Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Ljubičić, Kristijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

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:123:524845

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U SPLITU FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Završni rad

Kristijan Ljubičić

Split, 2014

SVEUČILIŠTE U SPLITU FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Kristijan Ljubičić

Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Završni rad

Split, 2014

Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Sažetak:

Laki betoni imaju manju gustoću u odnosu na normalni beton. Smanjenje gustoće postiže se stvaranjem međuprostora između zrna krupnog agregata, stvaranjem pora u mortu ili upotrebom agregata sa velikim sadržajem pora. Najveće čvrstoće postižu lakoagregatni betoni s agregatom od ekspandirane pečene gline ili zgure, te s agregatom prirodnog porijekla. U eksperimentalnom dijelu rada napravljene su 2 različite mješavine samozbijajućeg lakog agregata s dodatkom mljvene opeke. Prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja u svježem i očvrslom stanju.

Ključne riječi:

Laki beton, liapor, obradivost, samozbijajući beton, kameno brašno

(Self compacting lightweight concrete with addition of minced brick)

Abstract:

Lightweight concrete has lower densitiy compared to normal concrete. Reducing desity is achieved by creating a space between the grains of course aggregate, creating voids in mortar or using the aggregates with larger content of pores. Lightweight aggregate concrete with expanded clay or slug, and aggregate of natural origin, achieve maximum strenght. In the experimental part of study, 2 different mixture of self compacting lightweight concrete have been made. Results obtained by testing properties of fresh and hardened concrete are presented and analysed.

Key words:

Lightweight concrete, liapor, concrete workability, self compacting concrete, rock flour

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ:	**PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	Kristijan Ljubičić
BROJ INDEKSA:	3937
KATEDRA:	**Katedra za** građevinske materijale
PREDMET:	Građevinski materijali

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti lake i lake samozbijajuće betone. U eksperimentalnom dijelu radu potrebno je izraditi mješavinu samozbijajućeg lakog betona sa dodatkom mljevene opeke kao i mješavinu sa dodatkom mljevene opeke i kamenog brašna, te je usporediti sa referentnom. Betonu je potrebno ispitati obradivost u svježem stanju metodom V-lijevka, razastiranjem, L-kutijom te J-prstenom. U očvrslom stanju ptrebno je na uzorcima starosti od 7 dana odrediti čvrstoću i dinamički modul elastičnosti. Dobivene rezultate potrebno je prikazati te analizirati.

U Splitu, 05.05.2014

Voditelj završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Sadržaj

1. Laki beton 1
1.1. Općenito o lakim betonima 1
1.2. Podjela lakih betona 1
1.3. Svojstva lakih betona 2
2. Vrste lakih betona 5
2.1. Betoni od lakog agregata 5
2.1.1. Prirodni laki agregati 5
2.1.2. Ekspandirani i pečeni (umjetni) laki agregati 6
2.1.3. Sekundarne sirovine 12
2.2. Betoni od jednozrnatog agregata 14
2.3. Ćelijasti betoni 15
2.3.1. Plinobeton 15
2.3.2. Pjenobeton 16
3. Dosadašnja istraživanja lakih betona 17
3.1. Čvrstoća i elastična svojstva strukturnih laganih betona 17
3.1.1. Materijali i metodologija 17
3.1.2. Rezultati ispitivanja 19
3.1.3. Zaključak 22
3.2. Utjecaj volumne frakcije i prirode finog lakog agregata na mehanička i termalna svojstva strukturalnog betona 23
3.2.1. Kemijski i mineraloški sastav lakog agregata 23
3.2.2. Fizička svojstva lakog agregata 23
3.2.3. Utjecaj LWA na svojstva betona 25
3.2.4. Zaključak 27
3.3. Početno ispitivanje mješavine betona s laganim agregatom 27
3.3.1. Podaci o LWAC 28
3.3.2. Formuliranje jednadžbe 28
3.3.3. Potvrđivanje postupka doziranja i zaključak 31
4. Eksperimentalni dio rada 32
4.1. Općenito o samozbijajućem betonu 32
4.2. Materijali 35
4.2.1. Cement 35

4.2.2. Agregat 36
4.2.3. Mljevena opeka 39
4.2.4. Kameno brašno 39
4.2.5. Superplastifikator FTF 39
4.3. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama 40
4.3.1. V-lijevak (V-funnel) 40
4.3.2. Metoda razastiranja (Slump-flow) 41
4.3.3. L-box test 42
4.3.4. J-prsten (J-ring) 43
4.3.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu 44
4.3.6. Ispitivanje čvrstoće na pritisak 44
4.3.7. Ispitivanje metodom ultrazvuka 45
4.4. Proračun sastava betona 46
4.5. Rezultati ispitivanja 47
4.5.1. Rezultati metode V-lijevka (V-funnel) 47
4.5.2. Rezultati metode razastiranja (Slump-flow) 47
4.5.3. Rezultati L-box testa 48
4.5.4. Rezultati J-prstena (J-ring) 49
4.5.5. Rezultati ispitivanja sadržaja zraka u svježem betonu 50
4.5.6. Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak 51
4.5.7. Rezultati ispitivanja metodom ultrazvuka 52
4.5.8. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti 52
5. Zaključak 53
Literatura 54

1. Laki betoni

1.1. Općenito o lakim betonima

Laki betoni spadaju u specijalne vrste betona. Volumna masa lakih betona najčešće iznosi 600 – 1500 kg/m^3, a iznimno može doseći 2000 kg/m^3, dok se volumna masa normalnog betona kreće oko 2400 – 2500 kg/m^3. Smanjenje volumne mase u odnosu na normalni beton postiže se:

- upotrebom agregata s velikim sadržajem pora,
- stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata,
- stvaranjem pora u mortu.

Povećanje pora ima negativan efekt na neka svojstva betona, pa tako laki betoni imaju manju čvrstoću i otpornost na habanje u odnosu na normalni beton. Ipak povećanje pora daje više prednosti lakim betonima kao što je manja volumna masa i bolja izolacijska svojstva, posebno kao toplinska izolacija. Trajnost lakih betona može biti ista kao i kod običnih. Laki betoni su skuplji, a proizvodnja, transport i sama ugradnja zahtijevaju više pažnje, upravo da bi se postigla zahtijevana kakvoća.

1.2. Podjela lakih betona

Prema načinu postizanja manje volumne mase, laki betoni se dijele na:

- lakoagregatni betoni,
- betoni od jednozrnatog agregata,
- ćelijasti betoni.

Prema namjeni lakoagregatni betoni se dijele na:

- konstrukcijski,
- konstrukcijsko - izolacijski,
- izolacijski.

1.3. Svojstva lakih betona

Volumna masa

Volumna masa lakih betona kreće se u veoma širokim granicama ovisno o vrsti lakog betona a može iznositi najviše 2000 kg/m^3. Za ispitivanje volumne mase najčešće se koriste uzorci oblika kocke brida 15 cm. Veličina volumne mase služi nam kao ocjena kvalitete lakog betona u odnosu na njegova bitno svojstva kao što su mehaničke otpornosti, koeficijent toplinske vodljivosti, otpornost na mraz.

Čvrstoća na pritisak

Čvrstoća na pritisak kod lakih betona se kreće od vrlo malih vrijednosti (manje od 1 MPa) pa sve do 60 MPa i više. Laki betoni sa čvrstoćom većom od 60 MPa nazivaju se laki betoni visokih čvrstoća. Čvrstoća na pritisak najviše ovisi o vrsti lakog agregata ali veliki utjecaj imaju i njegova volumna masa, količina i vrsta veziva, te vodocementni faktor. Čvrstoća na pritisak obično se ispituje na uzorcima oblika kocke brida 15 cm.

Povećanjem količine cementa kod lakih betona raste i čvrstoća na pritisak. Kod nekih betona kao što su laki betoni s perlitom i vermikulitom, taj je omjer linearan. Kod lakih betona s ekspandiranom glinom prirast čvrstoće je u početku brži, a zatim postaje sporiji. Kod lakih betona sa zgurom prirast čvrstoće je u početku sporiji, a zatim postaje brži. Ovisno o vrsti lakog betona i čvrstoće koju želimo postići, količina cementa iznosi približno od 150 do 550 kg/m^3.

Modul elastičnosti

Modul elastičnosti lakih betona u pravilu je niži od modula elastičnosti normalnih betona, tim više što su čvrstoća na pritisak i volumna masa manji. Modul elastičnosti lakih betona kreće se oko 20 GPa dok je kod normalnih betona oko 35 GPa.

Toplinska provodljivost

Laki beton su jako dobri toplinski izolatori. Smanjenjem volumne mase to svojstvo im se povećava. Najniže vrijednosti koeficijenata toplinske provodljivosti kod pojedinih izolacijskih lakih betona kreću se oko 0,05 W/mK, a kod izolacijsko – konstruktivnih i konstruktivnih lakih betona koeficijent se kreće između 0,25 i 0,85 W/mK. Te vrijednosti

su puno manje nego kod običnih betona s kamenim agregatom, volumne mase oko 2400 kg/m^3, koji imaju koeficijent toplinske provodljivosti približno od 1,05 do 1,25 W/mK.

Zvučna izolacija

Konstrukcije od lakih betona u odnosu na normalni beton pokazale su se kao bolji izolatori s obzirom na zvuk koji se širi zrakom te slabiji kao slabiji izolatori s obzirom na zvuk koji se prenosi udarom. Sposobnost zvučne izolacije lakih betona u najvećoj mjeri ovisi o njegovoj volumnoj masi.

Puzanje

Puzanje lakih betona je obično isto ili nešto manje kao i kod normalnih betona iste čvrstoće. Puzanje lakih betona ovisi u najvećoj mjeri o odnosu stvarne veličine pritiska i čvrstoće na pritisak, te o vrsti agregata i uvjetima okoline sredine.

