c=0,65$ [23]

5.4.5. Zaključak

Recikliranje betona će postati jedan od najvažnijih elemenata za građevinarstvo odnosno, održivost gradnje. Beton koji sadrži otpadne tvari poput agregata zove se „zeleni“ beton. Razni standardni testovi provedeni su koristeći reciklirane agregate, poput upijanja vode, analiza sita, ispitivanje na udar, ispitivanje abrazije, drobljenje, obradivost i tlačna čvrstoća na kockama dimenzija 150mm. Studija predlaže korištenje alternativnih materijala za izgradnju novih

konstrukcija. Ispitivanja su provedena pomoću 0%, 25%, 50%, 75%, 100% recikliranog agregata u zamjenu sa običnim agregatom za određivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava. Sljedeći zaključci su doneseni na temelju ove studije:

- Upijanje vode se povećava, od 1,5% (za 100% svježi novi agregat) do 4,6% (za 100% reciklirani agregat) koji pokazuje tablica 5.7. Također što je veći vodocementni faktor, to je potražnja za vodom veća. Isto tako veća količina recikliranog agregata manje slijeganje, zbog većeg upijanja vode.

- Veći postotak recikliranog agregata povećava vrijednost drobljenja agregata. Kongres za Indijske ceste i Indijski standard navode da ukupna vrijednost drobljenja agregata, krupnog agregata koji se koristi za proizvodnju betonskog kolnika ne smije biti veća od 30%. Za ostale betone, ta vrijednost ne smije biti veća od 45%, prema Indijskom standardu.

- Testovi provedeni na udar dopuštaju samo 20% recikliranog agregata. To znači da valjak za zbijanje betona koji se koristi u betonskim kolnicima koji ima više od 20% recikliranog agregata se ne smije koristiti. Dobivena vrijednost abrazije, dopušta 30% zamjene agregata sa recikliranim agregatom za betone koji će se biti valjani, za potrebe kolničke konstrukcije.

- Sa različitim vodocementnim faktorom (preporučenima) tlačna čvrstoća mješavina se povećava 26,75% kada je novi agregat zamijenjen recikliranim 75%, ipak razastiranje opada na 2/3 vrijednosti. Povećavajući vodocementni faktor sa 0.60 na 0.625 (povećanje za 4.16%) povećava se i slijeganje sa 21mm na 60mm, kada je novi agregat zamijenjen recikliranim 75%.

- Za $w/c = 0.65$ tlačne čvrstoće M15 i M20 zamijenjene sa 75% recikliranog agregata povećavaju se do 40%, međutim slijeganje se smanjuje na pola (20mm do 10mm).

- Upotrebom recikliranog agregata, pomoći će u smanjenju otpada na odlagalištima.

- Upotreba ruševnog betona pomoći se u poboljšanju sveukupnog okruženja u regiji. Prvo, redukcijom u vađenju agregata i drugo, smanjenje onečišćenja zraka koji proizlazi iz proizvodnje agregata (prašina), također i reduciranje prijevoza agregata (zagađenje vozilom)

- Ovo istraživanje je pokazalo da je takav beton, nije kruti otpad, već koristan materijal koji će se reciklirati za napraviti novi beton, koji štedi agregat i čini beton ekonomičnijim.

5.5. Upotreba umjetnog kamenog otpada kao punilo u betonima (E.K. Shirazi, R. Marandi, N. Afshar, M. Alibabae and A. Sooki) [24]

5.5.1. Uvod

Industrija umjetnog kamena proizvodi veliku količinu kamenog mulja (kamene kaše) kao otpada. Kameni mulj, definiran kao polu-tekuća tvar koja se sastoji od čestica, proizlazi iz piljenja i procesa poliranja. U ovom postupku, voda se koristi za hlađenje i podmazivanje strojeva koji režu i poliraju kamene ploče. U Iranu, općenito postrojenja umjetnog kamena, koji proizvode kameni mulj, talože isti u taložniku. Pročišćena voda se vrati u proizvodnu liniju. Kameni mulj se obično odlažu na odlagališta, čija kamena prašina ima utjecaj na okoliš. Drugim riječima, kameno brašno ima negativne posljedice na vegetaciju i usjeve, polaganjem na njih. U nekim slučajevima kamen u prahu može smanjiti poroznost i propusnost tla, što uzrokuje blokiranje prodiranja vode. Štoviše, sitne čestice dovode do slabe plodnosti tla s povećanjem svoje lužnatosti. Osim toga, uništava prirodnu vegetaciju, regionalne topografske promjene, eroziju tla i uništavanje krajolika i mnoge druge negativne utjecaje na okoliš. Do sada, mnoga istraživanja koja su napravljena diljem svijeta koristili su prirodni i umjetni kameni otpad u različitim tipovima industrije, posebice u građevinarstvu. Primjerice u industriji cementa, pločica, morta i betona, te također drugih konstrukcija u kojima se koristi cement, tipa pločnici, nasipi u proizvodnji ljepila i boje. Isto tako u proizvodnji papira, keramike, poboljšanju tla, poljoprivredi i mnogo drugih. Za ostale primjene istraživanja u Španjolskoj predloženo je korištenje mramora i vapnenca kao kalcijevog karbonata koji se koristi u cementu, bojama, plastici i polimerima, papirima, keramici i staklima.

Reciklirani kameni mulj (kaša) od obrade prirodnog kamena može se koristiti kao zamjena za sitni agregat u betonima, da bi se poboljšala obradivost ili da bi se dobila veća tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti. Jedno istraživanje je zaključilo da 5% zamjene sadržaja pijeska sa kamenom kašom daje najbolji rezultat. Štoviše, može biti zamijenjen sa cementom u samozbijajućem betonu za proizvodnju eko betona, uz umjetne agregate koji mogu nastati od ovakvog tipa otpada. Osim toga, vapnenačka prašina je prikladna alternativa za samozbijajući beton i umjetni kamen poput opeke s prihvatljivim mehaničkim svojstvima. Dok su druga istraživanja pokazala da se može dobiti veća tlačna čvrstoća pomoću oba praha, otpada stakla i piljevine od vapnenca. Osim toga, otpad iz rezanja i poliranja prirodnih kamenja su korišteni za izradu crjepova s najboljim svojstvima i upijanjima vode manjih od 6%, niži indeksom plastične deformacije i savojne čvrstoće oko 14 i 38 MPa. U posljednjih nekoliko godina, ponovno

korištenje odbačenog mramora i granita u građevinskim materijalima postalo je uobičajeno. Na primjer, svojstva podnih pločica se mogu poboljšati korištenjem ovog otpada. S druge strane, mramor u prahu je preporučeno koristiti u betonu i samozbijajućem betonu bez ikakvih dodatnih procesa ili u mješavini asfalt betona. Neka istraživanja pokazuju dobivanje maksimalne tlačne čvrstoće sa 10% pijeska i korištenje cementne paste sa ili bez dodataka superplastifikatora. Za razliku od spomenutih istraživanja, iduće istraživanje koristi granit i mramor u prahu kao krupni agregat u betonu, za proizvodnju dobre matrice. Nadalje, može se uočiti da su ove vrste nusproizvoda generirani od ukrasnih kamenja koji se mogu koristiti kao glineni minerali, bez štetnog utjecaja na svojstva.

Do sada, nema istraživanja kao što je napravljeno u Iranu u slučaju zamjene umjetnog kamenog praška s finim agregatom u betonu. Osim toga, navedeni problemi poput utjecaja na okoliš kamenog otpada, potrošnje ogromne sume novca za prijevoz otpada iz postrojenja na odlagališta, otkriva nužnost ove studije koja ima za cilj procijeniti izvedivost ponovne uporabe umjetnog kamenog otpada u betonu i njegove učinke na svojstva betona. Cijela studija je trajala 12 mjeseci (2008 - 2009).

5.5.2. Materijali i metode

U ovoj studiji, tri uzorka kamenog otpada je pripremljeno, dovezeno iz *Salar Stone* postrojenja. Tablica 5.10. prikazuje kemijska svojstva kamenog otpada karakterizirano u R&D Company of Cement industry.

Tablica 5.10.: *Kemijska svojstva kamenog praška (%)*[24]

| Stone dust sample | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | LOI | Fe ₂ O ₃ | CaCO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | MgO |
|-------------------|-------|------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------|
| Sample 1 | 45.64 | 10.42 | 2.97 | 38.98 | 0.88 | 61.50 | 0.16 | 0.13 | 1.60 |
| Sample 2 | 33.60 | 34.78 | 3.78 | 23.10 | 1.24 | 60 | 0.38 | 0.52 | 2.80 |
| Sample 3 | 39.16 | 14.10 | 6.38 | 35.50 | 1.30 | 69.93 | 0.12 | 0.19 | 3.70 |

Mineraloške karakteristike uzoraka su ispitane s elektronskim mikroskopom u cementno istraživačkom centru.

Uzorci kamenog otpada su zamijenjeni s sitnim agregatom, sa udjelom 0, 5, 7 i 10%. Nakon toga, ispitivanje slijeganja je provedeno na svježem betonu. Osim toga određena je i gustoća, te tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana. Za izradu betonskih uzoraka korišteni su: kameno brašno, pitka voda, portland cement II, sitni i krupni agregat. Cilj ove studije nije bio postići određenu tlačnu čvrstoću. Rezultati su bili samo za uspoređivanje. W/c faktor je bio 0.45 na 350kg/m³ cementa. Krupni agregat je frakcioniran pomoću sita prije podnošenja zahtjeva za izradu

betonskih uzoraka. Zrna su frakcionirana prema standardima. Betoni su zbijeni u kalupima, na vibro-stolovima. Količina sastojaka betona prikazana je u tablici 5.11.

Budući da je tlačna čvrstoća betonskih elemenata koji sadrže kameni prah različito vremenski uzorkovana, uspoređivani su jedni s drugima, a sve betonske kocke pripremljene su i održavane u istim uvjetima, faktori kao što su tlačna čvrstoća, brzina miješanja, temperatura, vlažnost, vrsta cementa i frakcije sitnog i krupnog agregata su bili fiksni. Uzorci su smješteni u vlažnom okruženju za 24 sata. U cilju očuvanja uzoraka sve betonske kocke su čuvane u pitkoj vodi 7 i 28 dana. Slijeganje je mjereno prema standardima. Na posljertku određene su tlačne čvrstoće uzoraka.

Tablica 5.11.: Sastav betona (%) [24]

| <i>Materijal</i> | <i>1m³ betona</i> |
|---------------------------|------------------------------|
| <i>Sitni agregat</i> | <i>1135.5 kg</i> |
| <i>Krupni agregat</i> | <i>757 kg</i> |
| <i>Voda</i> | <i>157.5 kg</i> |
| <i>Portland Cement II</i> | <i>350 kg</i> |
| <i>Aditiv Premia 180</i> | <i>1.05 kg</i> |

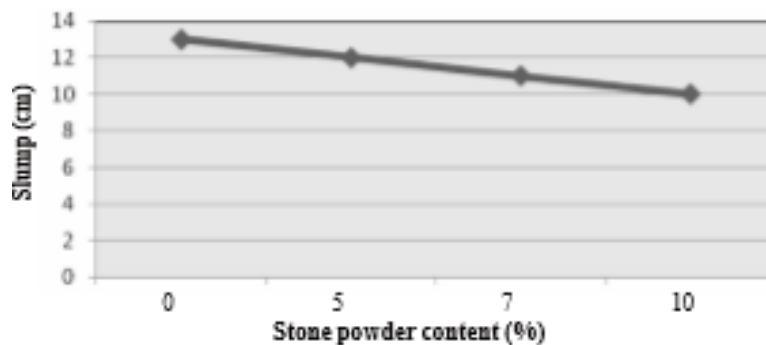
5.5.3. Rezultati i rasprava

Rezultati koji se odnose na kemijska svojstva pokazuju da je mala količina polu hidratiziranog cementa postojala u praškastom uzorku kamenog otpada (Al_2O_3 i MgO , možemo povezivati sa polu hidratiziranim cementom). Uglavnom se uzorci sastoje od kalcijevog karbonata, što je posljedica mramornog kamena u prahu. Postojeći SiO_2 u uzorcima je zbog piljenog kvarcnog agregata.

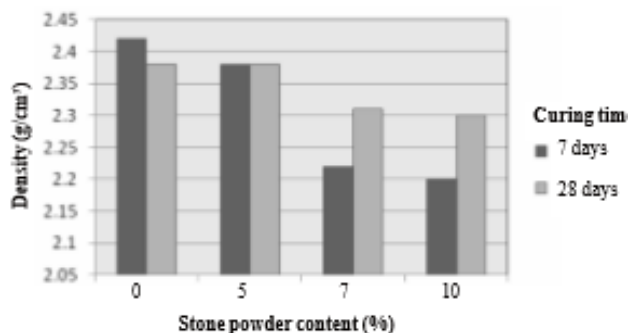
Mikroskopski rezultati pokazuju da uzorci kamenog praha izgledaju kao sitan agregat. Uglavnom se sastoji od sitnih kalcitnih kristala ($CaCO_3$) i ponešto glinenih minerala. Osim toga, vrlo sitni kristali kvarca i feldspata su prikazani. Također, rezultati pokazuju da glineni materijali u nekim dijelovima postoje u uzorcima. Na kraju, ovaj uzorak se smatra kao vapnenački. 2.5% praha sadrži čestice manje od $10\mu m$. Osim toga, jasno je da je 99% čestica manje od $267\mu m$.

Prema rezultatima slijeganja (slika 5.13.) opada vrijednost istog, za 5% zamjenu sitnih agregata s kamenim prahom koji je bio blizu kontrolnog uzorka, 12cm i 13cm. Najniža vrijednost bila povezana s 10% zamjene.

Slika 5.14. prikazuje specifične težine betonskih uzoraka s različitim postotkom kamenog otpada nakon 7 i 28 dana. Rezultati pokazuju male razlike između gustoća uzoraka koji osciliraju između 2,20 i 2,42g/cm³.

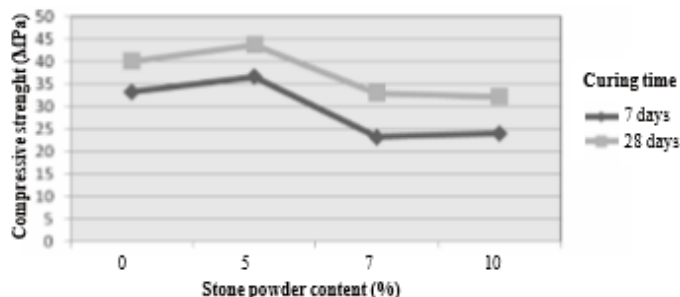


Slika 5.13.: Slijeganje uzoraka za različite količine kamenog praha[24]



Slika 5.14.: Gustoća uzoraka obzirom na količinu kamenog praha[24]

Kao što vidimo u slici 5.15. tlačna čvrstoća betonskih uzoraka nakon 7 i 28 dana, sa 5% kamenog otpada je 36.59 i 43.73 MPa. Sa 7% otpada čvrstoće su 23.24 MPa i 32.93MPa, a sa 10% otpada je 24.05 MPa i 32.21.MPa.



Slika 5.14.: Tlačna čvrstoća obzirom na količinu kamenog praha[24]

5.5.4. Zaključak

Prema kemijskoj analizi otpada umjetnog kamena, jasno se može uočiti da zbog spojeva kao Al_2O_3 , SiO_2 , CaO i MgO , ovi uzorci imaju slična svojstva cementu. Stoga, može se primijeniti u betonu.

Mikroskopski rezultati kamena u prahu pokazuju da je 50% kamena praha je manje od $10\ \mu\text{m}$ i opravdava raspon minerala od cryptocrystalline do mikrokristalinske. Ovaj uzorak se smatra finim agregatom s obzirom na svoju veličinu. Te se može koristiti kao punilo, umjesto nekih finih pijesaka u određenim postocima.

Na temelju rezultata tlačnih čvrstoća, sa 5% zamjene, proizašla je veća tlačna čvrstoća od kontrolnih (referentnih) uzoraka. Nadalje, s povećanjem zamjene otpada i sitnog pijeska u betonu tlačna čvrstoća uzoraka opada.

Razlike u gustoći nisu uočene, osim toga povećanje sadržaja kamenog otpada blago smanjuje slijeganje.

5.6. Analiza izvodljivosti ponovnog korištenja otpadnog punila bitumenske mješavine za proizvodnju samozbijajućih betona (J. Martin, J. R. Montero, F. Moreno, J.L. Piqueras Sala, M.C. Rubio) [25]

5.6.1. Materijali i metodologija

Ova studija je koncentriran na dobivanje samozbijajućeg betona sa zahtjevima navedenih u *Instrucción de Hormigón Estructural*, za klasu IIB izloženosti okoliša i usklađena s odgovarajućim zahtjevima o samozbijanju. Ciljanja tlačna čvrstoća je 40MPa, količina cementa je $300\ \text{kg/m}^3$, a $w/c=0.55$. Jedna je mješavina SZB napravljena sa običnim komercijalnim punilom, druga je napravljena sa punilom, koji je ostatak iz proizvodnje bitumenskih smjesa.