Skupljanje i bubrenje

Skupljanje normalnog i lakog betona nastaje uslijed gubitka vode sadržane u betonu, odnosno sušenjem betona. Skupljanje na zraku u prvim mjesecima se odvija brzo, a zatim sve sporije. Na skupljanje mogu utjecati količina vode, količina i vrsta veziva, a osobito velik utjecaj ima vrsta i kvaliteta agregata. Veličina skupljanja normalnog betona s normalnim utroškom cementa iznosi oko 0,6 mm/m, dok se kod lakih betona kreće od 0,8 do 0,9 mm/m.

Bubrenje u očvrslom lakom betonu nastaje zbog povećanja razdvajajućeg utjecaja vode u prostoru između zrna i finih kapilara. Bubrenje lakih betona najčešće se kreće između 0,1 i 0,15 mm/m, a može doseći veličinu od 0,4 mm/m.

Vodonepropusnost i upijanje vode

Upijanje vode lakih betona je veće nego kod normalnih betona. Ono u prvom redu ovisi o vrsti i veličini pora između zrna agregata na što se može utjecati izborom sastava smjese za izradu lakog betona. Volumna masa također ima utjecaj na upijanje vode tako što je ona veća manje je upijanje i obratno.

Vodonepropusnost se određuje kod konstruktivnih lakih betona ali po potrebi se može ispitati i na ostalim vrstama. Brzina filtracije vode smanjuje se s povećanjem čvrstoće na pritisak i volumne mase lakog betona.

Otpornost na mraz

Iako laki betoni imaju relativno visoko upijanje vode to ne utječe negativno na njihovu otpornost na mraz. Dodaci koji izazivaju oblikovanje zračnih pora kod lakih betona povećavanju otpornost na mraz. Otpornost na mraz značajna je samo kod konstruktivnih betona dok se kod ostali pokazuje zadovoljavajućim.

Otpornost na djelovanje požara

Laki betoni su vrlo dobri izolatori i imaju znatno manju toplinsku provodljivosti pa su stoga i znatno otporniji na djelovanje požara u odnosu na normalne betone. Otpornost prema požaru u najvećoj mjeri ovisi o svojstvima agregata. Najotporniji su porozni laki betoni, zatim gusti laki betoni, te laki betoni velike volumne mase.

Korozija armature u lakom betonu

Korozija armature u lakom betonu nastaje u slučaju lakog betona vrlo male gustoće uz prisutnost vlažnosti određenog intenziteta. Korozija najčešće nastaje ako se radi o armiranom lakom betonu koji je nedovoljno postojan u određenoj agresivnoj sredini ili lakom betonu koji već u svom sastavu sadrži određene štetne primjese. Korozija je najintenzivnija pri relativnoj vlažnosti od 80 - 90%. Opasnost od korozije kod lakih betona ovisi u najvećoj mjeri o gustoći betona. Stoga su gusti laki betoni otporniji na koroziju od lakih betona koji su izrazito porozni ali nijedna vrsta lakog betona ne štiti trajno armaturu od korozije. Ako se radi o lakim betonima manje gustoće, kao zaštita od korozije preporučuje se povećanje zaštitnog sloja betona. Osim toga kao zaštite koriste se i specijalni dodaci koji usporavaju koroziju, te razni zaštitni premazi armature. Utjecaj veziva na koroziju armature isti je kao i kod normalnih betona.

2. Vrste lakih betona

2.1. Betoni od lakog agregata

Za izradu lakog betona mogu se upotrijebiti agregati prirodnog porijekla i umjetni agregati. Svi laki agregati imaju veliko upijanje vode. Prilikom miješanja betona agregat ili upija ili otpušta vodu, ovisno o vlažnosti kojom je ušao u miješalicu. Zbog toga nije moguće unaprijed u recepturi odrediti potrebnu količinu vode za pripremu betona, već se ona mora prilagođavati pri miješanju, da beton postigne propisanu konzistenciju.

Budući da zrna agregata sadrže i zatvorene šupljine, dio zrna ima manju volumnu masu od paste pa pri miješanju nastaje segregacija tipična za laki beton: takva da zrna isplivaju na površinu betona. Međutim, ova pojava karakterizira nestabilan laki beton, tj. beton koji ima preveliko izlučivanje vode. Ako se količina vode za pripremu betona ograniči tako da se na kraju dobije stabilan beton, takav beton je stabilan i pri miješanju, a opisana segregacija je minimalna.

2.1.1. Prirodni laki agregati

Prirodni laki agregati mogu biti sedimentnog ili vulkanskog porijekla, a njihova osnovna karakteristika je visok stupanj poroznosti.

Agregati sedimentnog porijekla spadaju u sedimentne stijene i pretežito su silikatnog sastava. Imaju visoku poroznost, što znači da sadrže veliku količinu pora i šupljina, pa stoga imaju malu volumnu masu. Iz tog razloga su pogodni za izradu lakog betona male čvrstoće koji služi isključivo kao izolacijski beton. Također, zbog svoje poroznosti ova vrsta agregata zahtijeva mnogo vode prilikom izrade betona. Treba obratiti posebnu pažnju pri izradi lakog betona kako ne bi došlo do velikog skupljanja i stvaranja pukotina. Najpoznatija vrsta ovog agregata su dijatomiti. Dijatomiti u prahu, imaju zapreminsku težinu 120 – 550 kg/m^3, a poroznost 80-85%, sadržaj $Si(OH)_4$, 65 – 90 %. Nalazišta ovog materijala su u Francuskoj i Alžiru. Osobine dijatomita znatno se poboljšavaju termičkom obradom i u takvom stanju je pogodniji za izradu lakih betona. Međutim, betoni sa dijatomitom nemaju veliku primjenu.

Predstavnici agregata vulkanskog porijekla su plovućac i prirodni porozni pucolani koji se međusobno razlikuju po strukturi i sastavu.

Plovućac ima strukturu s porama i veličinu zrna 1 – 40 mm, a nastaje pri brzom hlađenju lave. Smanjenje poroznosti kod plovućca se postiže pečenjem pri čemu se na površini zrna stvara opna koja smanjuje poroznost, a povećava čvrstoću i težinu. Plovućac pretežito sadrži SiO_2. Od prirodnih poroznih agregata pored pečenog dijatomita, plovućac predstavlja najbolji agregat. Plovućac koji je podvrgnut termičkoj obradi ima zapreminsku težinu u komadima 1460 – 1660 kg/m^3, zapreminsku težinu u prahu 700 – 800 kg/m^3, upijanje vode 29 – 43 %

Pucolani nastaju laganim hlađenjem lave i sa velikim sadržajem uključenih plinova. Pore kod pucolana su znatno krupnije i nepravilnijeg oblika nego kod plovućca. Zato je plovućac u odnosu na pucolane porozniji materijal sa manjom čvrstoćom. Pucolani imaju volumnu masu 700 – 1200 kg/m^3, zavisno od krupnoće zrna. Imaju ćelijastu strukturu i pretežito sadrže SiO_2 i Al_2O_3.

Slika 2.1. *Plovućac* [4]

2.1.2. Ekspandirani i pečeni (umjetni) laki agregati

Umjetni agregati dobivaju se žarenjem, sinteriranjem ili ekspandiranjem materijala. U tehnološkom procesu proizvodnje, zrna nekih agregata formiraju se kuglice ili sličan oblik. Druge vrste agregata u tehnološkom procesu dobiju neregularan oblik. Neregularan oblik može nastati i drobljenjem krupnijih zrna, radi dobivanja željene granulacije. U nastavku su opisane neke vrste ekspandiranih i pečenih agregata.

Perlit

Perlit je stijena vulkanskog porijekla, silikatnog sastava, s kemijski vezanom vodom. Umjesto perlita može se upotrijebiti i svaka druga staklasta vulkanska stijena koja sadrži kemijsku vezanu vodu. Zagrijavanjem na temperaturu 700 - 1200 °C, isparavanjem vode dobiva se ekspandirani perlit s velikim sadržajem zatvorenih pora koje formiraju ćelijastu strukturu. Prije zagrijavanja prirodni materijal se drobi i na taj način dobiva željena granulacija.

Volumna masa zrna iznosi 100 – 150 kg/m^3. Betoni od perlita imaju vrlo malu gustoću, vrlo malu čvrstoću, veliko skupljanje i upijanje vlage. Upravo zbog toga nije pogodan za izradu nosivih elemenata i koristi se isključivo kao agregat za izolacijski beton.

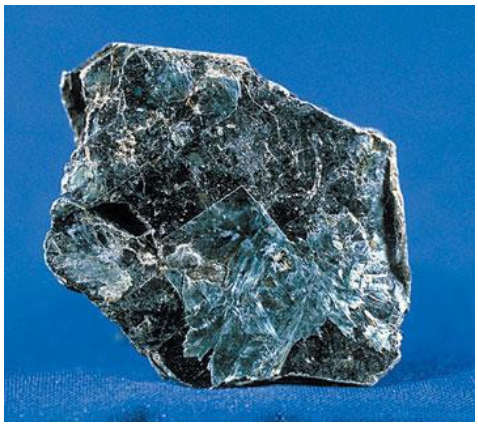
Perlita na ovim područjima nema, a najveća nalazišta su na području bivšeg SSSR-a, SAD-u, Italiji i Grčkoj.

Slika 2.2. *Ekspandirani perlit* [14]

Vermikulit

Stijena vermikulita nastaje u prirodi iz liskuna. Prirodni materijal se drobi na željenu granulaciju i zagrijava na 650 – 1000 °C, pri čemu ekspandira čak do 30 puta. Ekspanzija nastaje zbog isparavanja kemijski vezane vode.

Volumna masa iznosi 100 – 300 kg/m^3. Zahvaljujući svojoj poroznoj strukturi, unutar koje se nalaze zračni proslojci, vermikulit ima značajna toplinska i zvučna izolacijska svojstva, te protupožara. Nalazišta vermikulita nalaze se u Rusiji, Brazilu, Kini i Južnoj Africi.