Budući da je glavni cilj ovog istraživanja bio utvrditi izvedivost ove vrste punila, obje vrste betona su projektirani s istom količinom cementa, samo je izvor punila drugačiji.

5.6.1.1. Materijali

Komponente koje se koristile su Portland cement, CEM II / AV 42,5R, vapnenački i dolomitni drobljeni agregata s maksimalnom veličinom zrna 16 mm.

Šljunak frakcije 2 – 8 mm doziran je 36%, frakcije 8 – 16mm dozirane su 64%, prema Fullerovoj granulometrijskoj krivulji. U tablici 5.12. prikazane su karakteristike agregata.

Tablica 5.12.: Karakteristike agregata[25]

| <i>Frakcija</i> | <i>Gustoća (kg/m³)</i> | <i>Upijanje vode (%)</i> | <i>Nasipna gustoća (kg/m³)</i> | <i>Ekvivalent pijesku</i> | <i>Vrijednost Methylene blue (g/100g finih zrna)</i> |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------|---|---------------------------|--|
| <i>Pijesak 0 - 4</i> | 2842 | 0.011 | - | 73 | 0.240 |
| <i>Šljunak 2 - 16</i> | 2799 | 0.261 | 1664 | - | - |

Komercijalni sitni materijal dobiven iz drobljenog mramora iz Macael (Almería) se koristi kao punilo za referentni beton. Otpadno punilo uglavnom ima vapnenački karakter. Macael punilo je dolomitnog porijekla, s malim sadržajima kalcita i kvarca.

Prema apsorpcijskih vrijednostima metilenskog modrila (*methylene blue*), otpadno punilo ne sadrži velike količine glinenog materijala.

Nakon karakteriziranja materijala, određena su svojstva samozbijajućeg betona sa različitim dozama otpadnog punila.

Kao aditivi, korišten je bio Glenium 303 SCC. Superplastifikator, ne samo da reducira vodu i poboljšava obradivost, nego poboljšava i mehanička svojstva i trajnost. Nisu korišteni modifikatori viskoznosti.

5.6.1.2. Metodologija

Obzirom na poteškoće u dobivanju samozbijanja, testirane su različite doze sa širokim rasponom sadržaja šljunka, pijeska i punila. Na početku su pripremljene mješavine s volumenom 15 litara za svaku dozu. Cilj je bio pronaći najprikladnije količine šljunka, pijeska i recikliranog punila samozbijajući beton. Razlog tome je, što je 15l minimalni volumen betona potreban za

testiranje dva najuobičajenija parametra samozbijenosti: promjer razastiranja i vrijeme pražnjenja V-lijevka. Kako bi spriječili pojavu sušenja i opravdali eventualne promjene u identičnim smjesama, tijekom proizvodnje betona mjerena je temperatura okoliša, relativna vlaga i temperatura betona.

Konačne mješavine su pripremljene u vertikalnim miješalicama i volumen svake mješavine je bio 40l. Ovaj volumen se smatrao pogodnom za određivanje svih parametara koji se odnose na samozbijenost mješavina i za pripremu standardnih uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće i svojstava trajnosti.

Nakon što je dobivena zadovoljavajuća samozbijenost mješavina usuglašene su metodologijama drugih istraživanja, tri mješavine od 40l su proizvedene za svaku vrstu betona. U skladu s tim M1-M3 su proizvedene s recikliranim punilom, a M4-M6 sa referentnim punilom.

Tlačna čvrstoća je ispitana nakon 3,7 i 28 dana za obje vrste. Po pitanju trajnosti ispitani su poroznost i dubina karbonizacija.

Uzorci za proučavanje trajnosti pod uvjetima karbonizacije su u obliku prizme visine 1m. Ova visina se smatra dovoljna da se provjere svi znakovi izlučivanja ili segregacije, koja obzirom na punjenje betona će biti izražena obzirom na visinu. Presjeci (80mm 100mm i 125mm) uzoraka su namjerno uski kako bi se uzelo u obzir blokiranje. Da bi što vjernije prikazali izloženosti na konstrukciji, odnosno element, uzorci su držani vani, uz redovito polijevanje 7 dana prije nego su odvedeni komoru. Dubina karbonizacije mjerena je nakon 3, 6, 14 i 28 mjeseci.

5.6.2. Rezultati i rasprava

5.6.2.1. Omjeri i doziranje mješavina da bi se postigla samozbijenost

Različite doze su testirane prema postupku iz Okamura et al.[39] Tablica 5.13 prikazuje zapise dobivene za parametre samozbijenosti (test razastiranja i V-lijevak test). Nomenklatura koja se rabi za doziranje se odnosi na postotke svakog sastojka. Da bi pronašli potrebnu dozu superplastifikatora u svakom slučaju, brojni betonske mješavine su testirane.

Male su varijacije u doziranju vode zbog diferencijale vlažnosti pijeska koji se koristi, koje se odmah procijenjene prije miješanja. Vrijednosti mješavina A50-G50 nisu prikazane jer su bili znatno iznad vrijednosti potrebnih za standard samozbijanja.

S obzirom na ove rezultate, projektirane doze za A45-G42 (za koje je potrebno 2.6% superplastifikatora) su odabrane. Samozbijenost se naknadno se koristi za određivanje drugih svojstva koja se proučavaju u još tri smjese od 40l (M1-M6).

Tablica 5.13.: Svojstva mješavina i svojstva svježeg SZB [25]

| Dosage | Components (kg/m ³) | | | | | Tests | | |
|-----------|---------------------------------|-------|--------|----------|-------------|------------|---------------|-----------|
| | Cement | Water | Filler | 0/4 Sand | 4/16 Gravel | Slump-flow | | V-funnel |
| | | | | | | d_f (mm) | T_{500} (s) | T_v (s) |
| A40-G50 | 300 | 170.8 | 281.9 | 946.4 | 775.7 | 607 | - | 11.0 |
| A42.5-G50 | 300 | 171.2 | 225.2 | 1006.7 | 774.7 | 658 | - | 11.0 |
| A45-G50 | 300 | 171.6 | 166.2 | 1069.5 | 773.8 | 700 | - | 12.0 |
| A47.5-G50 | 300 | 171.9 | 107.1 | 1132.4 | 772.8 | - | - | 16.0 |
| A50-G50 | 300 | 172.3 | 51.6 | 1191.4 | 771.9 | - | - | - |
| A45-G36 | 300 | 171.4 | 189.3 | 1191.3 | 663.4 | 710 | 9.0 | 21.0 |
| A45-G38 | 300 | 171.5 | 175.0 | 1170.4 | 668.6 | 690 | 8.2 | 27.0 |
| A45-G40 | 300 | 171.6 | 159.4 | 1150.8 | 703.8 | 750 | 2.4 | 6.5 |
| A45-G41 | 300 | 171.7 | 153.5 | 1139.0 | 721.4 | 650 | 5.0 | 9.0 |
| A45-G42 | 300 | 171.7 | 145.1 | 1129.9 | 739.0 | 750 | 2.9 | 7.5 |
| A45-G43 | 300 | 171.7 | 139.2 | 1118.1 | 756.6 | 700 | 5.0 | 34.0 |
| A45-G44 | 300 | 171.8 | 130.8 | 1109.0 | 774.2 | 740 | 3.0 | 8.0 |
| A45-G45 | 300 | 171.8 | 124.9 | 1097.2 | 791.8 | 620 | 5.0 | 9.5 |
| A45-G46 | 300 | 171.9 | 116.5 | 1088.1 | 809.4 | 660 | 7.0 | 53.0 |
| A45-G48 | 300 | 172.0 | 102.2 | 10,672 | 844.6 | 650 | 3.0 | 8.0 |

S obzirom na ove rezultate, projektirane doze za A45-G42 (za koje je potrebno 2.6% superplastifikatora) su odabrane. Samozbijenost se naknadno se koristi za određivanje drugih svojstva koja se proučavaju u još tri smjese od 40l (M1-M6).

Ista doza s 1,8% superplastifikatora je testirana s Macael komercijalnim punilom. Ove mješavine su također korištene za pripremu uzoraka za ispitivanje (Tablica 5.14).

Tablica 5.14.: Rezultati testova samozbijanja za dvije vrste betona [25]

| Filler | Mixture (A45-G42) | V-funnel test | Slump-flow test | | L-box test | | Slump-flow test with J-ring | |
|----------------------------|-------------------|--|----------------------------|---|------------------------------|----------|-------------------------------|----------------|
| | | T_v (s) | T_{500} (s) | d_f (mm) | T_{60} (s) | C_{bl} | d_{Jf} (mm) | T_{J500} (s) |
| Recovered | M1 | 6.1 | 3.6 | 760 | 5.8 | 88 | 720 | 5.4 |
| | M2 | 7.3 | 3.3 | 650 | 7.0 | 89 | 600 | 6.8 |
| | M3 | 7.6 | 2.7 | 695 | - | - | - | - |
| Reference | M4 | 9.3 | 4.7 | 695 | 8.3 | 100 | - | 8.9 |
| | M5 | 7.2 | 2.5 | 810 | 8.3 | 99 | 760 | 5.2 |
| | M6 | 6.7 | 2.4 | 770 | - | - | - | - |
| Permissible range (EHE-08) | | $4 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$ | $T_{500} \leq 8 \text{ s}$ | $550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$ | $0.75 \leq C_{bl} \leq 1.00$ | | $\geq d_{Jf} - 50 \text{ mm}$ | |

Vrijednosti V-lijevka su gotovo iste za obe vrste betona koje su unutar dozvoljenih granica. Što se tiče razastiranja ono je nešto veće kod recikliranog punila kao i vrijeme dosezanja promjera 500mm. Rezultati su i tu slični, te unutar granica. Što se tiče L-kutije, SZB sa komercijalnim punilom pokazuje puno bolju fluidnost od ovog drugog. To je vjerojatno zbog veće veličine recikliranog punila u odnosu na komercijalni. U svakom slučaju nalazi se unutar granica. Testiranje J-prstena, obje mješavine su bile slične, odnosno, mješavina sa dodatkom recikliranog punila je imala nešto manji promjer, kao i malo razliku u vremenu razastiranja. U svakom slučaju obzirom da su svi testovi bili unutar granica, moguće je proizvesti SZB sa obje vrste punila.

Dobivene vrijednosti testova samozbijenosti su u skladu sa rezultatima drugih istraživanja, samo što su različite količine superplastifikatora, ali se također koristi vapnenački otpad kao sitna frakcija u SZB. Vrijednosti su također slične i sa drugim autorima, koji su dodavali druge vrste otpada, npr. za $w/c=0.53$ beton s dodatcima mrvica gume, vrijednost razastiranja je nešto niža nego u ovom istraživanju.

Sadržaj zraka je nešto veći sa recikliranim punilom nego sa komercijalnim, vjerojatno zbog toga što veća količina superplastifikatora vuče veće količine zraka u mješavinu. Međutim, rezultati su svakako unutar dozvoljenih granica.

Rezultati gustoća dvije vrste betona u svježem stanju su gotovo identični, nešto niži za beton proizveden s recikliranim punilom, zbog svoje niže gustoće.

5.6.2.2. Svojstva očvrstlog betona

Tlačna čvrstoća

Iako je početna tlačna čvrstoća referentnog SZB nešto veća (ref. 38MPa, rec 33MPa), nakon 28 dana čvrstoće obiju vrsta betona budu identične (50MPa) i visoko iznad minimalne razine tlačne čvrstoće (30MPa). Niža tlačna čvrstoća betona sa recikliranim filerom nakon 3 dana se može pripisati nečistoći u materijalu ili većoj količini zraka zbog veće količine superplastifikatora. Međutim, s vremenom taj efekt nestaje. Ovaj podatak govori da se može napraviti SZB sa dodatkom recikliranog punila koji ima ista mehanička svojstva kao i referentni SZB. Usprkos manjim varijacijama u omjeru voda / cement, te tlačne čvrstoće su bili slične onima u drugim istraživanjima gdje se npr. koristi prah vapnenca i mramora kao punilo uz omjer $w / c 0,45$ za dobivanje vrijednosti nešto niže od 50 MPa. Uz slične vrste otpada, jedni istraživači dobiju čvrstoću nakon 28 dana višu od 50 MPa, iako s nižim omjerom $w / c (0,38)$. S druge strane, beton proizveden s drugim vrstama otpada pokazali su nešto niže vrijednosti od onih koji koriste izmrvljene gume od otpadnih automobilskih guma. Tu su također izvanredne vrijednosti tlačne čvrstoće za SZB s otpadnim staklom, gotovo 60 MPa s omjerom w / c od 0,47.

Poroznost

Poroznost je izračunata korištenjem vrijednosti gustoće čestica i stvarne gustoće. Tablica 5.15 prikazuje vrijednosti poroznosti obje vrste SZB-a.

Tablica 5.15.: Poroznost dviju vrsta samozbijajućeg betona[25]

| Porosity (%) | SCC A45–G42 (with recovered filler) | SCC A45–G42 (with reference filler) |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Top area | 15.61 | 12.27 |
| Bottom area | 15.24 | 12.25 |
| Average value | 15.43 | 12.26 |

Analiza evidencije uvedenog zraka, gustoće i poroznosti za obje vrste SCC govori, da su unutar prihvatljivih granica, jer vrijednosti kapilarne poroznosti su gotovo iste za obje vrste betona. Reciklirano punilo ima nižu gustoću od referentnog punila, pa tako i gustoća samozbijajućeg betona izrađenog s recikliranim punilom je manja od gustoće referentnog betona. To je vjerojatno zbog činjenice da je punilo dobiveno iz proizvodnih postrojenja asfalta koji ima krupnije čestice, pa čak i neke nečistoća od goriva.

Izgled betona koji se ispituje je sličan onom referentnom. Nema segregacije ili izlučivanja u svježem, ni u očvrslom betonu sa recikliranim punilom.

Dubina karbonizacije

Niža poroznost SZB s referentnim punilom izgleda da ima neki utjecaj na vrijednost dubine vrijednosti karbonizacije, budući da ove vrijednosti su nešto niže od onih u SZB sa recikliranim punilom. Ovi rezultati ukazuju na to da je SZB sa recikliranim punilom očito više CO₂ propustan. Moguće objašnjenje može biti veći postotak zraka uveden u smjesu. Karbonizacija može biti poboljšana u SZB s recikliranim punilom s većom količinom zraka.

Ovi rezultati ukazuju na to da u *Iib* (prema standardima) sredinama SZB sa recikliranim punilom predstavlja vrlo sličan otpor koroziji armature karbonizacijom kao i u SZB proizveden s komercijalnim punilom.

5.6.3. Zaključak

Najvažniji rezultati ovog istraživanja pokazuju kako proizvesti beton s traženim standardima samozbijenosti, tlačne čvrstoće i izdržljivosti s sitnozrnim otpadnim materijalom iz proizvodnje bitumenskih mješavina kao punilom. Zaključci koji mogu biti izvedeni iz ovog istraživanja su sljedeći:

- Beton izrađen sa recikliranim punilom zadovoljava kriterije samozbijenosti, iako traži veću količinu superplastifikatora, što povlači veću količinu zraka u mješavini.
- Tlačna čvrstoća je visoko iznad min. tražene za određenu količinu cementa i w/c faktor

- Obzirom na otpornost na karbonatnu koroziju, SZB se s recikliranim punilom predstavlja zadovoljavajuće standarde u usporedbi s betonom napravljen sa komercijalnim punilom s identičnom dozom.

- Rezultati potvrđuju odsutnost znakova segregacije ili izlučivanja u betonu, kako u svježem stanju tako i u očvrslom stanju.

Prema tome, dobiveni rezultati svjedoče da je beton napravljen s punilom iz asfaltnog postrojenja valjana opcija kao SZB proizveden od otpadnog materijala. Utvrđeno je da ovaj SZB ima samozbijenost, tlačnu čvrstoću i izdržljivost kao i referentni SZB, koji je izrađen s istom količinom cementa i sa istim w/c faktorom. Upotreba finog otpada ne samo da smanjuje potrošnju prirodnih resursa i štedi troškove proizvodnje, nego i znatno smanjuje utjecaj na okoliš. Očito, da se ovaj materijal nije ponovno koristio, bio bi ostavljen na odlagalištu.

6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

6.1. Uvod

Samozbijajući beton (SZB) je beton superiorne sposobnosti tečenja koji uz pomoć vlastite težine teče, zaobilazi prepreke armature i popunjava oplatu potpuno bez dodatnog vibriranja, te je beton dobre gustoće i dobre homogenosti. Kompaktan je zbog svoje velike fluidnosti i obradivosti i nema pojave segregacije niti izdvajanja vode. Nakon skidanja oplate površina ostaje glatka, bez šupljina i zadovoljava estetske kriterije, a očvrslu beton je gust i homogen. Osim dobrih svojstava u svježem stanju, beton mora imati dobra svojstva u očvrslom stanju, kao što su čvrstoća i trajnost.

Iako su osnovne komponente običnih vibriranih betona i samozbijajućih betona iste (agregat, cement, voda, superplastifikator) razlika je što se kod SZB koristi veći sadržaj sitnih čestica, manje maksimalno zrno agregata ($D_{\max}=16\text{mm}$), te je obavezna primjena dodataka (superplastifikatora i modifikatora viskoznosti).[5]

Pasta mora imati visoku sposobnost tečenja, ali istodobno mora biti stabilna. Poznato je da se taj zahtjev može ispuniti upotrebom veziva s visokim sadržajem najsitnijih čestica. Za postizavanje visoke sposobnosti tečenja i istodobno stabilnosti, pasti se dodaju čestice sitnije od cementa.

Mort sam za sebe mora također biti stabilan. Taj zahtjev se ispunjava upotrebom sitnog agregata s dovoljnim sadržajem zrna sitnijih od 1mm, čime se sprječava segregacija između morta i paste.

Beton kao cjelina mora biti stabilan i konzistencije unutar određenih granica. [26]

U svrhu izrade ovog diplomskog rada, napravljeno je 9 različitih betonskih mješavina u kojima se uobičajeno punilo zamijenilo sa recikliranim punilom (samljevenim, prosijanim betonskim otpadom), te su uspoređena svojstva u svježem i očvrslom stanju. U svim je mješavinama korištena ista količina i vrsta cementa, te ista količina i vrsta agregata. Ukupna količina ostalih praškastih tvari je u svim mješavinama ista, ali se mijenjaju vrste dodataka kao i njihovi udjeli. Početna količina vode je ista, ali se korigirala u tijeku miješanja ovisno o vizualnoj procjeni. U osam mješavina je korišten isti superplastifikator, dok se u prvoj mješavini koristio potpuno novi superplastifikator.

Napravljene su sljedeće mješavine:

M1 – mješavina napravljena sa silikatnom prašinom (28%), punilom od recikliranog betona (72%) i sa novim superplastifikatorom,

M2 – mješavina napravljena sa letećim pepelom (28%) i punilom od recikliranog betona (72%),

M3 – mješavina napravljena sa letećim pepelom (36%), punilom od recikliranog betona (36%) i punilom od betonskog otpada („bijeli šut“ – 36%),

M4 – mješavina napravljena sa letećim pepelom (28%), i punilom od betonskog otpada („bijeli šut“ – 72%),

M5 – mješavina napravljena sa letećim pepelom (28%), punilom od recikliranog betona (54%) i punilom od betonskog otpada („bijeli šut“ – 18%),

M6 – mješavina napravljena sa letećim pepelom (28%), i punilom od betonskog otpada („crveni šut“ – 72%),

M7 – mješavina napravljena sa letećim pepelom (36%), punilom od recikliranog betona (36%) i punilom od betonskog otpada („crveni šut“ – 36%),

M8 – mješavina napravljena sa letećim pepelom (28%), punilom od recikliranog betona (54%) i punilom od betonskog otpada („crveni šut“ – 18%),

M9 – mješavina napravljena sa silikatnom prašinom (28%), punilom od betonskog otpada („bijeli šut“ – 18%) i kamenim brašnom (54%).

Provedena su sljedeća ispitivanja: V-lijevak, metoda razastiranja, J-ring, L-box te je izmjerena temperatura svježeg betona. Nakon ispitivanja u svježem stanju mješavine su ugrađene u standardne kalupe. Tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti uzoraka su ispitani nakon 7, 14 i 28 dana, te upijanje nakon 28 dana. U nastavku slijedi detaljan opis ispitivanja, odnosno upotrijebljenih materijala, provedenih ispitivanja te analiza dobivenih rezultata.

6.2. Materijali

U pripremanju ispitnih mješavina betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- portland cement CEM II/A - LL 42,5 R,
- drobljeni agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm,
- superplastifikator KEDOBET SP 103,

- superplastifikator MASTERGLENium SKY 629,
- silikatna prašina,
- reciklirani beton ,
- leteći pepeo,
- reciklirani betonski otpad („bijeli šut“),
- reciklirani betonski otpad („crveni šut“),
- kameno brašno.

6.2.1. Cement [27]

Za pripremu mješavina korišten je portland cement CEM II/A – LL 42.5 R. Obzirom da je upotrebljeni cement bio pokusni tvornički cement, nedostaju podaci o njemu, proizvođač je Cemex Hrvatska. Opisana su svojstva istog cementa proizvođača Cemex Češka.

Portland cement CEM II/A – LL 42.5 R, proizveden je i ispitan u skladu s europskim standardom EN 197 – 1. Cement koji uz klinker sadrži i vapnenac, zajamčena mu je minimalna tlačna čvrstoća 42,5 MPa nakon 28 dana i minimalna rana čvrstoća od 20 MPa nakon 2 dana.

Tablica 6.1. prikazuje svojstva korištenog cementa.

Karakteristike cementa:

- brzo povećanje početne čvrstoće, visoka konačna čvrstoća
- više topline hidratacije tijekom procesa vezivanja i stvrdnjavanja omogućuje betoniranje u hladnoj okolini,
- prisutnost vapnenca znatno bolje pruža obradivost.

Preporuke za primjenu:

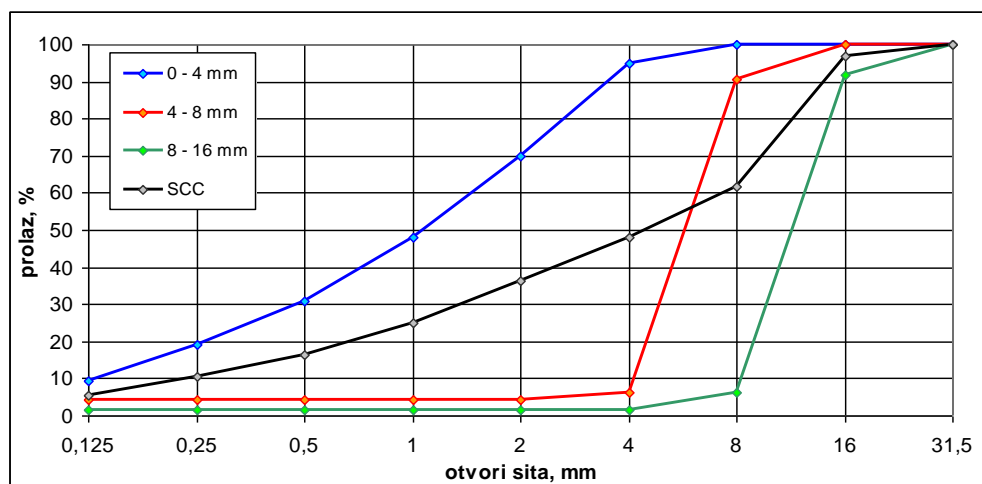
- za ne armirane i armirane betonske konstrukcije,
- za sve betone razreda normalnih čvrstoća,
- za gradnju temelja, industrijskih objekata i prefabriciranih elemenata
- za žbuke i cementni mort.

Tablica 6.1.: Svojstva cementa CEM II/A – LL 42.5 R [27]

| | <i>Jedinica</i> | <i>Prosjek</i> | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> |
|--|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| FIZIKALNE KARAKTERISTIKE | | | | |
| <i>Specifična površina</i> | cm ² /g | 3901 | 3774 | 4043 |
| <i>Voda za miješanje</i> | % | 29,0 | 28,4 | 29,6 |
| <i>Početno vrijeme vezanja</i> | min. | 224 | 185 | 270 |
| <i>Konačno vrijeme vezanja</i> | min. | 315 | 275 | 376 |
| <i>Postojanost volumena (Le Chat.)</i> | mm | 0,5 | 0,0 | 1,0 |
| ČVRSTOĆA | | | | |
| <i>Tlačna nakon 2 dana</i> | MPa | 30,1 | 27,6 | 33,0 |
| <i>Tlačna nakon 28 dana</i> | MPa | 54,1 | 51,1 | 56,8 |
| <i>Vlačna nakon 2 dana</i> | MPa | 5,9 | 5,6 | 6,3 |
| <i>Vlačna nakon 28 dana</i> | MPa | 9,2 | 8,6 | 9,7 |
| KEMIJSKE KARAKTERISTIKE | | | | |
| <i>C₃A</i> | % | 9,39 | 8,76 | 9,80 |
| <i>Gubitak žarenjem</i> | % | 5,17 | 4,10 | 6,02 |
| <i>SO₃</i> | % | 3,46 | 3,33 | 3,57 |
| <i>Cl</i> | % | 0,076 | | |
| <i>K₂O</i> | % | 0,71 | 0,64 | 0,77 |
| <i>Na₂O</i> | % | 0,32 | 0,29 | 0,36 |
| <i>Na₂O - ekvivalent</i> | % | 0,79 | 0,74 | 0,86 |

6.2.2. Agregat

Za potrebe izrade mješavina samozbijajućeg betona korišten je drobljeni agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm, proizvođača Alas iz kamenoloma Seget. Na slici 6.1 prikazan je granulometrijski sastav svake frakcije kao i kumulativna krivulja betona.



Slika 6.1.: Granulometrijske krivulje frakcija drobljenog agregata i betona

6.2.3. Superplastifikatori

Superplastifikatori se upotrebljavaju za proizvodnju betona vrlo velikih čvrstoća ili proizvodnju tekućih betona (samozbijajući betoni bez pojave segregacije). Također se koriste za proizvodnju betona s vrlo malim v/c omjerom. Rezultat je vrlo velika čvrstoća ako se zadrži ista količina cementa. Omjer vode i cementa se može smanjiti čak do 0,28. Superplastifikatori se koriste i za proizvodnju betona sa smanjenom količinom cementa, a zadržavanjem konstantnog v/c omjera. Superplastifikatori su kemijski dodaci betonu koji djeluju podmazujuće, tj. povećavaju obradivost. Povećanjem obradivosti betona lakša je njegova ugradnja. Superplastifikatori djeluju dispergirajuće na čestice cementa i smanjuju potrebu za vodom 20-35% [11].

U ovom radu korištena su dva superplastifikatora: MASTERGLENMIUM SKY 629 (mješavine M2 – M9) i KEDOBET SP 103 (mješavina M1)

Masterglenium sky 629 [28] - superplastifikator na bazi polimera polikarboksilat etera druge generacije i dio je koncepta „Total Performance Control™“. Specijalno je projektiran za transportne reoplastične betone (tekuće bez segregacije), za samozbijajuće betone, s niskim v/c faktorom, produžene ugradivosti, optimalnih mehaničkih otpornosti, visokih ranih i konačnih

čvrstoća (u skladu sa zahtjevima EN206-1 i UNI 11104). Prikladan za topla godišnja doba i temperature iznad 28°-30 °C.

Koncept „Total Performance Control™“ osigurava da proizvođači transportnog betona, izvođači i inženjeri dobivaju beton jednako visoke, propisane kvalitete, počevši od proizvodnje u tvornici betona, preko prijevoza, isporuke i ugradnje na gradilištu, do konačnog procesa očvršćivanja. Korištenje tehnologije reodinamičnog betona daje betonsku mješavinu izvanredne ugradivosti, kao i ubrzane hidratacije cementa u cilju postizanja rane čvrstoće i visoke kvalitete.

Koncept „Total Performance Control™“ i primjena MasterGlenium-a SKY 629 proizvođaču transportnog betona pruža niz tehničkih i logističkih prednosti prednosti:

- niži sadržaj vode u usporedbi s dosad najefikasnijim proizvodima na bazi PCE,
- proizvodnju reoplastičnog, reodinamičnog i SDC betona s najmanjim omjerom vode i cementa,
- održavanje konzistencije u dužem vremenskom periodu i izbjegavanje problema naknadnog dodavanja vode
- optimizirana proizvodnja betona koji odgovara normama EN 206-1 i UNI 11104
- u usporedbi s tradicionalnim superplastifikatorima znatno poboljšanje svojstava: rane i konačne, tlačne i savojne čvrstoće / skupljanje / modul elastičnosti / nepropusnost .

Svojstva superplastifikatora Masterglenium Sky 629 prikazana su u tablici 6.2.

Tablica 6.2.: Tehnički podaci/tipična svojstva superplastifikatora Masterglenium Sky 629

| <i>Tehnički podaci / tipična svojstva</i> | |
|---|--------------|
| Oblik | tekućina |
| Specifična težina (g/ml pri 20°C) | 1.042 -1.082 |

Uobičajeno doziranje MasterGlenium-a SKY 629 kod reoplastičnih betona iznosi 0,6 do 1,4 l na 100 kg veziva. U specifičnim slučajevima može se, prema uvjetima na gradilištu, preporučiti drugačije doziranje.

Kedobet SP 103 [29] - superplastifikator najnovije generacije na bazi polikarboksil-eter polimera. Svojstva ovog proizvoda posebno su prilagođena primjeni u proizvodnji transportnih betona uz potrebu dugog održavanja konzistencije, ugradivosti i obradivosti uz brzi razvoj čvrstoća. Primjena ovog superplastifikatora omogućava visoku redukciju vode i ubrzava

hidrataciju cementa. Uslijed brzog prijanjanja molekula na čestice cementa, kombiniranog s djelotvornim učinkom raspršivanja, povećana površina zrna cementa je izložena reakciji s vodom. Kao rezultat ovog efekta moguće je postići ranije razvijanje hidratacijske topline, brzo razvijanje proizvoda hidratacije, a time i povećane rane čvrstoće. KEDOBET SP 103 je prikladan za proizvodnju transportnog reoplastičnog betona tekuće konzistencije, bez pojave segregacije i uz niski vodocementni faktor, s dugim održavanjem ugradivosti i obradivosti te brzi razvoj početne i konačne čvrstoće. KEDOBET SP 103 može se primijeniti u kombinaciji s drugim kemijskim i mineralnim dodacima za postizanje specifičnih svojstava prema zahtjevima projekta. Posebno dobre rezultate pokazuje u kombinaciji s letećim pepelom. Za kombiniranje s drugim kemijskim i mineralnim dodacima molimo konzultirati našu tehničku službu.

Primjena aditiva KEDOBET SP 103 se preporučuje pri temperaturi okoliša iznad 5 °C.

Potrebna količina U normalnim uvjetima se preporučuje doziranje u količini od 0,2 – 1,5 kg na 100 kg veziva. U posebnim slučajevima mogu se preporučiti i druge količine u skladu sa specifičnim uvjetima na mjestu ugradnje. KEDOBET SP 103 je tekući aditiv namijenjen dodavanju u beton tijekom procesa miješanja sastojaka. Najbolji rezultati se postižu kad se aditiv doda nakon što su sve druge komponente već u miješalici i nakon dodavanja najmanje 70 % ukupne količine vode. Količina potrebne vode u smjesi podešava se prema željenoj konzistenciji ili ugradivosti.

6.2.4. Ostali dodaci betonu

Silikatna prašina [30] – Silikatna prašina je mineralni dodatak betonu koji aktivno sudjeluje u hidrataciji cementa te predstavlja jedan od najkvalitetnijih pucolana. Na svojstva betona djeluje preko pucolanskih reakcija kojima se povećava količina C-S-H, te pomoću sitnih čestica koje doprinose poboljšanju obradivosti i povećanju kohezivnosti, zapunjuju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa.

U izradi pokusnih mješavina upotrijebljena je Microsit H20 koja obzirom na svoju izvanrednu sposobnost obrade i njezinu visoku pucolansku reaktivnost, najprikladnija je za proizvodnju građevinskog materijala s posebnim svojstvima, kao što su:

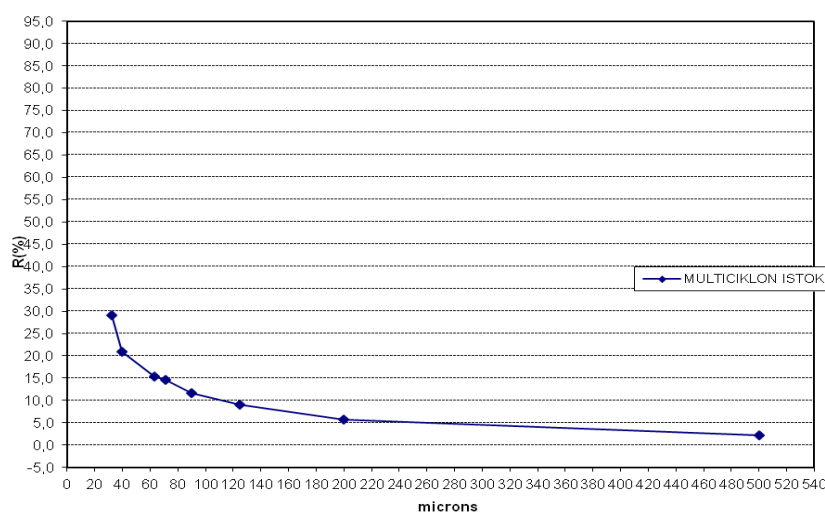
- Samozbijajući materijali sa visokom fluidnošću
- Betoni i mortovi kojima je potrebna otpornost na habanje
- Betoni i mortovi s visokom otpornošću na kemijske i fizičke napade
- Injekcijski mortovi, vrlo fina veziva za pukotinske popravke

Dodaje se 8 – 15 % u odnosu na masu cementa. Svojstva Silikatne prašine Microsit H20 prikazana su u tablici 6.3.