Slika 2.3. *Vermikulit* [15]

Ekspandirani polimerni materijal

Propuhivanjem polimernog materijala zrakom, na odgovarajućoj temperaturi ili u kombinaciji s dodatkom sredstava za pjenjenje, stvaraju se kuglasta zrna veličine do 8 mm s velikim sadržajem ekspandiranog polistirena. Ovaj agregat koristi se za izradu izolacijskih ploča i razne ambalaže. Specijalnim postupkom drobljenja iskorištene ambalaže ili sličnih otpadaka mogu se također dobiti zrna neregularnog oblika koja se koriste kao laki agregat.

Volumna masa zrna je veoma mala, ispod 100 kg/m^3.

Slika 2.4. *Ekspandirani polimerni materijal* [18]

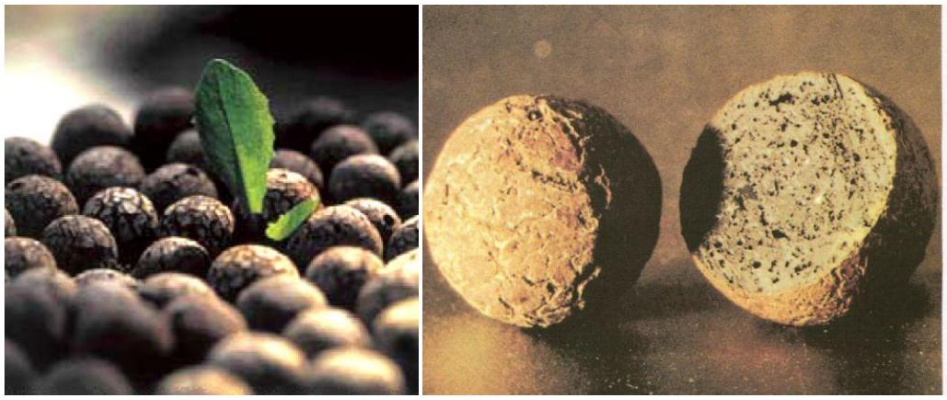
Beton od granuliranog ekspandiranog polistirena (EPS - beton), koji se također naziva stiropornim betonom, vrlo se jednostavno proizvodi. Za njegovu pripremu bitna je upotreba pravog sastava i dodataka koji sprečavaju segregaciju svježe betonske mase odnosno izlučivanje lakih stiropornih granula iz mješavine svježeg betona. Ovakvi laki betoni proizvode se s vrlo širokim rasponom gustoća od 600 do 1600 kg/m^3, i odgovarajućim izolacijskim i konstruktivnim svojstvima.

Slika 2.5. *EPS-beton* [19]

Liapor

Prirodno čista i oko 180 mil. godina stara glina iz razdolja lias, ere jura, kvalitetna je sirovina za liapor proizvode. U liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi od 1100 – 1200 °C. Pri tome sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju. U tehnički usavršenom procesu vrlo točno se kontroliraju specifična težina, veličina i tvrdoća kuglice. Tako nastaju kuglice sa zatvorenom strukturom pora, porozne na zrak, potrebne čvrstoće, s visokim svojstvima kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline. Liapor proizvodi su nezapaljiv i negoriv građevni materijal, koji se prema standardu DIN 4102 svrstava u najviši požarni razred A1, s neograničenim vijekom trajanja.

Zbog kemijsko – mineraloškog sastava liapor sirove gline i zadanih uvjeta u proizvodnji, liapor kuglice su otporne na vatru, smrzavanje, upijanje vode, lužine i kiseline te na pritisak. Liapor lagani agregati upotrebljavaju se izradu nearmiranih i armiranih laganih betona, kao i za izradu prednapetih laganih betona.



Slika 2.6. *Liapor* [4]

Ekspandirana glina

Sirovina za proizvodnju je glina ili škriljac s visokim sadržajem SiO_2. Miješanjem različitih vrsta sirovina dobiva se optimalan sastav. Sirovina se miješa sa vodom, gnječi i homogenizira, te istiskuje kroz usnike različitih promjera. Pri tome se sjecka na kratke valjke koji se u posebnom uređaju zaobljavaju u granule i ispuštaju u rotacijsku peć posebnog tipa. Pečenje se vrši na temperaturi nešto ispod točke sinteriranja, oko 1200 °C. Prilikom pečenja granule povećavaju volumen radi isparavanja vode i stvaranja velike količine zatvorenih pora. Na površini granula stvara se tvrda staklasta opna, bez šupljina, dok je unutrašnjost veoma porozna.

Volumna masa zrna varira u širokim granicama, što ovisi i vrsti sirovine i tehnološkom procesu proizvodnje, a iznosi 400 – 600 kg/m^3. Ekspandirana granulirana glina dolazi na tržište najčešće po nazivom glinopor ili keramzit.

Slika 2.7. *glinopor ili kermazit* [4]

Toplinsko - izolacijski laki beton

Ova vrsta lakoagregatnog betona najčešće se izrađuje sa otvorenom strukturom, te se može izraditi od jednakozrnatog agregata ili sa dvije frakcije agregata, kod koga je međuzrnata poroznost nepotpuno ispunjena vezivnim mortom. Najčešće je volumen cementnog morta manji od 10 % od volumena betona. Zbog toga ova vrsta lakoagregatnog betona ima malu mehaničku čvrstoću koja zavisi o čvrstoći na smicanje vezivnog morta. Lom nastaje između zrna agregata.

Kada bi se se izradio toplinsko – izolacijski laki beton sa agregatom od ekspandirane gline zatvorene strukture, tada bi se taj laki agregat moga kombinirati sa drugim

materijalima manje volumne mase od upotrebljene frakcije agregata. Cementni mort se može eventualno izraditi sa ekspandiranim perlitom ili se može zamjeniti pjenobetonom, tj. pjenocementom.

Prilikom pripreme betonske mješavine toplinsko – izolacijskog lakog betona potrebno je prethodno navlažiti agregat, kako bi kasnije bilo dovoljno vlage za hidrataciju cementa. Agregat se stoga može prskati ili potapati u vodu.

Redoslijed doziranja komponentnog materijala je veoma važan dio kod pripravljanja lakoagregatnih betona, kao i dodavanje plastifikatora i sredstava za reguliranje konzistencije svježe mješavine betona.

Način ugrađivanja također može biti dosta raznovrstan i mora se definirati. U odnosu na sastav ne može se dati samo jedan koji bi bio tipičan za sve toplinsko – izolacijske lake betone sa agregatom od ekspandirane gline, kao što ne postoji samo jedan način ugrađivanja ili pak njegovanja.

Konstrukcijsko - izolacijski laki beton

Ova vrsta lakoagregatnog betona predstavlja prijelaz između toplinsko – izolacijskog i konstrukcijskog lakog betona. Može se izrađivati sa sve tri strukture ali najčešća je ipak djelomično zatvorena struktura sa količinom cementnog morta koja se kreće od 10 – 20 % od volumena betona. U ovom slučaju lom nastaje i kroz zrno agregata i kroz vezivni mort jer je čvrstoća agregata i vezivnog morta je uglavnom izjednačena.

Kod izrade konstrukcijsko - izolacijskog lakog beton može se kombinirati agregat od ekspandirane gline ili čak teški agregat. Isto tako moguća je kombinirati i drugim materijalima kao što je ekspandirani perlit.

Konstrukcijski laki beton

Konstrukcijski lako beton se uglavnom izrađuje sa zatvorenom strukturom. U tom slučaju količina vezivnog morta obično veća od 40% od volumena betona. Budući da je čvrstoća zrna agregata manja od čvrstoće vezivnog morta, lom nastaje kroz zrno agregata.

Poboljšanje mehaničke čvrstoće ove vrste lakih betona, osim povećanja količine i marke cementa te načinom ugrađivanja, može se postići i povećanjem fine frakcije, te djelomičnom ili potpunom zamjenom fine frakcije kvarcnim pijeskom.

Na sastav utječu i količina cementa, klasa betona, zatim način ugrađivanja i njegovanja. Svi betoni moraju ispuniti osnovne zahtjeve u pogledu čvrstoće na pritisak i koeficijenta toplinske vodljivosti.

2.1.3. Sekundarne sirovine

Kao laki agregat za betone mogu se upotrebljavati još i sekundarne sirovine. Uporaba sekundarnih sirovina je ekonomična i efikasna, jer svi otpaci koji nastaju pri termičkoj obradi kao sporedni proizvodi imaju više ili manje sličan kemijski sastav kao i prirodni porozni pucolani. Neki od ovih agregata koriste se poslije jednostavne prerade (drobljenje i sortiranje), dok drugi zahtijevaju dopunsku termičku obradu. U sekundarne sirovine spadaju:

- ložišna zgura,
- kristalna zgura,
- granulirana zgura,
- leteći pepeo iz termoelektrana.

Ložišna zgura

Ložišna zgura predstavlja ostatak nakon izgaranja ugljena ili koksa. Svojstva zgure ovise o vrsti goriva, konstrukciji peći i temperaturi izgaranja. Ohlađena zgura neizbježno sadrži neizgorene čestice i različite sumporne spojeve koji potječu od goriva. Neizgorene čestice i sumporni spojevi mogu povećati volumen u kontaktu s vlagom iz zraka ili vodom i izazvati razaranje zrna agregata ili betona u kojemu se nalaze. Isto tako mogu izazvati sulfatnu koroziju i slične štetne efekte nakon reakcije s cementom u cementnom kamenu pa je zbog toga sadržaj SO_3 u zguri ograničen na 1%. Ovi efekti mogu, s vremenom, izazvati potpuno raspadanje betona. Ložišna zgura smije se upotrijebiti za proizvodnju agregata za beton tek nakon temeljnog ispitivanja.

Volumna masa ložišne zgure iznosi 600 – 1500 kg/m^3. Prilično je rasprostranjena na ovim područjima te se koristi za izradu nearmiranog lakog betona i nearmiranih prefabriciranih betonskih blokova od lakog betona.

Kristalna zgura

Kristalna zgura dobiva se sporim hlađenjem zgure visokih peći: Rastopljena zgura izlijeva se iz peći u sloj određene debljine. Pri hlađenju, plinovi, koji su prisutni u zguri, ostavljaju šupljine veličine 0,2 – 0,4 mm. Šupljine su veće u donjem dijelu sloja. Volumna masa materijala iznosi 500 – 1700 kg/m^3, zavisno o količini šupljina. Agregat za beton dobiva se drobljenjem ohlađene zgure.

Granulirana zgura

Granulirana zgura nastaje ako se zgura visokih peći naglo hladi potapanjem u vodu. Dobivaju se zrna s velikim sadržajem pora koje nastaju ekspandiranjem vode koja se miješa sa zgurom. Za proizvodnju agregata najčešće se koristi kisela zgura. Bazičnu zguru ekonomičnije je upotrijebiti kao dodatak cementu.

Zapreminska težina granulirane zgure se kreće u širokim granicama, najčešće između 500 i 1300 kg/m^3. Upijanje vode iznosi oko 5 – 23 %. Granulirane zgure ima u znatnim količinama na ovim prostorima i mnogo se koristi za izradu raznih blokova za zidanje, kao dodatak pri izradi određenih vrsta cementa, i dr.

Ekspandirana granulirana zgura

Ako se mlaz rastopljene zgure naglo hladi mlazovima vode, stvaraju se granule s velikim sadržaje pora. Pore nastaju isparavanjem kapljica vode koje se miješaju s mlazom zgure. Volumna masa granula zgure iznosi 300 – 750 kg/m^3, a čvrstoća im je relativno niska.

Leteći pepeo iz termoelektrana

Leteći pepeo nastaje kao sporedni produkt ugljena u termoelektranama, a hvata se elektrofilterima na dimnjacima termoelektrana. Mješanjem s 20 – 25% vode dobivaju se granule koje se zatim peku na temperaturi nešto ispod točke sinteriranja. Prilikom pečenja izgaraju zaostale neizgorjele čestice iz pepela, što stvara veliku količinu pora.

Leteći pepeo za izradu lakog agregata ne smije sadržavati preveliku količinu sumpora ili drugih štetnih sastojaka. Umjesto letećeg pepela mogu se upotrijebiti i mljeveni prirodni poculani. Volumna masa ovog agregata iznosi oko 600 do 900 kg/m^3.

2.2. Betoni od jednozrnatog agregata

Laki betoni od jednakozrnazog agregata dobivaju se izostavljanjem sitne frakcije agregata i uporabom praktično jedne frakcije nominalno iste veličine zrna. Jedna normalna frakcija kamenog agregata, kao na primjer 4 – 8 mm ima volumnu koncentraciju agregata 0.55 – 0.60. Zbog tako male volumne koncentracije agregata, u gotovom betonu ostaje mnogo šupljina. U betonu su zrna obavijena cementnom pastom debljine cca 1.3 mm, pa između zrna ostaju velike šupljine. Za pripremu betona može se upotrijebiti i više od jedne frakcije agregata, ali se tada dobije manji sadržaj pora i veća volumna masa betona. Zrna agregata ne bi trebala biti veća od 25 – 30 mm. Pogodna je veličina kad je najkrupnije zrno dvaput veće od najsitnijeg. Ovakav beton može se izrađivati i od lakog agregata.

Količina cementa za pripremu betona treba biti najmanje 250 kg/m^3. Potrebno je pripaziti na količinu cementa jer višak ugrađenog cementa smanjuje broj šupljina.

Beton od jednozrnatog agregata je otporan na mraz jer ima veoma malu količinu kapilarnih pora. Ovakav beton dobro apsorbira zvuk ako mu se površina ne zagladi.

Slika 2.8. *Beton od jednozrnatog agregata* [20]

2.3. Ćelijasti betoni

Ćelijasti betoni su vrlo lagani betoni u čiju je masu prije stvrdnjavanja utisnut zrak ili je kemijskim putem proizveden plin čiji se mjehurići šire u betonu. Ćelijasti betoni na bazi portland i metalurškog cementa čija je struktura porozna mogu se dobiti ako se čistoj cementnoj pasti dodaju aktivni ili inertni fini agregati kao što su: pijesak, kvarc, pečena glina, škriljac, leteći pepeo, pucolan, itd.

Podjela ćelijastih betona prema načinu dobivanja ćelijaste strukture je sljedeća:

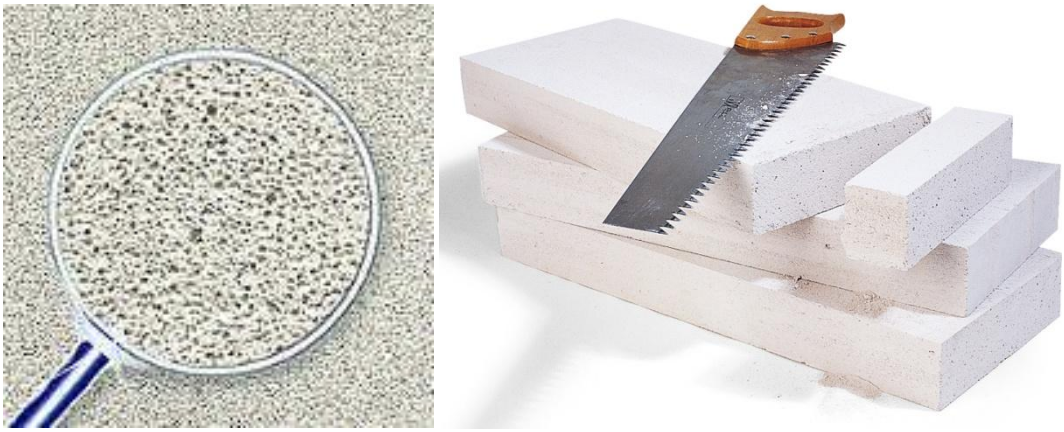
- plinobetoni
- pjenobetoni

Čvrstoća na pritisak ćelijastih betona najčešće se kreće od 3,5 do 10 MPa, a volumna masa od 600 do 1200 kg/m^3. Imaju dobra toplinsko izolacijska svojstva. Upotrebljavaju se za izradu blokova za zidanje, prefabriciranih elemenata i panela za pregradne zidove, ispune među glavnim konstruktivnim elementima i slično.

2.3.1. Plinobeton

Plinobeton se proizvodi u autoklavima, na visokoj temperaturi i pritisku. Upotrebljava se za tvorničku izradu blokova za zidanje i prefabriciranih elemenata. Sirovine za proizvodnju su cement, vapno, leteći pepeo, sitno samljeveni kvarcni pijesak i dodatak za ekspanziju. Dodatak stvara veliku količinu mjehurića plina čime nastaje ćelijasta struktura u još svježem betonu. Ako je dodatak aluminijski prah, u svježem betonu se razvija vodik te gotovi proizvod nosi komercijalni naziv siporeks. Ako se kao dodatak upotrijebi kalcijev karbid (Ca_2C), u svježem betonu razvija se acetilen te takav gotovi proizvod nosi naziv ytong.

Siporeks ima poroznu strukturu sa zatvorenim porama. Time je upijanje vode i vlage svedeno na veoma malu mjeru. Upravo zbog toga ovo je materijal koji je otporan na mraz, a također predstavlja i izvrstan izolacijski materijal koji ima 6-8 puta bolja izolacijska svojstva od običnog betona. Skupljanje siporeksa je znatno i kreće se u granicama 0,1 do 0,5 mm/m. Siporeks je nezapaljiv materijal, te se veoma jednostavno obrađuje različitim alatima, čak laganije i jednostavnije nego drvo.



Slika 2.9. *Plinobeton* [21]

2.3.2. Pjenobeton

Sirovine za proizvodnju pjenobetona su cement i sitni pijesak, te eventualno sitni laki agregat. Ćelijasta struktura dobiva se dodavanjem sredstava za pjenjenje u miješalicu. Ova vrsta lakog betona malo se upotrebljavala. Pored segregacije pjene i nekih problema koji se javljaju pri proizvodnji betona od lakog agregata, sadržaj pora je varirao, a nije se mogla postići ni njihova jednolična distribucija. Osim toga, oblik, veličina i granulometrijski sastav pora često nisu bili povoljni za postizanje čvrstoće i trajnosti pjenobetona.

Međutim, pojavom novih tehnologija za proizvodnju sredstava za pjenjenje i tehnologija pripreme betona, većina navedenih problema uspješno je riješena, te je sada moguće proizvoditi pjenobeton u širokom rasponu volumnih masa od 400 do 2000 kg/m^3. Osim u industrijskim uvjetima danas se može pjenobeton jednostavno proizvoditi na gradilištu i ugrađivati u oplatu ili prostor zadanog oblika.

Slika 2.10. *Pjenobeton* [22]

3. Dosadašnja istraživanja lakih betona

Posljednjih godina se laki betoni visokih čvrstoća koriste u istoj mjeri kao i normalni betoni. Proizvodnja ovih betona je napredovala i zbog sve bržeg razvoja tehnologije. Podaci o mehaničkim svojstvima lakih betona su jako bitno kod primjene lakih beton kao konstruktivnih betona. Također je važno poznavati svojstva agregata i ostalih sastojaka koji se koriste za izradu lakih betona.

Mnogi autori su u svojim radovima objavili rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava lakih betona kao i svojstava agregata, ali još uvijek se ne zna dovoljno o te su potrebna dodatna istraživanja na ovom području. Tako su Niyazi Ugur Kockal i Turan Izturan u svome radu istraživali čvrstoću i elastična svojstva strukturalnih lakih betona. L.H.Nyugen, A.L.Beaucour, S.Ortola, A.Noumowé su istraživali utjecaj volumne frakcije i prirode finog lakog agregata na mehanička i termalna svojstva strukturalnog betona. Keun-Hyeok Yang, Gwang-Hee Kim i Yong-Hwa Choi u svojoj studiji ispituju početnu mješavinu betona sa lakim agregatom. U nastavku su detaljnije opisani navedeni radovi.