Tablica 6.3.: Svojstva Silikatne prašine Microsit H20

| | |
|------------------------------------|--------------------------|
| KEMIJSKE KARAKTERISTIKE | |
| <i>SiO₂</i> | 56% |
| <i>Al₂O₃</i> | 27% |
| <i>Fe₂O₃</i> | 5% |
| <i>CaO</i> | 5% |
| FIZIKALNE KARAKTERISTIKE | |
| <i>LOI</i> | 3,4% |
| <i>Oblik čestica</i> | sferni |
| <i>Specifična površina (Blain)</i> | 6.000 cm ² /g |
| <i>Specifična gustoća</i> | 2,47 g/cm ² |
| <i>Boja</i> | siva |
| <i>Potražnja za vodom</i> | 30% |

Reciklirani beton – Fino mljeveni beton, dobiven strojnim brušenjem betonske površine. Specifična površina zrna po Blaine-u je 7891 [cm²/g], a specifična težina 2,45 [g/cm³]. Potječe iz Dugopolja. Na slici 6.2. i tablici 6.4. prikazana je granulometrija punila recikliranog betona.



Slika 6.2.: Granulometrijski dijagram punila recikliranog betona

Tablica 6.4.: Granulometrija punila

| SITO | OSTATAK |
|-------------------|---|
| | MULTICIKLON ISTOK |
| | |
| Blaine | |
| microns | % |
| 32 | 29.0 |
| 40 | 21.0 |
| 63 | 15.4 |
| 71 | 14.6 |
| 90 | 11.6 |
| 125 | 9.0 |
| 200 | 5.8 |
| 500 | 2.2 |
| Grain size | MULTICIKLON ISTOK |
| microns | % |
| less than 32 mic. | 71.0 |
| 32-40 mic. | 8.00 |
| 40-63 mic. | 5.60 |
| 63-71 mic. | 0.80 |
| 71-90 mic. | 3.00 |
| 90-125 mic. | 2.60 |
| 125-200 mic. | 3.20 |
| 200-500 mic | 3.60 |
| sives | passing |
| | SEPARATOR (west+ 50% east) reject |
| microns | % |
| 32 | 71.00 |
| 40 | 79.00 |
| 63 | 84.60 |
| 71 | 85.40 |
| 90 | 88.40 |
| 125 | 91.00 |
| 200 | 94.20 |
| 500 | 97.8 |

Leteći pepeo [31] – Predstavlja nusprodukt nastao u termoelektranama loženim na ugljen, koji je pomoću elektrostatskih filtarskih uređaja separiran iz otpadnih plinova. Leteći pepeo kao takav predstavlja materijal kojeg je potrebno zbrinuti i prema njemu postupati kao prema građevinskom otpadu, i to samo u slučajevima kada isti ne spada u klasu opasnih otpada. Odnosno, ukoliko isti ne sadrži povećanu radioaktivnost. Zbrinjavanje ovog materijala obično se provodi dodavanjem istog u različite cementne kompozite ali i u samom procesu proizvodnje cementa. Tako da je uglavnom cementna industrija ona koja ovu vrstu otpadnog materijala i zbrinjava. Uloga letećeg pepela u cementnim kompozitnim materijalima je dvojaka i to: a) kemijska (sudjeluje aktivno u odvijanju pucolanskih reakcija) i b) fizikalna (djeluje kao nukleacijsko mjesto ali i kao punilo). Naime dosadašnje studije su pokazale 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. Ovo svojstvo može zahvaliti isključivo svojoj, već navedenoj, dvostrukoj ulozi. Negativna karakteristika ovakvih cementnih kompozitnih materijala je njihova niska rana mehanička čvrstoća, što predstavlja vrlo bitan parametar koji ograničava uporabu ovakvih cementnih kompozita. U svijetu se stvaraju izuzetno velike količine letećeg pepela različite kvalitete, a samo se dio zbrinjava u cementnoj industriji, pa količina novonastalih rezervi letećeg pepela premašuje potrebe cementne industrije za ovom vrstom materijala, isključivo zbog toga što ova vrsta cementa nema široku primjenu. Gustoća $2,25 \text{ kg/dm}^3$.



Slika 6.3.: Betonski otpad prije mljevenja

Kameno brašno – Dobiva se mljevenjem agregata (vapnenca). Koristimo ga kao filer, odnosno punilo. Specifična težina 2,7 [g/cm³]

Reciklirani betonski otpad („crveni šut“) – Nastao mljevenjem betonskog šuta (koji je sadržavao beton, opeku, mort, staklo, stiropor, ljepilo, pločice i sl., slika 6.3.) u mlinu sa kuglama (slika 6.4.). Nakon toga se prosijava na situ otvora 0.04 mm. Koristio se kao punilo frakcije ≤0.04 mm. Gustoće 2,20 g/cm³, specifične površine (Blain) 10603 cm²/g. Zbog sadržaja opeke ima karakterističnu crvenu boju pa je zato i nazvan „crveni šut“.

Reciklirani betonski otpad („bijeli šut“) – Nastao mljevenjem betonskih elemenata (elementi betonskog komina) u mlinu sa kuglama (slika 6.4.). Nakon toga se prosijava na situ otvora 0.04 mm, (slika 6.5.), da bi se koristio kao punilo frakcije ≤0.04 mm. Gustoće 2,40 g/cm³, specifične površine (Blain) 9679 cm²/g.



Slika 6.4.: Mlin za mljevenje



Slika 6.5.: Prosijavanje „bijelog šuta“ na situ 0,04mm

6.3. Proračun sastava betona

U svrhu istraživanja izrađeno je 9 mješavina betona (M1 – M9), a upotrebljene recepture prikazane su u tablici 6.5. Sve pripravljene mješavine betona sadrže sitnu (0 – 4 mm) i krupnu (4 – 8 i 8 – 16 mm) frakciju drobljenog agregata. Količina cementa je u svim mješavinama jednaka i iznosi 360 kg/m³. Sve mješavine su napravljene sa dodatkom superplastifikatora MasterGlenium Sky 629 u količini od 1% na masu veziva, osim mješavine M1, koja je napravljena sa superplastifikatorom Kedobet SP 103 u istoj količini. Mješavina M1 je napravljena sa dodatkom silice i punila recikliranog betona, mješavina M2 sa dodatkom letećeg pepela i filera od recikliranog betona, mješavine M3, M4 i M5 sa dodatkom letećeg pepela, filera od recikliranog betona i filera od betonskog otpada („bijeli šut“) u različitim odnosima, mješavine M6, M7 i M8 sa dodatkom letećeg pepela, filera od recikliranog betona i punila od betonskog otpada („crveni šut“), dok je mješavina M9 napravljena sa dodatkom kamenog brašna i punila od betonskog otpada („bijeli šut“).

Polazni vodocementni faktor, w/c, ispitnih mješavina je iznosio 0,51, ali se tijekom miješanja (ovisno o vizualnoj procjeni) povećavao ili smanjivao, te se u konačnici kretao u rasponu od 0,46 – 0,61, dok se vodovezivni faktor, w/v kretao u rasponu od 0,34 – 0,45.

Tablica 6.5.: Sastav mješavina M1-M9

| Sastav (kg) | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cement | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 |
| Voda | 183 | 183 | 183 | 183 | 183 | 183 | 183 | 183 | 183 |
| W/C | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 |
| Punilo (reciklirani beton) | 92,88 | 92,88 | 46,44 | 0 | 69,66 | 0 | 46,44 | 69,66 | 0 |
| Punilo (betonski otpad – „bijeli šut“) | 0 | 0 | 46,44 | 92,88 | 23,22 | 0 | 0 | 0 | 23,22 |
| Punilo (betonski otpad – „crveni šut“) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 92,88 | 46,44 | 23,22 | 0 |
| Silikatna prašina | 36,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36,00 |
| Leteći pepeo | 0 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 0 |
| Kameno brašno | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69,66 |
| Agregat 0-4 mm | 810,45 | 810,45 | 810,45 | 810,45 | 810,45 | 810,45 | 810,45 | 810,45 | 810,45 |
| Agregat 4-8 mm | 161,57 | 161,57 | 161,57 | 161,57 | 161,57 | 161,57 | 161,57 | 161,57 | 161,57 |
| Agregat 8-16 mm | 649,47 | 649,47 | 649,47 | 649,47 | 649,47 | 649,47 | 649,47 | 649,47 | 649,47 |
| Superplastifikator (Kedobet) 1% | 3,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Superplastifikator (Glenium) 1% | 0 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 |
| Voda* | 164,5 | 219 | 212 | 189** | 197 | 210 | 216 | 219 | 217 |
| W/C* | 0,46 | 0,61 | 0,59 | 0,53** | 0,55 | 0,58 | 0,60 | 0,61 | 0,60 |
| W/V | 0,34 | 0,45 | 0,43 | 0,39** | 0,40 | 0,43 | 0,44 | 0,45 | 0,44 |

*voda je korigirana obzirom na vlažnost agregata, te također tijekom miješanja voda je dodana ili smanjena

**taj dan je kiša padala, te se agregat namočio

Usporedba parametara sastava samozbijajućeg betona s dodatkom mljevenog betonskog otpada s preporučenim vrijednostima prema EFNARC-u.[32]

Tablica 6.6.: Raspon sastava samozbijajućih mješavina prema EFNARC-u [32]

| <i>Parametar sastava</i> | <i>Preporuka</i> | <i>M1</i> | <i>M2</i> | <i>M3</i> | <i>M4</i> | <i>M5</i> | <i>M6</i> | <i>M7</i> | <i>M8</i> | <i>M9</i> |
|---|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Krupni agregat (kg/m³)</i> | 750 - 1000 | 817,4 | 817,4 | 817,4 | 817,4 | 817,4 | 817,4 | 817,4 | 817,4 | 817,4 |
| <i>Masa sitnog agregata/uk. agregat (%)</i> | 48 – 55% | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| <i>Volumen paste (l/m³)</i> | 300 – 380 | 312 | 312 | 312 | 312 | 312 | 312 | 312 | 312 | 312 |
| <i>Masa praškaste komponente (kg)</i> | 380 - 600 | 488,88 | 488,88 | 488,88 | 488,88 | 488,88 | 488,88 | 488,88 | 488,88 | 488,88 |
| <i>Volumen praškaste komponente (m³)</i> | | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 168 |
| <i>Voda (kg)</i> | 150 - 210 | 164,5 | 219 | 212 | 189 | 197 | 210 | 216 | 219 | 217 |
| <i>v/p</i> | 0,85 – 1,10 | 0,97 | 1,29 | 1,25 | 1,11 | 1,16 | 1,24 | 1,27 | 1,29 | 1,29 |

Iz tablice 6.6. je vidljivo da se nisu svi parametri sastava vodili po rasponima preporučenim od Europskog udruženja EFNARC za samozbijajući beton.

U nastavku će se opažati koliko će ta odstupanja utjecati na konačna svojstva samozbijajućeg betona.

6.4. Način pripreme pokusnih mješavina

Svi sastojci, pojedinih mješavina, su izvagani na preciznoj vagi, te dodani u miješalicu, gdje su suho miješani 1 minutu. Zatim je postepeno dodavana voda i superplastifikator, voda se dodavala ili smanjivala prema vizualnoj procjeni.

M1 - Ova mješavina sa silikatnom prašinom i punilom od recikliranog betona, pokazala se kao jako ljepljiva ali se nije dodala sva količina vode jer je vizualno procijenjeno da bi beton mogao izgubiti stabilnost .

M2 - Kod ove mješavina, postepeno je dodavana voda i aditiv. Po vizualnoj procijeni mješavina je djelovala suha, pa je dodana voda, više od prvotno planiranog, te je miješano dok mješavina nije postala homogena. Ova mješavina je također sadržavala punilo od recikliranog betona. Za razliku od prethodne mješavine, umjesto silice dodan je leteći pepeo, te umjesto superplastifikatora Kedobet, dodan je superplastifikator Glenium koji je zamijenjen u svim ostalim mješavinama.

M3 - Kod ove mješavine, koja je sadržavala punilo betonskog otpada („bijeli“ šut), punilo običnog recikliranog betona i leteći pepeo, također je dodano više vode od prvotno planiranog.

M4 - Ova mješavina je sadržavala dvostruko veću količinu punila betonskog otpada („bijeli“ šut) i jednaku količinu letećeg pepela u odnosu na prethodnu mješavinu, ali je izostavljeno punilo od običnog recikliranog betona. Voda je u ovoj mješavini smanjena obzirom na recepturu, razlog tome je bio vlažan agregat koji je noć prije bio izložen kiši.

M5 - Ova mješavina je sadržavala najmanju količinu punila betonskog otpada („bijeli“ šut), najviše je bilo punila običnog recikliranog betona, a količina letećeg pepela je bila ista kao i u svim ostalim mješavinama M2 - M8. Voda je dodana prema recepturi, bez povećanja ili smanjenja količine.

M6 - Ova mješavina je sadržavala najveću količinu drugog punila betonskog otpada („crveni“ šut), u odnosu na iduće tri i jednaku količinu letećeg pepela. Dodano je više vode od prvotno planiranog.

M7 - Ova mješavina je sadržavala upola manje punila betonskog otpada („crveni“ šut), u odnosu na prethodnu, isto toliko je bilo i punila od recikliranog betona, količina letećeg pepela je bila ista. Dodano je više vode od prvotno planiranog.

M8 - Ova mješavina je sadržavala najmanju količinu punila betonskog otpada („crveni“ šut), u odnosu na prethodne dvije, najviše je bilo punila običnog recikliranog betona. Dodano je više vode od prvotno planiranog.

M9 - Ova mješavina je sadržavala punilo od betonskog otpada („bijeli“ šut), u najmanjoj količini. Umjesto letećeg pepela dodana je silikatna prašina, a umjesto punila od recikliranog betona - kameno brašno (1:2). Dodano je više vode od prvotno planiranog.

6.5. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata svježeg betona

Ispitivana svojstava samozbijajućeg betona provedena su prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12. Sva ispitivanja provedena su u laboratorijskim uvjetima s opremom prema pravilima koja propisuju norme. Metode ispitivanja su opisane u poglavlju 4.1. Za potrebe analize rezultata, u tablici 6.7. su dane granične vrijednosti ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju.

Tablica 6.7.: Klasifikacija samozbijajućih betona u svježem stanju[32]

| <i>Metoda ispitivanja</i> | <i>Granične vrijednosti</i> | <i>Razred</i> |
|---|-----------------------------|---------------|
| <i>Rasprostiranje (mm)</i> | 550-650 | SF1 |
| | 660-750 | SF2 |
| | 760-850 | SF3 |
| <i>Viskoznost $t_{500}(s)$</i> | ≤ 2 | VS1 |
| | > 2 | VS2 |
| <i>V-lijevak (s)</i> | ≤ 8 | VF1 |
| | 9-25 | VF2 |
| <i>L-kutija</i> | $\geq 0,8$ | PA1 (2 rebra) |
| | | PA2 (3 rebra) |
| <i>J-prsten</i> | ≤ 10 | PJ1 (2 rebra) |
| | | PJ2 (3 rebra) |

U tablici 6.8. prikazani su preporučeni razredi za različitu primjenu prema konstruktivnim elementima. Ovu preporuku dalo je Europsko udruženje proizvođača samozbijajućih betona EFNARC 2005 godine.

Tablica 6.8: Primjena SZB prema razredima konzistencije za različite konstruktivne elemente[32]

| <i>Viskoznost</i> | | | | <i>Otpornost segregacije / prolaženja</i> |
|--|-----------------------------------|------------------|-------------------------|---|
| <i>VS2 (t₅₀₀)</i> <i>VF2 (v-lijevak)</i> | Ploče u nagibu | Zidovi i stupovi | Visoki i tanki elementi | <i>Odrediti PA (l-box) za SF1 I SF2 (segregacija)</i> |
| <i>VS1 ili VS2</i> <i>VF1 ili VF2 ili ciljane vrijednosti</i> | | Zidovi i stupovi | Visoki i tanki elementi | <i>Odrediti SR za SF3 (rasprostiranje)</i> |
| | Podovi i ploče | | | <i>Odrediti SR za SF2 I SF3</i> |
| | <i>F1</i> | <i>F2</i> | <i>SF3</i> | |
| | <i>Rasprostiranje slijeganjem</i> | | | |

6.5.1. Metoda ispitivanja V-lijevak

Prvo ispitivanje nakon miješanja betona je ispitivanje vremena istjecanja betona iz V – lijevka, koje se koristi za određivanje viskoznosti i svojstava popunjavanja samozbijajućeg betona. Na slici 6.6. prikazano je istjecanje mješavine M8 iz V - lijevka.



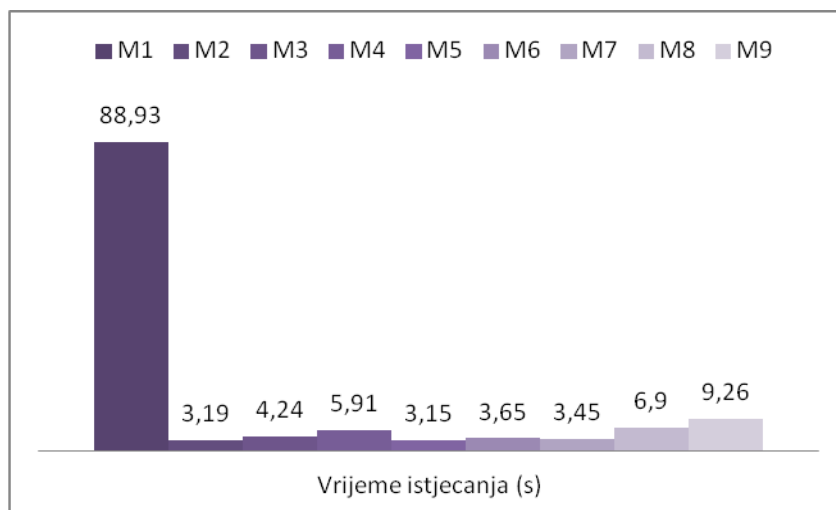
Slika 6.6.: Istjecanje mješavine M8 iz V – lijevka

U tablici 6.9. i na slici 6.7. prikazani su rezultati ispitivanja istjecanja u V – lijevku.

Tablica 6.9.: Vrijeme istjecanje uzorka kroz V – lijevak

| <i>Mješavina</i> | <i>Vrijeme istjecanja kroz lijevak (s)</i> | <i>Razred</i> |
|------------------|--|---------------|
| <i>M1</i> | 88,93 | - |
| <i>M2</i> | 3,19 | VF1 |
| <i>M3</i> | 4,24 | VF1 |
| <i>M4</i> | 5,91 | VF1 |
| <i>M5</i> | 3,15 | VF1 |
| <i>M6</i> | 3,65 | VF1 |
| <i>M7</i> | 3,45 | VF1 |
| <i>M8</i> | 6,9 | VF1 |
| <i>M9</i> | 9,26 | VF2 |

Mješavine M2 – M8 imale su jako dobro tečenje, odnosno istjecanje kroz lijevak bez obzira na vrstu i količinu dodataka. Mješavina M9 je nešto duže prolazila kroz lijevak, ona je uz mješavinu M1 imala dodatak silike u jednakoj količini, umjesto letećeg pepela. Klasificirana je u 2. razred. Mješavina M1 je bila previše ljepljiva i njeno vrijeme prolaska kroz lijevak je trajalo oko minutu i pol što je izvan granice klasifikacije, i iz toga se odmah moglo zaključiti da mješavina M1 ne spada među samozbijajuće betone.



Slika 6.7.: Vrijeme istjecanja uzorka kroz V – lijevak

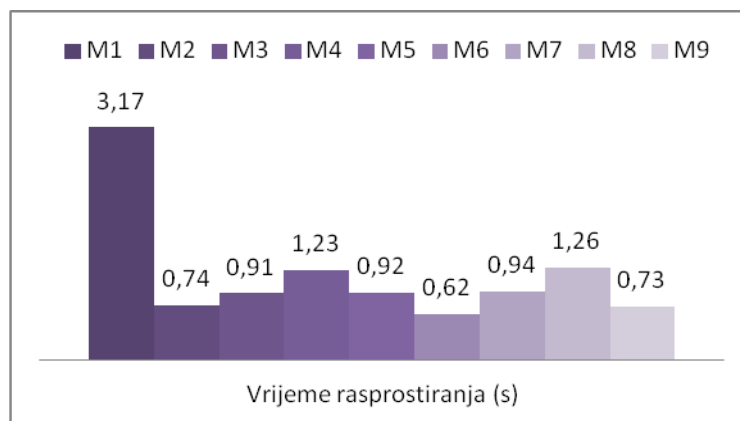
6.5.2. Metoda ispitivanja rasprostiranja – slijeganja

U tablici 6.10. i na slikama 6.8. - 6.10. prikazani su rezultati ispitivanja razastiranja.

Tablica 6.10.: Vrijeme razastiranja i promjer razastiranja

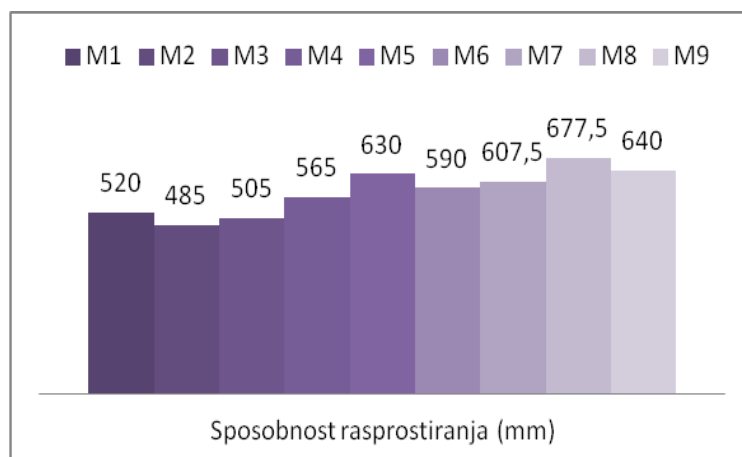
| Mješavina | t_{500} (s) | d_1 (mm) | d_2 (mm) | $SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$ | Razred SF | Razred VS |
|-----------|---------------|------------|------------|----------------------------|-----------|-----------|
| M1 | 3,17 | 520 | 520 | 520 | *- | VS2 |
| M2 | 0,74 | 510 | 460 | 485 | *- | VS1 |
| M3 | 0,91 | 550 | 460 | 505 | *- | VS1 |
| M4 | 1,23 | 560 | 570 | 565 | SF1 | VS1 |
| M5 | 0,92 | 510 | 650 | 630 | SF1 | VS1 |
| M6 | 0,62 | 600 | 580 | 590 | SF1 | VS1 |
| M7 | 0,94 | 605 | 610 | 607,5 | SF1 | VS1 |
| M8 | 1,26 | 685 | 670 | 677,5 | SF2 | VS1 |
| M9 | 0,73 | 640 | 640 | 640 | SF1 | VS1 |

* za rasprostiranje <550 mm mora se osigurati minimalno vibriranje

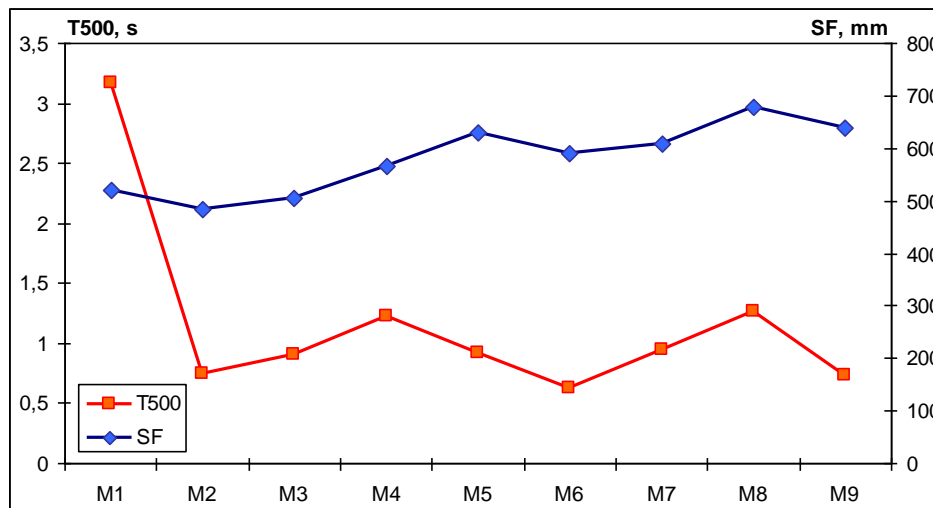


Slika 6.8.: Grafički prikaz vremena rasprostiranja

Ukoliko se rezultati ispitivanja prikazu na zajedničkom grafu, slika 6.8 i 6.10. vidljivo je da samo mješavina M1 pokazuje drugačiji trend (najdulje vrijeme rasprostiranja), a kod drugih mješavina se linije vremena rasprostiranja i promjera rasprostiranja na neki način prate. Najmanje vrijeme rasprostiranja imala je mješavina M6. Mješavine M2, M3 i M4 imaju vrijeme T_{500} u rangu ostalih 5 mješavina, ali im je rasprostiranje manje. M3 i M4 su mješavine sa „bijelim šutom“ koje nakon početnog brzog rasprostiranja odjednom „zgnusnu“. S obzirom da im se nakon miješanja opet vrati obradivost, vjerojatno je riječ o pojavi tiksotropije, slika 6.13. Kod mješavina M5 (slika 6.12.) i M9 (slika 6.11.) dodana je manja količina bijelog šuta. Mješavina M2 ima sličan sastav kao M1, samo je silikatna prašina zamijenjena sa letećim pepelom, te dodan drugi aditiv. Mješavina M2 je puno pokretljivija i u vremena istjecanja kao i u vremenu rasprostiranja. Najveći promjer razastiranja imala je mješavina M8. Sve su se mješavine jednoliko rasprostirale, bez zadržavanja krupnih zrna agregata na sredini ploče. Nijedna mješavina nije lučila višak vode bez obzira što su u nekim recepturama bile veće količine vode od preporučenih (slika 6.12).



Slika 6.9.: Grafički prikaz promjera rasprostiranja



Slika 6.10.: Vrijeme rasprostiranja i promjer rasprostiranja



Slika 6.11.: Rasprostiranje mješavine M9



Slika 6.12.: Mješavina M5 (nema lučenja vode)



Slika 6.13.: Zgušnjavanje mješavine M3 - tiksotropija

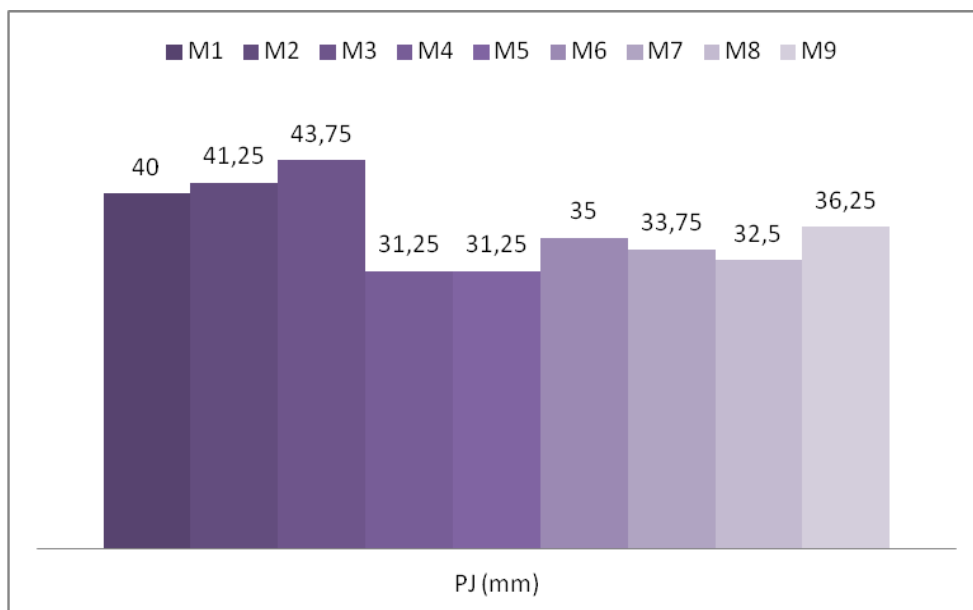
6.5.3. Metoda ispitivanja J – prstenom

U tablici 6.11. i na slikama 6.14. i 6.15. prikazani su rezultati ispitivanja sa J – prstenom.

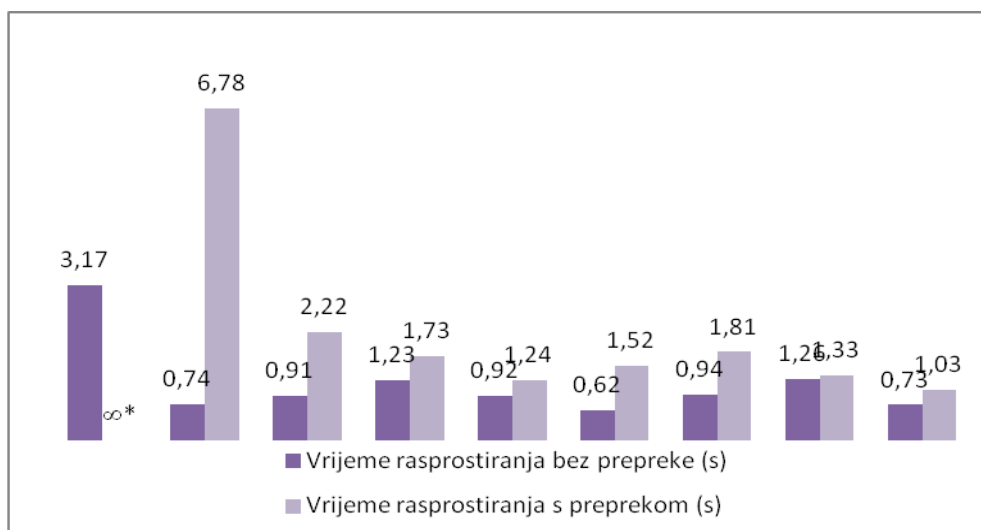
Tablica 6.11.: Rezultati ispitivanja J - prstena

| <i>Mješavina</i> | <i>t₅₀₀ (s)</i> | <i>d₁</i> | <i>d₂</i> | <i>SF_j</i> | <i>h_{x1}</i> | <i>h_{x2}</i> | <i>h_{y1}</i> | <i>h_{y2}</i> | <i>h₀</i> | <i>PJ</i> | <i>Razred</i> |
|------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------|---------------|
| <i>M1</i> | ∞ | 490 | 490 | 490 | 12,5 | 12 | 14 | 13,5 | 9 | 40 | - |
| <i>M2</i> | 6,78 | 475 | 435 | 455 | 13 | 12 | 12 | 11,5 | 8 | 41,25 | - |
| <i>M3</i> | 2,22 | 480 | 480 | 480 | 11,5 | 12 | 12 | 12 | 7,5 | 43,75 | - |
| <i>M4</i> | 1,73 | 545 | 560 | 552,5 | 11,5 | 12,5 | 12 | 12,5 | 9 | 31,25 | - |
| <i>M5</i> | 1,24 | 640 | 610 | 625 | 12 | 13 | 12,5 | 13 | 9,5 | 31,25 | - |
| <i>M6</i> | 1,52 | 540 | 550 | 545 | 12 | 12,5 | 12,5 | 13 | 9 | 35 | - |
| <i>M7</i> | 1,81 | 565 | 570 | 567,5 | 13 | 12,5 | 12 | 12 | 9 | 33,75 | - |
| <i>M8</i> | 1,33 | 640 | 600 | 620 | 12,5 | 12,5 | 13 | 13 | 9,5 | 32,5 | - |
| <i>M9</i> | 1,03 | 580 | 585 | 582,5 | 12,5 | 12,5 | 13 | 12,5 | 9 | 36,25 | - |

*mješavina M1 nije dosegla promjer od 500mm



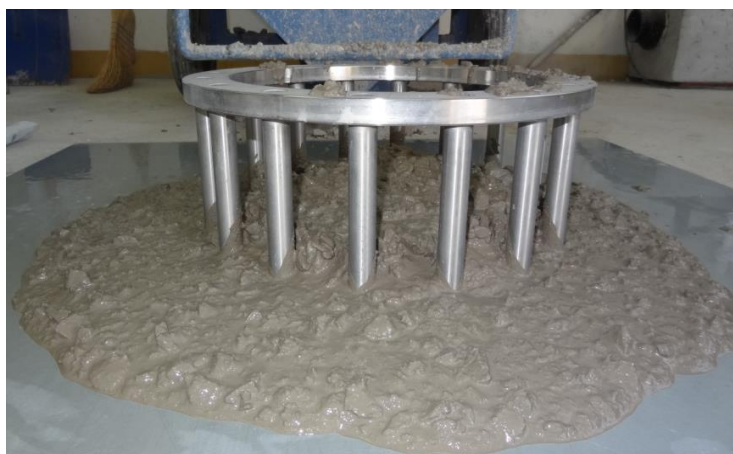
Slika 6.14.: Grafički prikaz rezultata ispitivanja J – prstenom



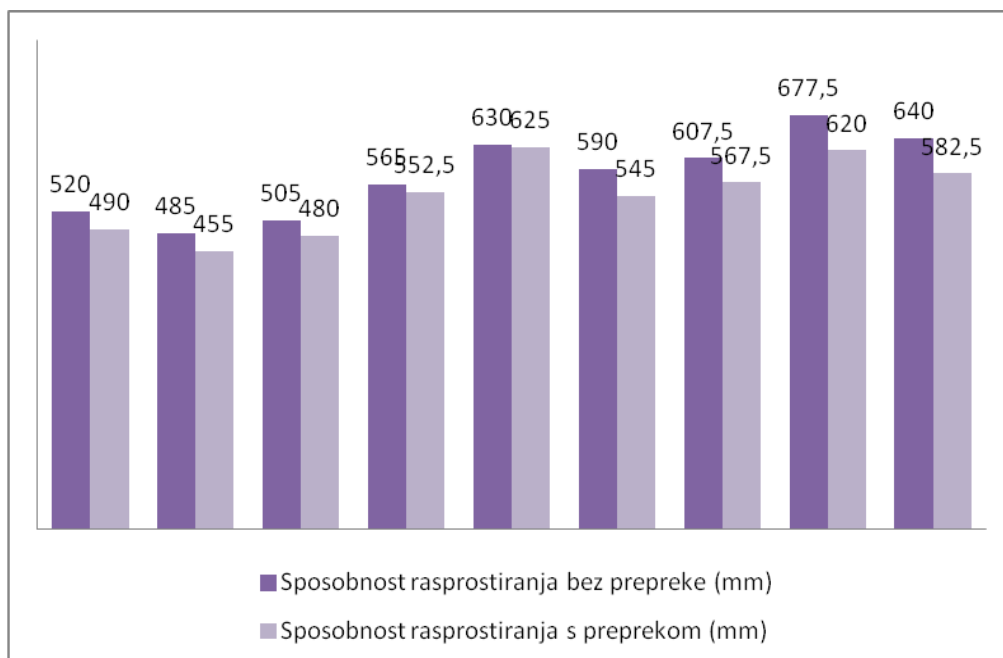
Slika 6.15.: Grafički prikaz usporedbe vremena rasprostiranja bez prepreke i sa preprekom