3.1. Čvrstoća i elastična svojstva strukturnih laganih betona

Niyazi Ugur Kockal i Turan Izturan u svojoj studiji predstavljaju utjecaj karakteristika četiri agregatna tipa (dva od sinteriranog letećeg pepela, hladno prešanog laganog letećeg pepela i vapnenca) na čvrstoću i elastična svojstava betonske smjese. Različiti modeli su također korišteni kako bi se predvidjela čvrstoća i vrijednost modula elastičnosti betona.

3.1.1. Materijali i metodologija

Svojstva materijala korištenih u proizvodnji laganih betona

Kemijski sastav Portland cementa (CEM I 42,5 R), pepeo, bentonit, stakleni prah i silicij su izloženi u tablici 3.1.. Fizikalna svojstva, rezultati čvrstoće i aktivnosti cementa i letećeg pepela određeni su prema TS 639. Između 18 različitih laganih agregata od sinteriranog letećeg pepela, proizvedenih u ovom istraživačkom projektu, dva agregata(agregat koji sadrži 10% betonita sinteriran na 1200 C i agregat koji sadrži 10% staklenog praha sinteriran na 1200 C) su izabrana zbog njihove niže gustoće i veće čvrstoće. Agregat od hladno prešanog laganog letećeg pepela (CB) i agregat od lomljenog vapnenca (NW) su također korišteni u izradi betona za usporedbu njihovih svojstava.

Tablica 3.1. *Kemijski sastav cementa (C), pepela (FA), bentonit (BN), stakleni prah (GP) i silicij (SF)(% masenog udjela)* [6]

Oxide (%)	C	FA	BN	GP	SF
SiO_2	20.55	59.00	57.84	70.62	94.12
Al_2O_3	4.78	19.58	13.77	1.38	0.57
Fe_2O_3	3.64	7.23	6.14	0.82	0.55
CaO	63.94	0.54	3.75	8.75	0.50
MgO	1.50	4.64	3.04	3.54	1.30
SO_3	2.77	0.69	1.34	1.85	0.42
Na_2O	0.25	0.48	2.80	10.85	0.54
K_2O	0.77	5.95	2.80	1.53	1.75
Cl^-	0.035	0.011	0.004	0.003	0.0049
Loss on ignition	1.24	0.49	8.40	0.12	0.19
$CaCO_3 + MgCO_3$	–	–	6.50	0.75	–
Insoluble residue	1.36	–	–	–	–
Free CaO	1.25	–	–	–	–
Specific gravity (g/cm^3)	3.16	2.06	2.40	2.50	2.28

Ispitivanje provedeno na agregatima

Kako bi se utvrdila čvrstoća laganih agregata, pojedinačne čestice su smještene između paralelnih ploča i lomljene dijametralno. Najmanje 20 kuglica promjera oko 10mm je testirano za određivanje prosječne čvrstoće na drobljenje za svaku vrstu agregata. Struktura pora je procijenjena prema živinoj porozimetriji s tlakom do 220 MPa. Specifične težine i apsorpcija vode finih i grubih agregata su određeni u skladu s ASTM C 128 i ASTM C127. Specifične težine prirodnog pijeska i lomljenog pijeska su 2,62 i 2,63. Krupni agregat je testiran u peći, u suhom stanju kako bi se utvrdila jedinica težine i sadržaj pora. Tablica 3.2. prikazuje rezultate ispitivanja agregata koji se koriste u proizvodnji betona.

Tablica 3.2. *Karakteristike agregata* [6]

Svojstva	Agregati			
	CB	10B1200	10G1200	NW
Specifična gustoća zasićenog, površinski suhog agregata	1,63	1,57	1,60	2,71
Nasipna specifična gustoća	1,89	1,58	1,60	2,71
Specifična gustoća potpuno suhog agregata	1,30	1,56	1,59	2,70
28 - satna apsorpcija vode (%)	25,5	0,7	0,7	0,8
Ukupna poroznost (%)	31,1	8,4	6,2	-
Kritični promjer pore (nm)	398,4	28,03	12,49	-
Volumenska težina zbijenog agregata(kg/m^3)	842	993	999	1537
Težina rastresenog agregata (kg/m^3)	789	933	936	1433
Šupljine (%) u rastresenom agregatu	39,2	40,1	41,0	46,8
Šupljine (%) u zbijenom agregatu	35,1	36,2	37,0	43,0
Vrijednost lomljenja agregata (%)	35	38	30	23
Čvrstoća lomljenja granula (MPa)	3,7	12,0	9,6	-

Proizvodnja standardnih i lakih betona

Betoni su s obzirom na vrstu agregata kodirani kao LWGC(laki betoni od letećeg pepela s dodatkom staklenog praha), LWBC(laki betoni od letećeg pepela s dodatkom bentonita), LWCC(Laki betoni s hladno prešanim letećim pepelom) i NWC (betoni standardne težine). Početne ispitne mješavine su napravljene kako bi se dobilo slijeganje od 150 mm, sa sadržajem zraka od 4% i željena čvrstoća i jedinična težina. Recepture su prikazane u tablici 3.3.. Probne mješavine su izrađene da bi se dobio željeni pad čvrstoće, slijeganje i sadržaj zraka, dakle količine superplastifikatora i aeranta su prilagođene. Sadržaj tih dodataka je ostao konstantan za LWC, ali ne i za NWC. Količine drugih sastojaka u NWC i LWC su ostale nepromijenjene.

Tablica 3.3. *Sastav mješavina* [6]

Beton	Cement	Silikatna prašina	Voda	Sitni agregat		Krupni agregat	Aerant	Superplastifikator
				Prirodni pijesak	Drobljeni pijesak			
LWCC	551	55	158	318	318	592	1,2 (0,2)	6,7 (1,1)
LWBC	548	55	157	316	317	567	1,2 (0,2)	6,7 (1,1)
LWGC	549	55	157	317	317	580	1,2 (0,2)	6,7 (1,1)
NWC	551	55	158	317	319	981	1,6(0,265)	7,3 (1,2)

Ispitivanja provedena na svježim i očvrslim betonima

Ispitivanja na svježem betonu su provedena u skladu sa standardnim procedurama prema ASTM C, za slijeganje, sadržaj zraka i gustoću. Za ispitivanje očvrslog betona korišteni su cilindrični uzorci od 100 i 200 mm kako bi se odredila gustoća očvrslog betona. Tlačna čvrstoća, modul elastičnosti i čvrstoća na cijepanje su također mjereni prema standardnim metodama nakon 28 i 56 dana. Također, vrijednosti modula elastičnosti konkretnih uzoraka su izračunati prema europskim standardima kakvoće.

3.1.2. Rezultati ispitivanja

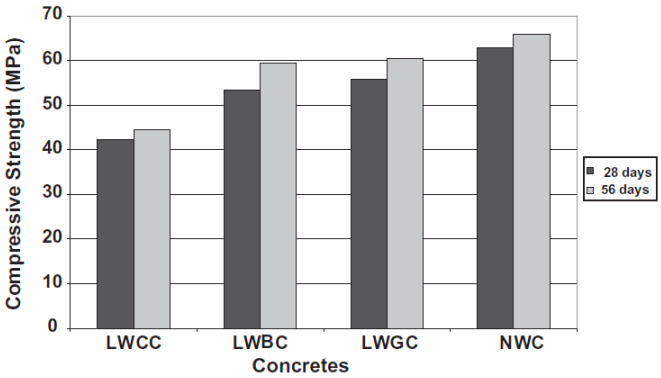
Slijeganje, sadržaj zraka i gustoća betona

Kako bi se dobilo slično slijeganje i sadržaj zraka kod lakih betona u usporedbi sa standardnim betonima, potrebna je manja količina superplastifikatora i aeranta što rezultira smanjenjem troškova. Lakše mješavine imaju manje slijeganje jer je utjecaj gravitacije manji u slučaju lakšeg agregata. Unatoč manjoj gustoći agregata, gustoća betona nije pala, kao kod betona standardne gustoće. Preporučena količina zraka kod lakih betona od strane Američkog instituta za beton je 4-8% za maksimalno zrno agregata 19mm. Puno lakši

betoni mogu se dobiti djelomičnom ili potpunom zamjenom finog agregata, kao i punom zamjenom krupnog agregata kombinirajući fini i krupni lagani agregat.

Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti

Vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti betona prikazani su na dijagramu 3.1.. Zamjena standardnog agregata visoke čvrstoće lakim agregatom rezultirala je smanjenjem tlačne čvrstoće za 12% kod LWGC, 18% kod LWBC i 49% kod LWCC. Ovaj omjer je nakon 56 dana smanjen na 9%, 11% i 48%. Najveći rast čvrstoće od 28 do 56 dana od LWBC se može pripisati većoj pucolanskoj aktivnosti agregata, dok je NWC pokazao najmanji rast čvrstoće.



***Dijagram 3.1**. Vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 28 i 56 dana* [6]

Wasserman i Bentur su istaknuli da agregat već čvrstoće ne vodi nužno ka betonu veće čvrstoće. U svojoj studiji su otkrili da je u ranoj dobi manja čvrstoća dobivena s agregatom s manjom apsorpcijom i manjim porama nego s ugrijanim agregatom, što se može pripisati većim pucolanskim aktivnostima. Međutim, u ovom istraživanju apsorpcija vode je ista za sinterirane agregate korištene u betonu.

Kao što je prikazano u tablici 3.3., relativno veća tlačna čvrstoća LWGC u odnosu na LWBC se pripisuje razlici u gustoći, iako ove dvije vrste betona imaju sličan sadržaj zraka, 4,3% za LWBC i 4,1% za LWGC. 28-dnevna tlačna čvrstoća i gustoća laganog betona se kretala od 42,3-55,8 MPa i od 1860-1943 kg/m^3. LWGC je bio teži od LWBB. Teži beton je rezultirao jačim betonom.

Nemes i Jozza pokazuju da postignuta maksimalna tlačna čvrstoća ovisi o gustoći čestica LWA. U ovoj studiji, regresijska analiza je provedena na tlačne čvrstoće i gustoće između laganih agregata korištenjem regresijskih modela koji su pokazali najbolji rezultat

u odnosu na ostale regresijske modele. Linearni model je pokazao linearnost između čvrstoće i gustoće. Tlačna čvrstoća je izravno proporcionalna gustoći stvrdnutog betona. Velika R^2 vrijednost od 0,88 za linearni model pokazuje da je regresija osnovana na prikladnosti, što znači da ne postoje znatne varijacije u čvrstoći gustoći konkretnih rezultata. Čvrstoća laganog betona je usko povezana s gustoćom. Čvrstoća raste s povećanjem gustoće uzorka osušenog u peći. Evo i Cui su također pokazali da je tlačna čvrstoća povećana s povećanjem gustoće betona. Rezultati čvrstoće pokazali su manje varijacije u kvaliteti laganog agregata. Čvrstoća i krutost laganih čestica agregata ovise o raspodjeli i veličini pora te obliku i ukupnom volumenu pora u pojedinim česticama. Velike šupljine nepravilnog oblika slabe čestice agregata što dovodi do smanjenja čvrstoće lakog betona.

Predložene su jednadžbe za proračun tlačne čvrstoće lakog betona. Parametri koji utječu na tlačnu čvrstoću su vodocementni faktor, gustoća lakog krupnog agregata, stvarna potrošnja lakog agregata, stvarna čvrstoća cementa i tlačna čvrstoća lakog agregata. Također, u drugoj studiji je zaključeno da čvrstoća betona ovisi o čvrstoći, zbijenosti i gustoći krupnog agregata.

Na module elastičnosti utječu tlačna čvrstoća betona, zbijenost i volumen korištenog LWA, međuprostor između agregata i paste i elastična svojstva sastavnih materijala. Kao što je prije navedeno, u ovoj studiji su samo vrste agregata bile različite. LWGC su pokazali nešto niži modul elastičnosti od LWBC, dok je LWGC imao nešto veću čvrstoću. Za gotovo slične vrijednosti čvrstoće, vrijednost E modula NWC je 42% viša od vrijednosti E modula LWBC i LWGC. Isto tako, vrijednost E modula LWBC i NWC nakon 28 dana je 33% i 88% viša nego u LWCC. Modul elastičnosti ovisi, ne samo o gustoći, već i o strukturi pora i teksturi površine lakog agregata. Stoga, agregat s gušćom i ravnomjernijom strukturom pora daje veći modul elastičnosti i veće čvrstoće od agregata s velikim udjelom pora.

Tri parametra, odnosno gustoća, ukupna poroznost i kritični promjer pora lakog agregata, potvrđuju rezultate modula elastičnosti. 10G1200 i 10B1200 imali su slične i najviše specifične težine, volumne mase i najniži stupanj poroznosti i kritični promjer pora, dok je CB imao najniže specifične težine i volumne mase i najveću ukupnu poroznost i kritični promjer pora. Analizirana je ovisnost između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće, najbolja regresija se dobiva izrazom:

$$E = 0{,}6258\sigma^{0{,}9185},\ R^2 = 0{,}9114 \text{ za LWC nakon 28 i 56 dana} \quad (1)$$

$$E = 0{,}1155\sigma^{1{,}3558},\ R^2 = 0{,}8237 \text{ za LWC i NWC nakon 28 i 56 dana} \quad (2)$$

gdje je modul elastičnosti (E) izražen u GPa i tlačna čvrstoća (σ) izražena u MPa.

Vlačna čvrstoća cijepanjem

Beton LWCC pokazao je najmanju tlačnu čvrstoću cijepanjem nakon 28 i 56 dana od 3,7 MPa, odnosno 3,9 MPa. Razlika između vrijednosti čvrstoće cijepanja ostalih betona je mala, dok je NWC ima neznatno veću čvrstoću. Vlačna čvrstoća NWC nakon 28 dana je bila samo 6% veća od čvrstoće LWBC betona i 4% veća od čvrstoće LWGC. Vlačne čvrstoće cijepanja LWCC, LWBC i LWGC betona redom su iznosile 72,5%, 94,1% i 96,1% od vlačne čvrstoće cijepanja normalnog betona. Ovaj rezultat potvrđuje činjenicu da vlačna čvrstoća cijepanja lakog betona iznosi 75 - 100% od vlačne čvrstoće cijepanja normalnog betona. Odnos vlačne čvrstoće cijepanja i tlačne čvrstoće ispitanih betonski mješavina prikazan je preko izraza:

$$\sigma_t = 0{,}1109\sigma^{0{,}9389},\ R^2 = 0{,}9912 \text{ za LWC nakon 28 i 56 dana} \quad (3)$$

$$\sigma_t = 0{,}0738\sigma^{1{,}046},\ R^2 = 0{,}9971 \text{ za LWC nakon 28 dana} \quad (4)$$

$$\sigma_t = 0{,}1253\sigma^{0{,}9053},\ R^2 = 0{,}9990 \text{ za LWC nakon 56 dana} \quad (5)$$

$$\sigma_t = 0{,}1572\sigma^{0{,}8496},\ R^2 = 0{,}9682 \text{ za LWC i NWC nakon 28 dana} \quad (6)$$

$$\sigma_t = 0{,}1721\sigma^{0{,}8239},\ R^2 = 0{,}9893 \text{ za LWC i NWC nakon 56 dana} \quad (7)$$

$$\sigma_t = 0{,}171\sigma^{0{,}8269},\ R^2 = 0{,}9781 \text{ za LWC i NWC nakon 28 i 56 dana} \quad (8)$$

gdje je σ_t - vlačna čvrstoća cijepanja (MPa), σ – tlačna čvrstoća (MPa).

3.1.3. Zaključak

Rezultati ovog istraživanja pokazali su postizanje visoke čvrstoće laganih betona korištenjem sinteriranog i hladno prešanog letećeg pepela kao agregata. Da bi se postiglo ciljano slijeganje i sadržaj zraka , manja količina kemijskih dodataka se koristi kod laganih betona nego kod betona normalne težine , što smanjuje troškove proizvodnje. Korištenje laganih agregata,umjesto agregata normalne težine u betonu , neznatno smanjuje čvrstoću. Modeli, dani kodovima, standardima i softverima, procijenili su bliske vrijednosti eksperimentalnim rezultatima.

3.2. Utjecaj volumne frakcije i prirode finog lakog agregata na mehanička i termalna svojstva strukturalnog betona

L.H.Nyugen, A.L.Beaucour, S.Ortola, A.Noumowé u svojoj studiji istažuju utjecaj volumnog udjela agregata na mehanička i termalna svojstva lakog betona. Uzeto je sedam tipova finog i grubog laganog agregata iz tri različita područja. Agregati u smjesama su kombinacija grubog lakog agregata sa finim normalnim agregatom i/ili finim lakim agregatom. Zamjena finog normalnog agregata sa finim laganim agregatom smanjuje čvrstoću betona ali poboljšava njegova termička svojstva.

3.2.1. Kemijski i mineraloški sastav lakog agregata

U ispitivanju su korišteni LWA od ekspandiranog škriljevca, plovućca, te ekspandirane gline. Kemijski sastav LWA prikazan je u tablici 3.4.. Svi agregati su sadržavali veliki postotak silicija i to 60 do 72%. Ekspandirana glina i škriljevac su također imali veliki postotak aluminijevog i željeznog oksida. Plovućac ima manje aluminijevog oksida od ostala dva, a količina željeznog oksida je dosta manja. No zbog veće atomske mase željeza gustoća čvrstih djelova LWA od gline i škriljevca mora bit veća od onoga agregata sa plavcem.

Tablica 3.4. *Kemijski sastav LWA* [7]

Aggregates	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	S	Mn_2O_3	TiO_2	P_2O_5
Expanded shale	63	21	8.5	1.5	3.6	1.5	0.008	0.02	–	–	–	
Pumice	71.91	12.66	1.13	1.46	0.32	4.3	3.45	0.03	–	–	–	–
Expanded clay	59.5	17	14.3	2	1.5	3	0.5	–	1	0.2	0.9	0.1

Minerologija agregata je određena XDR analizom. Plovućac je primarno staklene strukture što je naznačeno njegovim širokim amorfnim vijencom u difrakcijskom uzorku. Agregati od škriljevca i gline imaju kristalnu strukturu, te sadrže kvarc, željezni oksid i feldspat kao glavne minerale u sebi.

3.2.2. Fizička svojstva lakog agregata

Teško je izmjerit mehanička i termalna svojstva LWA zbog njegove male veličine i poliedarske forme. Ova svojstva su karakterizirana prema njihovoj gustoći i poroznosti. Poroznost i gustoća se također koriste kod procjene utjecaja LWA na termalna i mehanička svojstva LWAC. Toplinska svojstva agregata su čvrsto ovisna o njihovoj poroznosti i količini vlage pa su tako i svojstva betona ovisna o tome. Znanje o upijanju vode LWA i njegovoj poroznosti je bitno da bi shvaćali kako LWAC ovisi o svojstvima LWA.

Gustoća agregata i upijanje vode

Gustoća LWA i koeficijent upijanja vode važne su karakteristike agregata za određivanje volumena LWA koji se treba dodat smjesi. U ovom istraživanju, korišteni su vodom zasićeni LWA kako bi se izbjegle bilo kakve promjene omjera vode i cementa zbog upijanja vode prilikom miješanja smjese. Upotreba zasićenih agregata može omogućiti unutarnje stvrdnjavanje betona, što bi moglo smanjiti skupljanje i pucanje betona te povećati tlačnu čvrstoću zbog učinkovitije hidratacije cementa.