Kod ovog ispitivanja nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije ispitivanja (vrijednost PJ je svim mješavinama $>10\text{mm}$), te po tome nijedna mješavina se ne bi mogla svrstati u samozbijajuće betone. Najbrže vrijeme rasprostiranja imala je mješavina M9, koja je imala dodatak punila „bijelog šuta“, kamenog brašna i silikatne prašine. Najsporije tečenje je imala mješavina M1. Iz toga se da zaključiti, da je najveći utjecaj na brzinu razastiranja imao aditiv. Najveći promjer razastiranja imala je mješavina M5, koja je imala najmanju količinu „bijelog šuta“. Na slici 6.14. je također vidljivo kako vrijednost PJ blago opada kod mješavina M6, M7 i M8, kako opada i količina „crvenog šuta“. Logično je bilo za očekivati da će vrijeme rasprostiranja (slika 6.15.) s preprekom biti dulje od istog bez prepreke, isto tako da će

sposobnost rasprostiranja (slika 6.17.) biti veća bez prepreke, odnosno manja sa preprekom. Međutim, u idealnim uvjetima te vrijednosti ne bi trebale imati veliku razliku. Mješavina M1 je bila toliko gusta, da nije niti izašla van prepreke. Najveću razliku u vremenu ima mješavina M2, dok najmanju ima mješavina M8, koja je imala dodatak „crvenog šuta“ u odnosu na M2. Mješavine koje imaju jednaku količinu bijelog ili crvenog šuta kao i filera od recikliranih betona imaju najdulje vrijeme T_{500} za J – prsten. Najmanju razliku u rasprostiranju ima mješavina M5, dok najveću ima mješavine M7 i M9. Na slici 6.16. vidljivo je kako su krupna zrna agregata zapela o prepreku prstena.



Slika 6.16.: Ispitivanje J-ringa (mješavina M7)



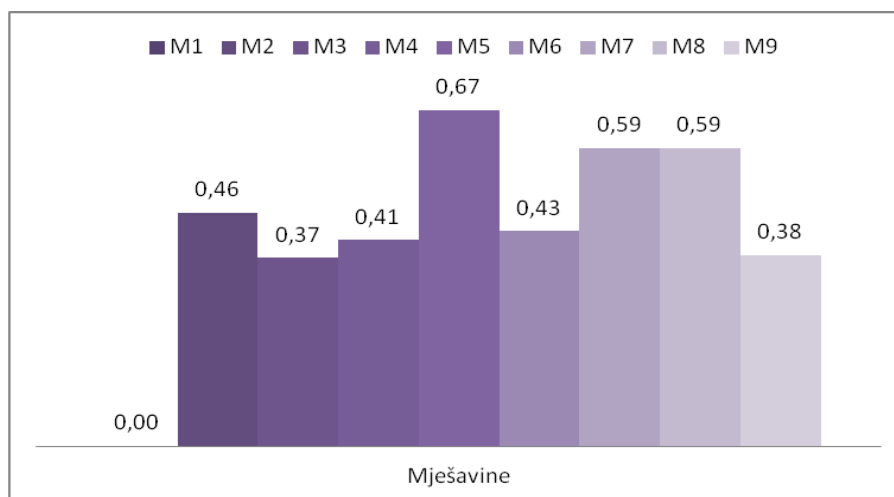
Slika 6.17.: Grafički prikaz usporedbe sposobnosti rasprostiranja bez prepreke i sa preprekom

6.5.4. Metoda ispitivanja L – kutijom

Rezultati ispitivanja L – kutijom prikazani su u tablici 6.12. i na slici 6.18.

Tablica 6.12.: Rezultati ispitivanja L – kutijom

| Mješavina | h_1 | h_2 | h_3 | h_{sr} | H_1 | H_2 | H_3 | H_{sr} | $H_1 = 600 - h_{sr}$ | $H_2 = 150 - h_{sr}$ | $PA = \frac{H_2}{H_1}$ | Razred |
|-----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|----------------------|----------------------|------------------------|--------|
| M1 | 255 | 255 | 255 | 255,00 | 150 | 150 | 150 | 150,00 | 345,00 | 0,00 | 0,00 | - |
| M2 | 435 | 450 | 430 | 438,33 | 110 | 100 | 105 | 75,00 | 161,67 | 75,00 | 0,46 | - |
| M3 | 450 | 455 | 440 | 448,33 | 90 | 90 | 100 | 93,33 | 151,67 | 56,67 | 0,37 | - |
| M4 | 455 | 455 | 450 | 453,33 | 90 | 85 | 95 | 90,00 | 146,67 | 60,00 | 0,41 | - |
| M5 | 480 | 480 | 480 | 480,00 | 70 | 70 | 70 | 70,00 | 120,00 | 80,00 | 0,67 | - |
| M6 | 450 | 455 | 450 | 451,67 | 85 | 80 | 95 | 86,67 | 148,33 | 63,33 | 0,43 | - |
| M7 | 475 | 475 | 470 | 473,33 | 75 | 75 | 75 | 75,00 | 126,67 | 75,00 | 0,59 | - |
| M8 | 475 | 475 | 470 | 473,33 | 75 | 70 | 80 | 75,00 | 126,67 | 75,00 | 0,59 | - |
| M9 | 430 | 435 | 420 | 428,33 | 90 | 80 | 85 | 85,00 | 171,67 | 65,00 | 0,38 | - |



Slika 6.18.: Grafički prikaz rezultata ispitivanja L - kutijom

Kod ovog ispitivanja također nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije ispitivanja, te nam to također govori da ovakav beton se ne može ugraditi bez vibriranja. Sve mješavine, osim M1 su ispunile horizontalni dio kutije (slika 6.19.). Mješavina M5 je bila najbliža ispunjavanju kriterija, međutim nedovoljno dobra. Mješavine M5 i M8 su imale najmanje količine mljevenog punila, te su imale najbolje PA vrijednosti u odnosu na ostale. Obzirom tablicu 6.6. može se vidjeti da je postojala mogućnost dodavanja vode mješavini M4, M5 i M6 koja bi možda u tom slučaju, pomogla fluidnosti i dovela ove mješavine do potrebnih zahtjeva L – kutije kao i J – prstena. U tom slučaju trebalo bi ponoviti ispitivanje sa većom količinom vode ili dodati modifikator viskoznosti.



Slika 6.19.: Ispitivanje L – kutijom (mješavina M1)

6.5.5. Ispitivanje temperature i volumne mase

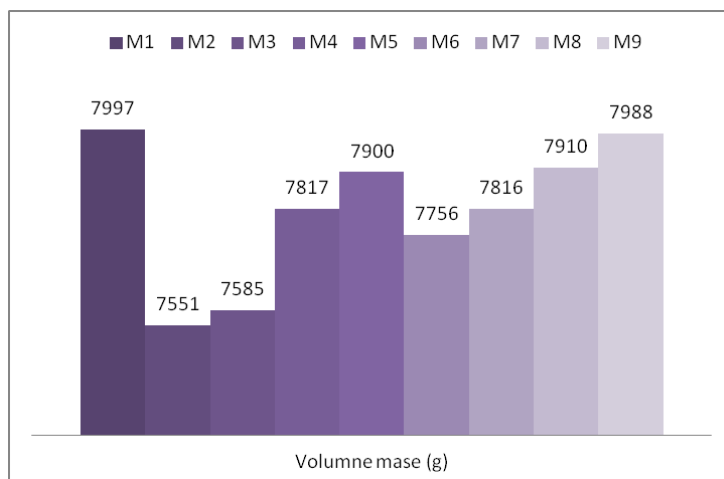
Na samom kraju ispitivanja betona u svježem stanju ispitani su volumna masa i temperature mješavina (slika 6.22.), nakon čega su mješavine ugrađene u kalupe (slika 6.23.). Rezultati su prikazani u tablici 6.13. i na slikama 6.20. i 6.21.

Tablica 6.13.: Volumna masa svježeg betona i temperatura svježih mješavina

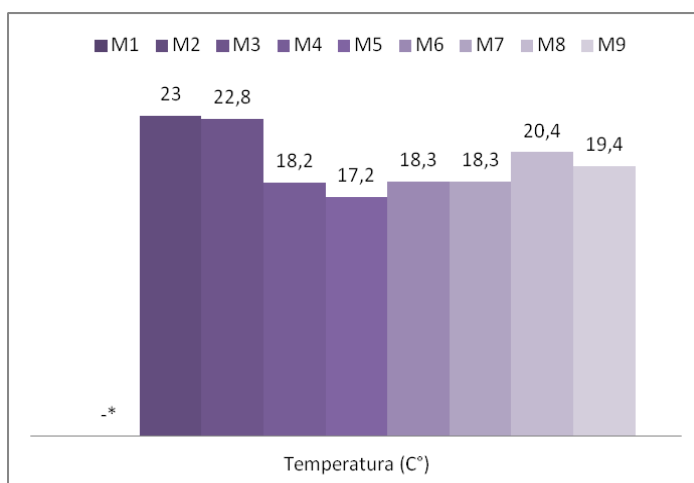
| <i>Mješavina</i> | <i>Volumna masa svježeg betona (g)</i> | <i>Temperatura (C°)</i> |
|------------------|--|-------------------------|
| <i>M1</i> | 7997 | .* |
| <i>M2</i> | 7551 | 23 |
| <i>M3</i> | 7585 | 22,8 |
| <i>M4</i> | 7817 | 18,2 |
| <i>M5</i> | 7900 | 17,2 |
| <i>M6</i> | 7756 | 18,3 |
| <i>M7</i> | 7816 | 18,3 |
| <i>M8</i> | 7910 | 20,4 |
| <i>M9</i> | 7988 | 19,4 |
| <i>MAX</i> | 7997 | 23,0 |
| <i>MIN</i> | 7551 | 17,2 |

*temperatura M1 nije zabilježena

Najveću volumnu masu imala je mješavina M1, koja je kako po svemu tako i po ovom ispitivanju bila ekstremna u svemu, dok je najmanju masu imala mješavina M2. Najvišu temperaturu imala je mješavina M2, a najnižu mješavina M5.



Slika 6.20.: Grafički prikaz volumne masa svježih mješavina



Slika 6.21.: Grafički prikaz temperatura svježih mješavina



Slika 6.22.: Mjerenje temperature svježe mješavine (M8)

6.6. Mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona

U tablici 6.13. prikazani su mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona, dok je su u tablici 6.14. prikazane korektivne mjere na neke od nepravilnosti, i njihov utjecaj na svojstva samozbijajućeg betona.

Tablica 6.13.: Mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona [32]

| <i>Ispitivanje</i> | <i>Rezultati manji od</i> | <i>Mogući uzrok</i> | <i>Rezultati veći od</i> | <i>Mogući uzrok</i> |
|--|---------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| <i>Rasprostiranje slijeganjem</i> | 650 mm | prevelika viskoznost | 750 mm | premala viskoznost |
| | | visoka granica tečenja | | segregacija |
| <i>T₅₀₀vrijeme rasprostiranja</i> | 2s | premala viskoznost | 5s | prevelika viskoznost |
| | | | | visoka granica tečenja |
| <i>V - lijevak</i> | 8s | premala viskoznost | 12s | prevelika viskoznost |
| | | | | visoka granica tečenja |
| | | | | blokiranje |
| <i>J - prsten</i> | | prevelika viskoznost | 10mm | prevelika viskoznost |
| | | visoka granica tečenja | | segregacija |
| | | segregacija | | |
| | | blokiranje | | |
| <i>L - kutija</i> | 0,8 | prevelika viskoznost | 1 | pogreška u rezultatu |
| | | visoka granica tečenja | | |
| | | blokiranje | | |

Tablica 6.14.: Korektivne mjere lošim svojstvima samozbijajućeg betona [32]

| Moguća poboljšanja | Utjecaj na: | | | |
|---|------------------------------------|---|----------------------------------|-----------------|
| | Sposobnost popunjavanja | Sposobnost zaobilaženja prepreka | Otpornost segregaciji | Čvrstoća |
| Prevelika viskoznost | | | | |
| <i>povećati količinu vode</i> | + | + | - | - |
| <i>povećati volumen paste</i> | + | + | + | + |
| <i>povećati količinu superplast.</i> | + | + | - | + |
| Premala viskoznost | | | | |
| <i> smanjiti količinu vode</i> | - | - | + | + |
| <i> smanjiti volumen paste</i> | - | - | - | - |
| <i>povećati kol. modifika. visk.</i> | - | - | + | - |
| <i> smanjiti količinu superplast.</i> | - | - | + | 0 |
| <i> koristiti sitnije prašk. komp.</i> | + | + | + | 0 |
| <i> koristiti sitniji pijesak</i> | + | + | + | 0 |
| Previsoka granica tečenja | | | | |
| <i>povećati količinu superplast.</i> | + | + | - | + |
| <i>povećati volumen paste</i> | + | + | + | + |
| <i>povećati volumen morta</i> | + | + | + | + |
| Segregacija | | | | |
| <i>povećati volumen paste</i> | + | + | + | + |
| <i>povećati volumen morta</i> | + | + | + | + |
| <i> smanjiti količinu vode</i> | - | - | + | + |
| <i> koristiti sitnije praškaste ko.</i> | + | + | + | 0 |
| Ubrzano smanjenje obradivosti | | | | |
| <i> koristiti sporijevezujući cem.</i> | 0 | 0 | - | - |
| <i>povećati količinu usporivača</i> | 0 | 0 | - | - |
| <i> koristiti drugu vrstu superpl.</i> | ? | ? | ? | ? |
| <i> izmijeniti količ. filera i cem.</i> | ? | ? | ? | ? |
| Blokiranje | | | | |
| <i> smanjiti maksimalno zrno ag.</i> | + | + | + | - |
| <i>povećati volumena paste</i> | + | + | + | + |
| <i>povećati volumen morta</i> | + | + | + | + |

+ upućuje na bolje rezultate u odnosu na svojstva betona.

- upućuje na lošije rezultate u odnosu na svojstva betona.

0 prikazuje da nema utjecaj na određeno svojstvo betona.

? prikazuje da se ne može previdjeti utjecaj na svojstvo betona.

Prema tablici 6.6., parametri sastava mješavina se nisu vodili po rasponima preporučenim od Europskog udruženja EFNARC za samozbijajući beton. Primjerice, mješavine M2, M3, M7, M8 i M8 sadrže veću količinu vode od preporučenog. Međutim nijedna mješavina nije imala lučenje vode, a blaga segregacija se dogodila (vidljivo na ispitivanju J - Ringa) bez obzira na preporučenu količinu filera i agregata.

Prema tablici 6.6. trebalo bi povećati količinu vode određenim mješavinama, povećati volumen paste te povećati količinu superplastifikatora.

6.7. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata očvrslog betona

Nakon ispitivanja betona u svježem stanju, isti je ugrađen u kalupe oblika kocke dimenzija 150 mm x 150 mm x 150 mm (slika 6.23.) bez zbijanja. Sve su mješavine ispunile kalup bez mehaničkog zbijanja osim mješavine M1 koja se ugradila uz pomoć zidarske žlice. Uzorci su u kalupu stali 24 sata i to u prostoriji relativne vlažnosti zraka najmanje 95% i temperature 20 ± 3 °C, a nakon toga su izvađeni iz kalupa u čuvani u vodi do dana ispitivanja. Plohe kocaka betona su bile glatke i pravilnog oblika, osim kocke betona M1 koja je bila hrapava i nedovoljno dobro ugrađena (slika 6.24.).