Tablica 3.5. *Fizička svojstva LWA* [7]

Aggregates	Size	Aggregates density (kg/m^3)			W_a^{24}
		ρ_v	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	
0/2 N	0/2		2460	2570	4.54
4/10 N	4/10	1360	2460	2530	2.94
0/4S	0/4	1030	1790	1940	8.05
4/10S	4/10	520	900	990	10.01
0/5P	0/5	800	1340	1620	18.3
5/8P	5/8	680	1180	1390	17.32
0/4C	0/4	830	1410	1680	17.88
4/8C	4/8	740	1250	1500	19.17
4/10C	4/10	590	980	1240	24.76

Za LWA, fini agregat je često teži od krupnog agregati, sa gustoćom od 800-1030 kg/m^3 i od 520-740 kg/m^3. 0/5P plovućac je najlakši sitni LWA. 5/8P plovućca i 4/8C ekspandirane gline su teži od drugih krupnih LWA prema njihovom niskom promjeru zrna. Paru dvaju agregata 4/10S-4/10C i 4/8C-5/8P, od kojih svaki ima sličnu veličinu i gustoću, proučavaju se utjecaji na druge fizičke parametre, poput vrste, poroznosti i kretanja veličine pora LWA na svojstva LWAC . Koeficijent upijanja vode agregata W_a^i u srednjem trenutku utvrđen je tijekom uranjanja u sobnim uvjetima prema EN 1097-6:

$$W_a^i = W_a^{48} - \left(M^{48} - M^i\right)/M^s \tag{9}$$

Gdje je W_A^{48} koeficijent apsorpcije vode tijekom 48 sati dobiven metodom piknometra. M^{48} i M^i predstavljaju masu piknometra sa uronjenim agregatom nakon 48 sati i u srednjem trenutku. M^s je masa potpuno suhog LWA. Koeficijent upijanja vode LWA mjereni su nakon 5 min, 30 min,1 h, 24 h i 48 h.

Agregat od ekspandirajućeg škriljevaca ima najsporiji razvoj koeficijenta upijanja vode. Agregat od ekspandirajućeg škriljevca i ekspandirajuće gline imaju poroznu unutrašnju strukturu okruženu ljuskama, koja je razmjerno gusta i staklaste površine. Ljuska LWA od škriljevca 4/10S je deblja nego što je LWA od gline 4/10C . To objašnjava

manji koeficijent upijanja vode za 4/10S u usporedbi s onim 4/10C. Iako je sitni LWA 4S škriljevca zdrobljen od većih zrna, njegova vanjska ljuska nestaje te ima najnižu koeficijent upijanja vode zbog veće gustoće.

Vodo-dostupna poroznost i veličina pora

Mehanička i toplinska svojstva agregata vezana su o njihovom mineraloškom i kemijskom sastavu, ali i njihovoj mikrostrukturi zrna. Eksperimenti vodo-dostupne poroznosti, poroznost mjerena prolaskom žive i raspodjela veličine pora nam omogućava da okarakteriziramo mikrostrukturu proučavanih agregata.

Tablica 3.6. *Koeficijent upijanja vode i poroznost LWA* [7]

Aggregates	W_a^{24} (%)	ϕ^{24} (%)	W_a^{vac} (%)	ϕ^{vac} (%)	Std Dev. (%)	ϕ^{Gg} (%)
0/4S	8.05	14.42	13.55	21.75	0.47	24.64
4/10S	10.01	9.15	32.59	29.78	1.91	59.96
0/5P	18.3	25.09	27.68	38.64	2.23	39.17
5/8P	17.32	21.36	36.11	42.54	0.71	43.04
0/4C	17.88	25.25	35.34	49.93	0.82	48.59
4/8C	19.17	23.87	37.58	46.8	0.46	–
4/10C	24.76	24.27	46.21	45.31	0.81	52.57

Promjer pora krupnog agregata plovućca kreće se u rasponu od 0,01μm do 0,5 μm. Sitne čestice plovućca imaju veći promjer pora u rasponu od 0,5 μm do 2 μm. Krupna glina ima najviše "najvećih pora" tj. više od 80% pora s promjerom većim od 0,1 μm. Sitni 0/4C LWA, iste vrste imaju mnogo manje pora veće od 5 μm.

3.2.3. Utjecaj LWA na svojstva betona

Utjecaj volumnog udjela finog LWA na gustoću betona

Tlačna čvrstoća lakog betona linearno opada sa povećanjem udjela finog lakog agregata. Zamjena finog NWA sa finim LWA smanjuje gustoću betona i utječe na svojstva betona. Na 100% zamjene finog NWA, suha gustoća LWAC varira između 1170-1350 kg/m^3 ovisno o vrsti LWA. Samo kombinacija lakog agregata 4/10C i 0/4C (beton OC1) smanjuju gustoću betona ispod 1300 kg/m^3. Za usporedbu, normalni beton izrađen samo od silikatno-vapnenačkog agregata ima suhu gustoću od 2030 kg/m^3.

Generalno, eksperimentalna gustoća LWAC je kompatibilna sa teoretskom gustoćom koja je proračunata iz sastava mješavine. Međutim, zamjenom finog NWA sa finim LWA dolazi do blage razlike u gustoći betona pri volumnoj zamjeni od 50% i 100%. Primjerice,

gustoća betona od smanjuje se za 80 kg/m^3 pri 50% zamjene agregata, zatim za 70 kg/m^3 za još 50% zamjene. Dodatno, kompletna zamjena NWA sa LWA smanjuje suhu gustoću betona otprilike za 130 kg/m^3 za LWAC od ekspandiranog škriljevca, 150 kg/m^3 za LWAC od plovućca, 235 kg/m^3 za LWAC od ekspandirane gline. Smanjenje gustoće ovisi o gustoći čistog lakog agregata do se zamjenjuju normalni i laki agregat.

Utjecaj volumnog udjela finog LWA na mehanička svojstva betona

Rezultati mehaničkih ispitivanja su pokazali smanjenje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kada je fini NWA zamijenjen sa finim LWA. Smanjenje je manje važno sa gušćim finim LWA od škriljevca nego sa glinom i finim LWA od plovućca. Modul elastičnosti se reducira otprilike 10% nakon ukupne zamjene sa finim LWA od škriljevca i otprilike 25-30% sa glinom i finim LWA od plovućca. Tlačna čvrstoća se smanjuje u istim odnosima osim za laki beton od plovućca za koji zamjena finog agregata dovodi do ograničenog smanjenja od oko 10%. Mehanička svojstva proučavanog betona pojavljuju se uglavnom pod utjecajem kvalitete grubih agregata od onog čiji je volumni udio u betonu najveći. Modul elastičnosti i tlačna čvrstoća su očigledno povezani sa gustoćom LWA ali i njihovom unutarnjom strukturom i prisutnosti ili ne vanjske ljuske. Bez obzira na prirodu LWA, omjer čvrstoće i gustoće betona može biti optimiziran korištenjem gušćeg grubog LWA u kombinaciji sa lakšim finim LWA.

Utjecaj volumnog udjela finog LWA na toplinska svojstva betona

Istraživan je utjecaj zamjene finog agregata i njegove prirode na kapacitet toplinske izolacije betona. Da bi se karakteriziralo sveukupno toplinsko ponašanje lakih betona vrši se mjerenje njihove toplinske provodljivosti, specifične topline i toplinske difuznosti. Toplinska provodljivost utječe na otpornost prijenosa topline (R-vrijednost). Specifična toplina i gustoća su također važne pod prolaznim stanjem.

Poroznost donesena finim LWA čini smanjenje toplinske provodljivosti linearnim kada se udio LWA povećava. Smanjenje provodljivosti OS betona praćeno zamjenom finog agregata je najmanje zbog najveće gustoće finog LWA od škriljevca u usporedbi s drugim finim LWA. Ovisno o prirodi finog LWA, toplinska provodljivost LWAC smanjuje se od 20 do 35%. Vrijednosti toplinske provodljivosti variraju od 0,42 do 0,57 W/mK. Najmanja toplinska provodljivost je dobivena za OC1 beton koji je najlakši. S druge strane, povećanjem udjela finog LWA na 50 i 100% dovodi do povećanja specifične

topline LWAC od 2,5-4,% i 3-8%. Vrijednosti specifične topline LWAC se kreću od 1000 do 1100 J/kgK, dok je njena vrijednost za NWC 772 J/kgK. Toplinska difuznost LWAC sa 100% finog LWA varira između 0,32 i 0,4 mm^2/s, što odgovara smanjenju od 0,09-0,15 mm^2/s (to je, 16-32%) uspoređivano sa LWAC sa 0% zamjene finog agregata. Ove vrijednosti su puno manje od onih kod NWC koja iznosi 1 mm^2/s.

Tablica 3.7. *Mehanička i toplinska svojstva betona* [7]

Mixes	ρ_a (kg/m^3)	f_c (MPa)	E (GPa)	λ (W/m K)	(J/kg K)	a (mm^2/s)
OS-0	1440	37.6	19.3	0.71	1021	0.48
OS-50	1380	35.7	18.6	0.61	1055	0.44
OS-100	1320	34.3	17.3	0.57	1094	0.40
OP-0	1490	34.8	19.1	0.70	996	0.47
OP-50	1410	33.0	17.0	0.56	1039	0.39
OP-100	1340	31.4	15.3	0.46	1077	0.32
OC1-0	1410	30.8	16.3	0.67	1049	0.45
OC1-50	1290	25.6	13.6	0.53	1075	0.38
OC1-100	1170	22.2	11.1	0.43	1077	0.35
OC2-0	1520	40.3	18.2	0.73	1024	0.47
OC2-50	1400	35.4	15.7	0.61	1048	0.41
OC2-100	1280	31.3	13.6	0.49	1060	0.36
NWC	2030	45.3	32.7	1.60	837	0.94

3.2.4. Zaključak

U ovome uratku istraživana su toplinska i mehanička svojstva lakih betona. 12 mješavina lakog betona napravljeno od 3 vrste lakog agregata je testirano i uspoređeno sa normalnim betonom. Priroda agregata utječe na svojstva lakog agregata. Mehanička i toplinska ponašanja lakog betona ovise o volumnom udjelu agregata ali i o njegovoj prirodi i kvaliteti. Ova studija pokazuje da korištenje finog lakog agregata kao zamjena za fini normalni agregat dovodi do lakog betona sa nižim mehaničkim svojstvima ali sa manjom gustoćom tako da su izolacijska svojstva poboljšana.