Slika 6.23.: Ugrađeni beton u kalupe (mješavina M5)



Slika 6.24.: Usporedba vizualnog izgleda uzoraka kocaka M1 i M8

6.7.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

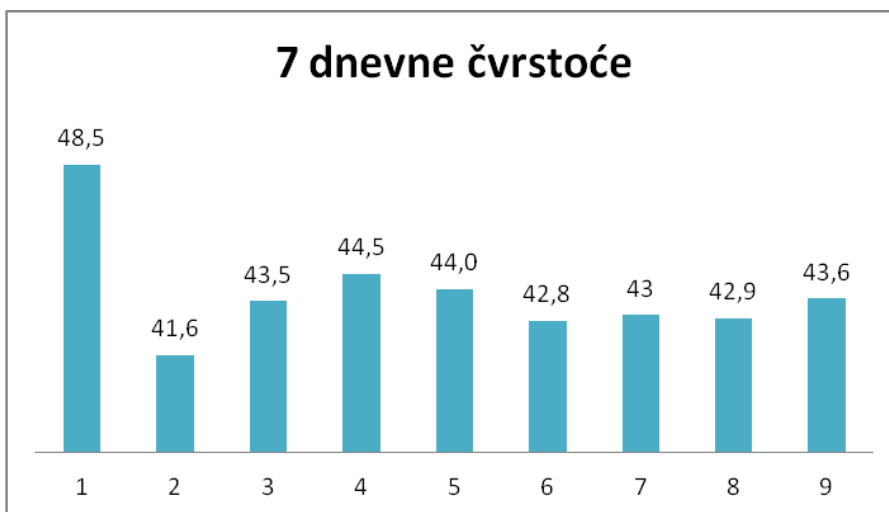
Tlačna čvrstoća ispitivala se 7, 14 i 28 dana nakon ugrađivanja. Preciznost preše, ravnost pritisnih ploča i drugo propisuje se standardom. Ispitno tijelo je bilo u vodom zasićenom stanju, a površine su obrisane. Najprije je izmjerena masa i sve dimenzije ispitnog tijela te izračunata volumna masa betona. Zatim je tijelo stavljeno u prešu (slika 6.25.) i opterećivano brzinom od $0,6 \pm 0,4$ MPa/s do sloma (slika 6.29.). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.15. i slikama 6.26, 6.27, i 6.28.



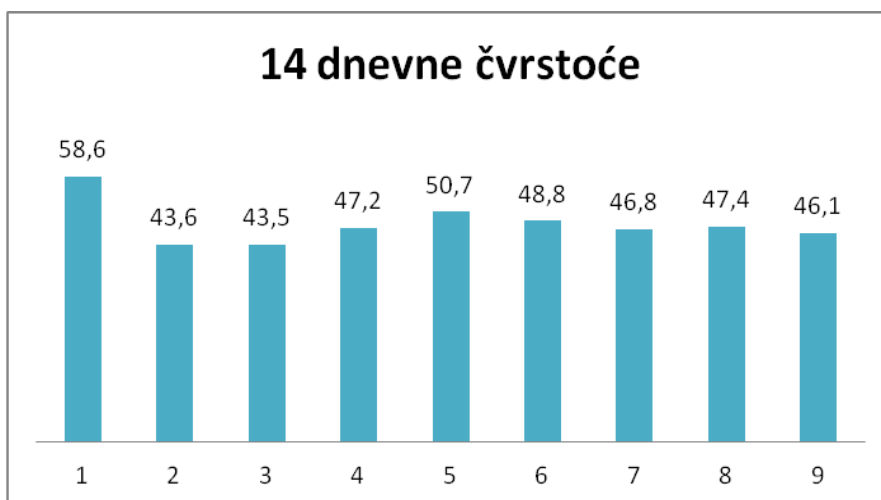
Slika 6.25.: Ispitivanje tijela kocke M2 starosti 7 dana

Talica 6.15.: Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak

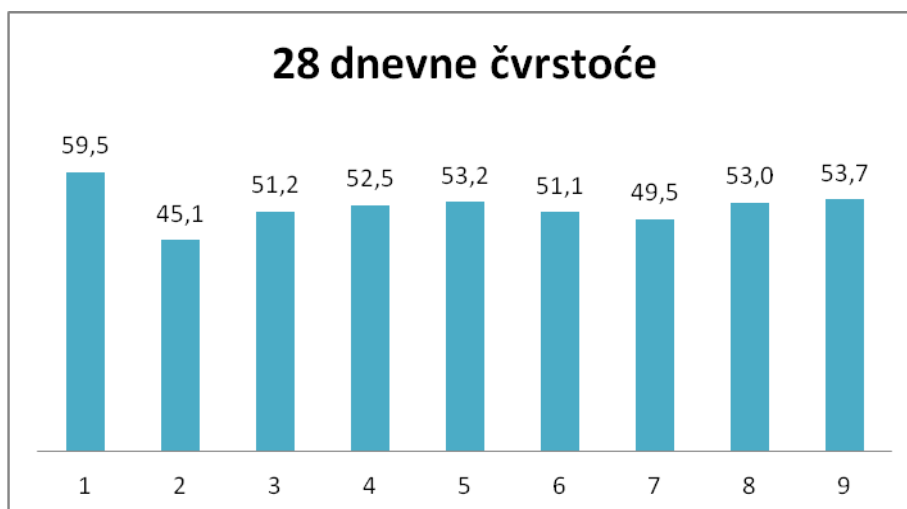
| Uzorci betona/Čvrstoće | 7 dana | 14 dana | 28 dana |
|------------------------|--------|---------|---------|
| M1 | 48,5 | 58,6 | 59,5 |
| M2 | 41,6 | 43,6 | 45,1 |
| M3 | 43,5 | 43,5 | 51,2 |
| M4 | 44,5 | 47,2 | 52,5 |
| M5 | 44,0 | 50,7 | 53,2 |
| M6 | 42,8 | 48,8 | 51,1 |
| M7 | 43 | 46,8 | 49,5 |
| M8 | 42,9 | 47,4 | 53,0 |
| M9 | 43,6 | 46,1 | 53,7 |



Slika 6.26.: Grafički prikaz tlačnih čvrstoća nakon 7 dana



Slika 6.27.: Grafički prikaz tlačnih čvrstoća nakon 14 dana



Slika 6.28.: Grafički prikaz tlačnih čvrstoća nakon 28 dana

Početne čvrstoće betona (nakon 3 dana) variraju od 41,6 do 48,5 MPa. Najveću početnu čvrstoću ima beton M1, a najmanja pripada betonu M2. Raspon tlačnih čvrstoća odgovara klasi cementa koji ima visoku ranu čvrstoću prema tablici 6.1.. Tlačne čvrstoće nakon 14 dana variraju od 43,5 MPa do 58,6 MPa. Tu također najveću čvrstoću ima beton M1, dok najmanje imaju betoni M2 i M3. Dobivene 28 – dnevne tlačne čvrstoće kreću se u rasponu 45,1 MPa do 59,5 MPa, gdje je najveća čvrstoća betona M1, a najmanja betona M2. Također vidljivo je da nema velike razlike u čvrstoćama bilo kod upotrebe manje ili veće količine betonskog otpada kao punila (crvenog ili bijelog), što je dobar pokazatelj da se može sa takvim punilom u potpunosti zamijeniti uobičajeno punilo. Betoni M1 i M9 su izrađeni s dodatkom silikatne prašine, koja je doprinijela malo većoj tlačnoj čvrstoći nakon 28 dana. Dok je kod ostalih betona izrađenih s dodatkom letećeg pepela moguć razvoj čvrstoće i u kasnijem periodu jer je letećem pepelu potrebno neko duže vrijeme da se aktivira. Gledajući općenito, svi betoni su postigle dobre čvrstoće, obzirom da se radi betonima s dodatkom recikliranog otpada, te svi imaju veću čvrstoću od referentne M2.



Slika 6.29.: Uzorak betona M9 nakon ispitivanja 14-dnevne tlačne čvrstoće

6.7.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa i izračun dinamičkog modula elastičnosti

Na temelju dobivenih srednjih vrijednosti brzina ultrazvučnih valova, preko uređaja za mjerenje ultrazvučnih valova (slika 6.33.) odredio se dinamički modul elastičnosti betona prema sljedećoj 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/m^3]

μ – poissonov koeficijent [$\mu = 0.2$]

U tablici 6.16. prikazane su brzine ultrazvučnih valova, a u tablici 6.17. prikazani su rezultati dinamičkog modula elastičnosti betona u očvrslom stanju.

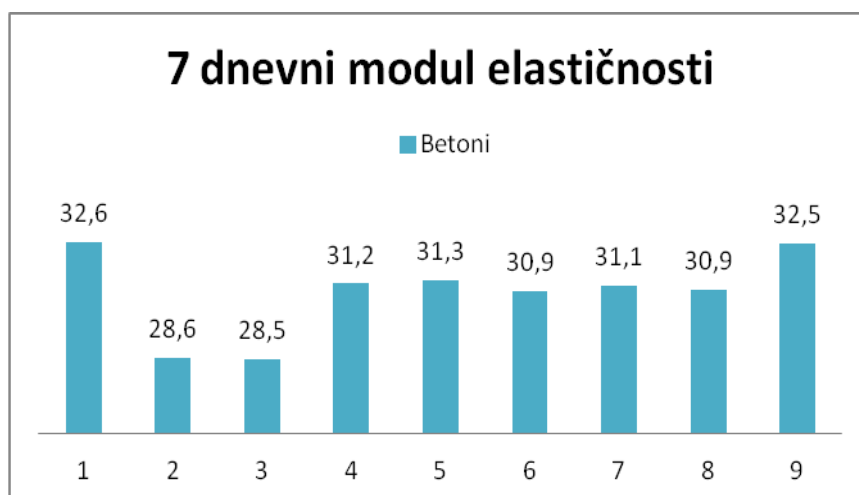
Tablica 6.16.: Rezultati brzina ultrazvučnog vala očvrslom betona

| | | <i>M1</i> | <i>M2</i> | <i>M3</i> | <i>M4</i> | <i>M5</i> | <i>M6</i> | <i>M7</i> | <i>M8</i> | <i>M9</i> |
|---------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Brzina ultrazvučnog vala (m/s) | 7 dana | 3937,1 | 3740,7 | 3754,8 | 3866,2 | 3846,3 | 3856,1 | 3861,0 | 3836,3 | 3916,5 |
| | 14 dana | 3995,5 | 3881,0 | 3816,8 | 3921,6 | 3876,1 | 3926,8 | 3891,2 | 3911,4 | 3926,9 |
| | 28 dana | 4106,0 | 3892,7 | 3940,5 | 3964,9 | 3940,5 | 3975,4 | 3965,2 | 3986,1 | 4010,8 |

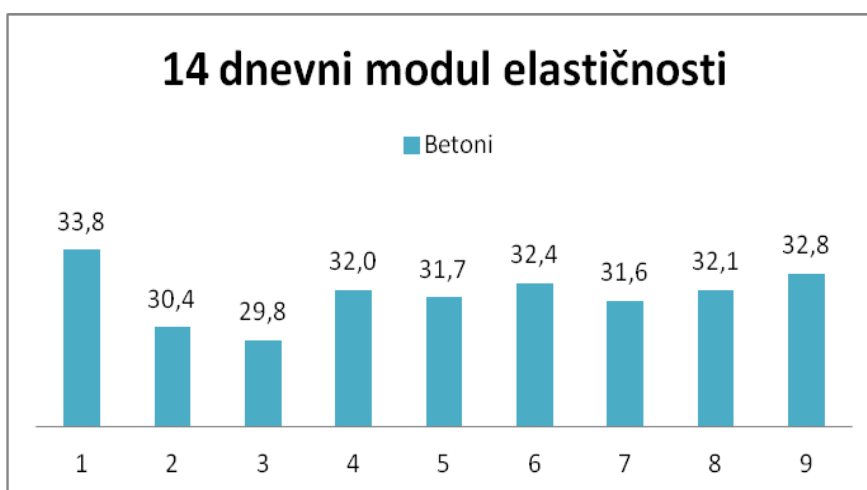
Analizom rezultata brzine ultrazvučnog vala nakon 28 dana svi betoni se mogu klasificirati kao vrlo kvalitetni betoni. Najveću brzinu nakon 28 dana je postigao beton M1.

Tablica 6.17.: Rezultati dinamičkog modula elastičnosti očvrslom betona

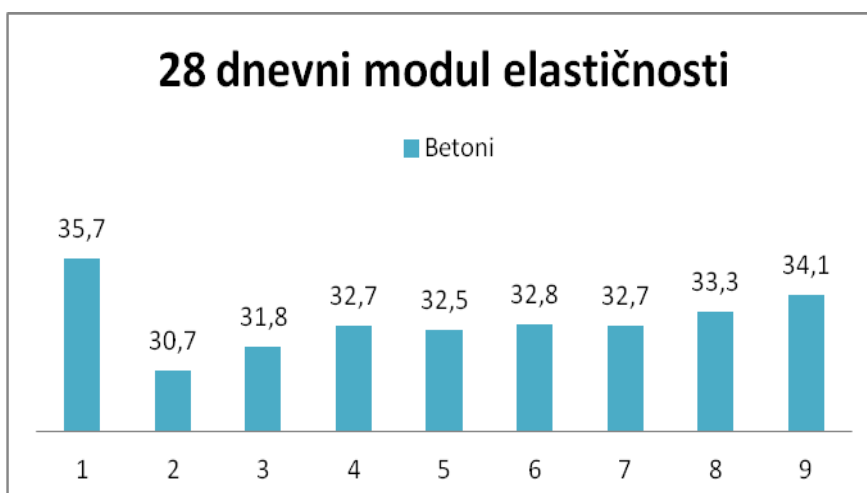
| | | <i>M1</i> | <i>M2</i> | <i>M3</i> | <i>M4</i> | <i>M5</i> | <i>M6</i> | <i>M7</i> | <i>M8</i> | <i>M9</i> |
|---|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Dinamički modul elastičnosti (GPa) | 7 dana | 32,6 | 28,6 | 28,5 | 31,2 | 31,3 | 30,9 | 31,1 | 30,9 | 32,5 |
| | 14 dana | 33,8 | 30,4 | 29,8 | 32,0 | 31,7 | 32,4 | 31,6 | 32,1 | 32,8 |
| | 28 dana | 35,7 | 30,7 | 31,8 | 32,7 | 32,5 | 32,8 | 32,7 | 33,3 | 34,1 |



Slika 6.30.: Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti nakon 7 dana



Slika 6.31.: Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti nakon 14 dana



Slika 6.32.: Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti nakon 28 dana

Na slikama 6.30. – 6.32. vidljivo je da se dinamički modul elastičnosti nakon 7 dana kreće se u rasponu od 28,5 do 32,6 GPa, nakon 14 dana se povećava na raspon od 29,8 do 33,8 GPa, a nakon 28 dana raspon mu je od 30,7 do 35,7 GPa. Najveći dinamički modul elastičnosti nakon 7, 14 i 28 dana ima beton M1, dok najmanji nakon imaju betoni M2 i M3. Iz čega je vidljivo da dinamički modul elastičnosti prati tlačnu čvrstoću betona.



Slika 6.33.: Uređaj za ispitivanje brzine ultrazvučnih valova

6.7.3. Ispitivanje kapilarnog upijanja

Nakon vlažne njege od 28 dana, uzorci su izvađeni iz komore te prirodno osušeni do stalne mase. Bočne stranice su zaštićene, a uzorci uronjeni u vodu visine do 5 mm. Mjerilo se upijanje, odnosno povećanje mase uzoraka nakon 2min, 4 min, 8 min, 15min, 30 min, 45 min, 60min, 4h i 24h. Povećanje masa prikazano je u tablici 6.18., a koeficijent upijanja u tablici 6.19. Na slikama 6.34 – 6.36. prikazana je ovisnost između kapilarnog upijanja. Koeficijent upijanja se izračuna po jednadžbi:

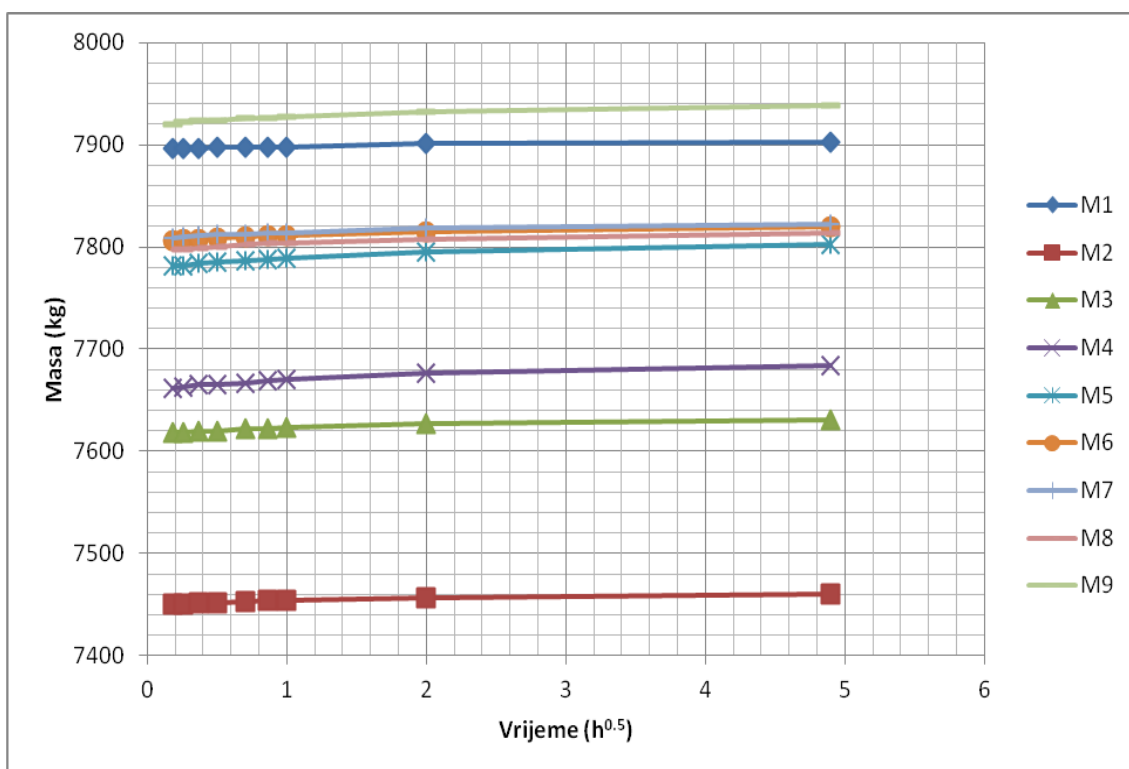
$$A = \frac{\Delta m_v}{\Delta \sqrt{t}} \left(\frac{kg}{m^2 h^{0.5}} \right)$$

Tablica 6.18.: Povećanje masa nakon vremena t

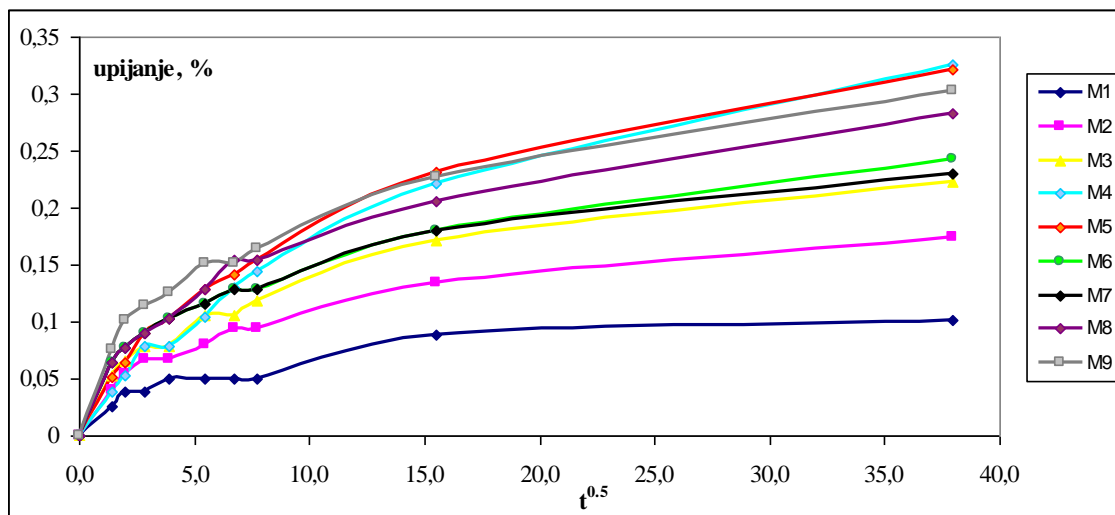
| Uzorci Mase | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| m_0 | 7894 | 7447 | 7614 | 7659 | 7777 | 7801 | 7804 | 7792 | 7914 |
| m_2 | 7896 | 7450 | 7618 | 7662 | 7781 | 7806 | 7809 | 7797 | 7920 |
| m_4 | 7897 | 7451 | 7619 | 7663 | 7782 | 7807 | 7810 | 7798 | 7922 |
| m_8 | 7897 | 7452 | 7620 | 7665 | 7784 | 7808 | 7811 | 7799 | 7923 |
| m_{15} | 7898 | 7452 | 7620 | 7665 | 7785 | 7809 | 7812 | 7800 | 7924 |
| m_{30} | 7898 | 7453 | 7622 | 7667 | 7787 | 7810 | 7813 | 7802 | 7926 |
| m_{45} | 7898 | 7454 | 7622 | 7669 | 7788 | 7811 | 7814 | 7804 | 7926 |
| m_{60} | 7898 | 7454 | 7623 | 7670 | 7789 | 7811 | 7814 | 7804 | 7927 |
| m_{4h} | 7901 | 7457 | 7627 | 7676 | 7795 | 7815 | 7818 | 7808 | 7932 |
| m_{24h} | 7902 | 7460 | 7631 | 7684 | 7802 | 7820 | 7822 | 7814 | 7938 |
| $D = m_{24h} - m_0$ | 8 | 13 | 17 | 25 | 25 | 19 | 18 | 22 | 24 |

Tablica 6.19.: Kapilarno upijanje A nakon vremena t

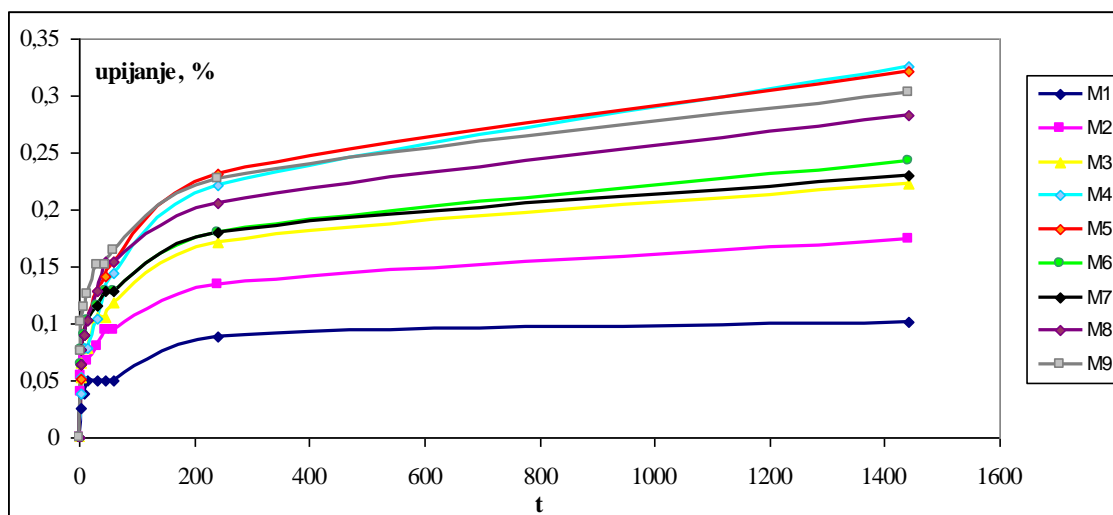
| Upijanja | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A₂ | 11,0 | 16,5 | 22,0 | 16,5 | 22,0 | 27,5 | 27,5 | 27,5 | 33,0 |
| A₄ | 11,6 | 15,5 | 19,3 | 15,5 | 19,3 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 30,9 |
| A₈ | 8,2 | 13,7 | 16,5 | 16,5 | 19,2 | 19,2 | 19,2 | 19,2 | 24,7 |
| A₁₅ | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 12,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 20,0 |
| A₃₀ | 5,7 | 8,5 | 11,3 | 11,3 | 14,1 | 12,7 | 12,7 | 14,1 | 17,0 |
| A₄₅ | 4,6 | 8,1 | 9,2 | 11,5 | 12,7 | 11,5 | 11,5 | 13,9 | 13,9 |
| A₆₀ | 4,0 | 7,0 | 9,0 | 11,0 | 12,0 | 10,0 | 10,0 | 12,0 | 13,0 |
| A_{4h} | 3,5 | 5,0 | 6,5 | 8,5 | 9,0 | 7,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 |
| A_{24h} | 1,6 | 2,7 | 3,5 | 5,1 | 5,1 | 3,9 | 3,7 | 4,5 | 4,9 |



Slika 6.34.: Ovisnost kapilarnog upijanja vode (m_v i \sqrt{t})



Slika 6.35.: Upijanje vode kao funkcija kvadratnog korijena vremena



Slika 6.36.: Upijanje vode kao funkcija vremena

Najmanja početna upijanja ima beton M1, koji ujedno ima i najmanja upijanja i nakon 24 sata. Najveća početna upijanja ima beton M9 koji sadrži silikatnu prašinu i kameno brašno i drugačiji aditiv u odnosu na M1. Najveća upijanja nakon 24 sata imaju betoni M4 i M5. Nema jasne poveznice između količine i vrste filera sa upijanjima. Npr. nakon 5 minuta najveća upijanja imali su betoni M5, M6, M7, M8 i M9, a nakon sat vremena najveće upijanje su imali su betoni M5, M8 i M9 (betoni sa najmanjom količinom šuta), dok su nakon 24 sata imale najveća upijanja M4, M5 i M9. Kako je vidljivo betoni bez šuta imaju najmanja upijanja (M1 i M2), slike 6.35. i 6.36.

7. ZAKLJUČAK

Samozbijajući beton, kao što sama riječ kaže je beton koji se sam zbija. Dakle, ugrađuje se u kalupe ili oplatu bez upotrebe vibratora uz izvanredne rezultate. Sam ispunjava prostor, zaobilazi prepreke i to bez segregacije. Ubrzava izgradnju, osigurava zbijanje betona na mjestima gdje je vibriranje otežano, te eliminira buku vibriranja.

Sastav samozbijajućeg betona je isti kao i kod običnog betona, međutim ipak postoji razlika u sastavu tih dviju vrsta, a to je što se u sastavu samozbijajućeg betona koristi veći sadržaj sitnih čestica, manje maksimalno zrno agregata ($D=20\text{mm}$) i obavezna primjena dodataka poput superplastifikatora i ponekad modifikatora viskoznosti.

Za ispunjavanje zahtijevanih svojstava, od kojih su najvažniji sposobnost punjenja, sposobnost prolaza i otpornost segregaciji, bitno je ostvariti viskozan mort koji potpuno obavija sva zrna agregata i osigurava stabilnost betonske mase dok ona ne očvrstne. Očvrstli beton ima svojstva visoke gustoće, homogenosti, visoke čvrstoće, trajnosti i svih ostalih svojstava običnog betona.

Prema nekim istraživanjima građevinski otpad čini oko 2/3 ukupnog otpada, a otprilike 80% građevinskog otpada, ovisno o njihovu porijeklu i sastavu, uz određene tehnologije recikliranja, može se ponovo upotrijebiti kao ekonomski vrijedna sekundarna sirovina za ponovnu upotrebu.

Već su napravljena neka istraživanja diljem svijeta, koja su spomenuta u ovom radu, koja se također baziraju na izradi betona sa recikliranim agregatom ili punilom, te izradi samozbijajućeg betona sa dodacima opeke, mramora, betonskog otpada i slično. Ta istraživanja su pokazala uspješno dobivanje kvalitetnog običnog i samozbijajućeg betona na bazi spomenutih dodataka.

U ovom radu izrađeno je 9 ispitnih mješavina samozbijajućeg betona.

Vrsta i količina cementa bila je za sve mješavine ista, količina sitnog i krupnog agregata je također bila ista, količina vode je regulirana ovisno o vizualnoj procjeni mješavine. Druga vrsta aditiva je bila upotrijebljena u prvoj mješavini. Ostalih 8 je imalo istu vrstu aditiva. Količina aditiva je bila ista u svim mješavinama. Ukupna količina praškastih dodataka je također ista, ali su dodaci dodavani u različitim vrstama i količinama: punilo recikliranog betona, silikatna prašina, leteći pepeo, punilo betonskog otpada („bijeli šut“), punilo betonskog otpada („crveni šut“) i kameno brašno.

Temeljem provedenih ispitivanja na mješavinama samozbijajućeg betona moguće je zaključiti:

- veća količina šuta smanjuje rasprostiranje betona,
- na vrijeme rasprostiranja u J-prstenu najlošije utječe kombinacija iste količine punila od recikliranog betona i šuta,
- vrijeme istjecanja i T_{500} ne slijede istu zakonitost za obje vrste šuta: kod crvenog šuta se povećava obradivost da povećanjem udjela šuta, a kod bijelog smanjuje,
- sve mješavine ne zaobilaze prepreke, te bi se kao takve teško ugradile,
- samljeveni šut ima veliku specifičnu površinu, što doprinosi ovakvim rezultatima,
- dodatak mljevenog šuta dao je prihvatljive rezultate tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti,
- svi betoni sa dodatkom šuta imaju veće upijanje u odnosu na betone bez ovakvih dodataka.

Konačan zaključak je, da se vrlo kvalitetan samozbijajući beton može napraviti sa dodacima betonskog otpada, što su pokazala dosadašnja istraživanja. Kod ovog rada, se trebalo još malo poraditi na recepturi, da bi se svi kriteriji zadovoljili. Korištenjem betonskog otpada u većim pogonima, ne samo da bi se uštedilo na prirodnim resursima, već bi se i smanjilo odlaganje betonskog otpada na deponijima.

8. LITERATURA

Popis literature:

- [1] Kordts, S.; Grube, H.: Controlling the workability properties of self compacting concrete used as ready-mixed concrete, 2002
- [2] http://www.cemex.hr/Userfiles/pdf/CX_KatalogBetona_2012_WEB_14062012.pdf
https://en.wikipedia.org/wiki/Petronas_Towers
- [3] <http://www.infobeton.com/clanci/scc.php>
- [4] Štirmer, N.; Banjad Pečur, I.: Projektiranje sastava samozbijajućeg betona, Građevinar 61, str. 321-329, Zagreb, 2009
- [5] Wurth, D.: Ovisnost sastava i svojstva samozbijajućeg betona, Građevinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [6] Štirmer, N.; Banjad Pečur, I.: Projektiranje sastava samozbijajućeg betona, Građevinar 61, str. 321-329, Zagreb, 2009.
- [7] <http://www.cemex.co.uk/city-of-manchester-stadium.aspx>
- [8] <http://www.irta.ir/find.php?item=1.142.348.en>
- [9] <http://www.e-architect.co.uk/london/london-aquatics-centre>
- [10] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zgura>
- [11] Alagušić, M.; Lavriv, F.: Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [12] Baloević, G.; Samozbijajući beton, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Split, 2009.
- [13] EFNARC: Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002.
- [14] Vranješ, L. K.; Samozbijajući lagani beton sa dodatkom punila od mljevene opeke, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2015.
- [15] http://www.controls-group.com/backend/prodotti/img_upload/img_big/1110241038100_1.jpg
- [16] http://www.controls-group.com/eng/concrete-testing-equipment/v_funnel-apparatus.php
- [17] http://www.controls-group.com/backend/prodotti/img_upload/img_big/1110241042110_2.jpg
- [18] http://www.controls-group.com/backend/prodotti/img_upload/img_big/1110241040100_1.jpg
- [19] http://www.controls-group.com/backend/prodotti/img_upload/img_big/1110251439110_2.jpg
- [20] R. Sri Ravindrarajah; Utilization of waste concrete for new construction

- [21] Er. Ranjodh Singh, Er.Rohin Kaushik, Er. Gurniwaz Singh: Study of Self Compacting Concrete Using Brick Dust and Marble Powder
- [22] Juradin S., and Grbeša K.: Influence of ground clay brick on the properties of fresh and hardened Self Compacting Lightweight Concrete (SCLC)
- [23] Husain A., and Assas M.M.: Utilization of demolished concrete waste for new construction
- [24] Shirazi E.K.; Marandi R.; Afshar N.; Alibabaie M.; Sooki A.: Reusing artificial stone waste in concrete as a filler of fine aggregates
- [25] Martin J.; Montero J.R.; Moreno F.; Piqueras Sala J.L.; Rubio M.C. : Feasibility analysis of the reuse of waste filler of bituminous mixtures for the production of self-compacting concrete
- [26] Juradin S.; Krstulović P.: Samozbijajući beton, Građevinski materijali II
- [27] <http://www.cemex.cz/>
- [28] <https://www.master-builders-solutions.basf.it/it-it/products/mastergleniumsky/751>
- [29] <http://www.kedobet.com/proizvodi/kedobet-sp102-1>
- [30] <http://catalogue.newchem.org/Uploads/635757497721933119MDS%20Microsit%20H20>
- [31] Mandić J: Primjena letećeg pepela u pripravi geopolimera, Diplomski rad, 2009
- [32] BIBM,CEMBUREAU,ERMCO,EFCA,EFNARC: The European Guidelines for Self Compacting Concrete, SCC 028
- [33] Vujica, M.; Samozbijajući ekološki održivi beton
- [34] Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC Self Compacting Concrete, ed. Skarendahl, Å.; Petersson, Ö., RILEM Publications S.A.R.L., the Publishing Company of RILEM, 2000
- [35] Bui, V.: Mix-Design of Self-Compacting Concrete –Overview and Description of Selected Methods, Ph.D. course - Rheology of Cementitious Materials – Self-Compacting - Concrete, DTU – Technical University of Denmark, Lingby, 19-24 August, 2002
- [36] Advanced Concrete Technology - Processes, ed. Newman, J.; Seng Choo, B., Elsevier, Ltd., 2003
- [37] Hansen, T.C.; Narud, H. : Recycled concrete and fly ash make calcium silicate bricks. Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 4, 1983, pp. 507-510.
- [38] Hansen, T.C.; Narud, H. : Recycled concrete and silica fume make calcium silicate bricks. Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 5, 1983, pp. 626-630.
- [39] Okamura H, Ozawa K, Ouchi M. Self-compacting concrete. Struct Concr 1986:3–17.