3.3. Početno ispitivanje mješavine betona s laganim agregatom

Keun-Hyeok Yang, Gwang-Hee Kim i Yong-Hwa Choi u svojoj studiji vrše početno ispitivanje mješavine betona od lakog agregata. Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi prvu probnu mješavinu postupkom doziranja za strukturne LWAC. Ovaj postupak može lako odrediti sadržaj svakog sastojka po jedinici volumena betona za postizanje ciljanog slijeganja, 28-dnevne čvrstoće, suhe gustoće i zraka. Da se ispita utjecaj različitih

parametara na zahtjeve i formulira dizajn jednadžbe, sveobuhvatna baza podataka s 347 LWAC primjeraka su analizirani pomoću metode nelinearne višestruke regresijske analize.

3.3.1. Podaci o LWAC

Korišteni agregati su kombinacije ili laganih grubih i fini materijala ili laganih grubih materijala i pijeska normalne težine. Baza uključuje 39 posve laganih betonskih mješavina te 308 mješavina laganog betona s pijeskom. Leteći pepeo ili čestice gline su uglavnom korištene kao lagani agregat. Suhe gustoće laganih i krupnih agregata su redom, 1000-1600 kg/m^3 i 1000-1850 kg/m^3. Vrijednosti upijanja vode laganih i krupnijeg agregata su između 5% i 28%. Maksimalna veličina krupnog agregata je obično 19 ili 25 mm, što rezultira finoća modula između 6,2 i 7,28. 28-dnevna tlačna čvrstoća je 11-40 Mpa za sve LWAC, i 11-57 Mpa ta LWAC s pijeskom. U četrdeset i šest skupova podataka za visoke čvrstoće iznad 40 MPa su uključeni LWAC s pijeskom. Suha čvrstoća LWAC betona varira između 1236 kg/m^3 – 1735 kg/m^3, dok za LWAC s pijeskom ide od 1320 kg/m^3 – 2024 kg/m^3. Nijedna mješavina nije sadržavala dodatne materijale. Glavni parametri za sve LWAC su: omjer voda/cement w/c=0,28 - 0,68; sadržaj vode W=139 - 242 kg/m^3; volumenski omjer grubog agregata po jedinici mase od agregata 0,45 - 0,8; količina zraka 0,03 - 0,065.

3.3.2. Formuliranje jednadžbe

Za uspostavljanje jednostavnog pristupa za prvo ispitivanje mješavine LWAC, racionalne jednadžbe se formuliraju uporabom nelinearne višestruke regresijske analize (NLMR) s SPSS softverom. Da bi se uspostavio osnovni model koji može proizvesti pouzdanu recepturu sa željenim svojstvima svježeg i očvrslog betona, svaka varijabla je bila više puta u kombinaciji, te sinkronizirana primjenom pristupa pokušaja i pogrešaka sve dok nije dobiven relativno prihvatljiv koeficijent korelacije (R^2). Ciljana svojstva LWAC koja su uzeta u obzir za sadašnje mješavine su početno slijeganje (Si) svježeg betona, sadržaj zraka u svježem betonu, 28-dnevna tlačna čvrstoća očvrslog betona i suha gustoća očvrslog betona.

Čvrstoća

Čvrstoća se koristi kao osnova za odabir udjela u sastavu betona uz standardno odstupanje uzorka λ_s . Na temelju empirijskih dokaza, ACI 214 definira koeficijent varijacije $\lambda_{v.}$ od 15% što predstavlja prosječnu kontrolu. Međutim Nowak i Szerszen pokazali su da bi vrijednosti λ_v za prosječnu kontrolu trebala biti niža od preporučene

vrijednosti od strane ACI-214, te λ_v za lake betone iznosi 7-8,5%. Temeljeno na srednjoj vrijednosti gornje granice, izabrani λ_v je iznosio 12,5%, koji predstavlja prosječnu kontrolu za laki beton. Dakle iz glavne jednadžbe koja je navedena u ACI-381-11 odnos između f'_{CR} (u Mpa) i f'_C (u Mpa) za strukturalni LWAC iznosi:

$$f'_{CR} = f'_C + 1{,}34\ \lambda_v \approx 1{,}167\ f'_C \tag{10}$$

gdje je f'_{CR} čvrstoća betona, a f'_C čvrstoća betona nakon 28 dana.

Odabir W/C

Tlačna čvrstoća betona obrnuto je proporcionalna W/C i sadržaju zraka ν_a, te se povećava sa suhom gustoćom lakog betona, što dovodi do zaključka da je manji W/C potreban lakom betonu sa manjom gustoćom da bi se postigla ciljana čvrstoća. Suha gustoća značajno ovisi o zamjeni finog agregata sa prirodnim pijeskom $R_{LFA}(=\frac{vfl}{vfl+vfs})$, gdje su ν_{fl} i ν_{fs} volumeni finog agregata i prirodnog pijeska. Kroz optimalnu NLMR analizu tih utjecajnih parametara, čvrstoća lakog betona može se formulirati.

$$\frac{f'_c}{f_0} = 0{,}72 \cdot \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_o} \cdot \frac{w}{c}\right) \cdot \left(\frac{1}{v_a}\right)^{0,2} \tag{11}$$

gdje je f_0 = 10 MPa referentna tlačna čvrstoća nakon 28 dana, a γ_0 = 2300 kg/m^3 referentna suha gustoća betona. Iz toga slijedi:

$$\frac{w}{c} = 0{,}72\left(\frac{1}{v_a}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0}\right) \cdot \left(\frac{f_0}{f'_c}\right) \tag{12}$$

Određivanje sadržaja vode

Potrebna količina vode (W) po jedinici volumena betona, da bi se postiglo ciljano slijeganje, ovisi o nominalnoj veličini i volumnom omjeru krupnog i finog agregata, o količini zraka, tipu kemijskog vodo-redukcijskog sredstva. NMLR analiza je provedena na betonskim uzorcima, bez redukcijskog sredstva. Slijedeća jednadžba je dobivena za predvidjeti početno slijeganje:

$$\frac{S_i}{S_o} = (1 + R_{LFA})^{0,2}\left(V_G \cdot \frac{W}{W_0}\right)^3 \cdot v_a^{0,4} \tag{13}$$

Gdje je S_0=300mm, referentna vrijednost od početnog slijeganja; W_0=100kg/m^3, referentna vrijednost udjela sadržaja vode. Rezultati predloženog modela su više u skladu s rezultatima pokusa, nego onima u preporuci koja je navedena u ACI 211,2-98. Predloženi

model se očekuje da će biti praktičan za određivanje W za traženi Si, kako je navedeno u sljedećoj jednadžbi:

$$W = \left(\frac{Wo}{Wg}\right) \cdot \left(\frac{1}{1+R_{LFA}}\right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{v_a}\right)^{0,133} \cdot \left(\frac{Si}{So}\right)^{0,333} \quad (kg/m^3) \tag{14}$$

Određivanje volumnog omjera (V_G) krupnih agregata

Odgovarajući volumen agregata po jedinici volumena betona je neophodan za zadovoljavajuću obradivost u proizvodnji betona. Ova analiza uvela je matematičko rješenje za razumno utvrđivanje V_G uključujući parametre koji utječu na preoblikovanje. Ciljana vrijednost γ_{con} odabrana je kao granični uvjet. Poznato je da se sadržaj vode potrebne za hidrataciju najčešće kreće u rasponu između 20 i 25% sadržaja cementa. Ovaj fenomen uzet je u obzir u NMLR analizi, koji je proveden kako bi se formulirali γ_{con} od očvrslog betona iz određenog omjera smjese. Suha gustoća betona može se opisati na sljedeći način:

$$\gamma_{con} = 1,25C + G_L + F_S + F_L + 120 \quad (kg/m^3) \tag{15}$$

gdje su C, G_L, F_S, i F_L sadržaji (u kg/m^3) cementa, krupnog LWA, sitnog NWA i sitnog LWA po jedinici volumena betona. Konstanta 120 kg/m^3 kompenzira razliku između suhe gustoće (u pećnici) i izjednačene suhe gustoće, što ovisi o vrsti agregata. Apsolutna jedinica volumena svježeg betona primijenjena je kao drugi rubni uvjet kako bi se utvrdio V_G:

$$v_c + v_w + v_{GL} + v_{FS} + v_{FL} + v_A = 1 \tag{16}$$

gdje su v_c, v_w, v_{GL}, v_{FS} i v_{FL} količine cementa, vode, krupnog LWA, sitnog NWA i sitnog LWA po jedinici volumena svježeg betona. Na temelju jedn. (14) i definicija R_{LFA} i V_G, jedn. (16) može se napisati u sljedećem obliku:

$$\frac{A_1}{\gamma_W V_G} + \frac{A_1}{\gamma_C X_1 V_G} + \frac{\rho_{GL} V_G}{\gamma_{GL}} + \frac{v_{FL}}{R_{LFA}} + v_A = 1 \tag{17}$$

$$A_1 = W_0 \left(\frac{1}{1+R_{LFA}}\right)^{0,067} \left(\frac{1}{v_A}\right)^{0,133} \left(\frac{S_i}{S_0}\right)^{0,333} \tag{18}$$

gdje je X_1 vrijednost W/C, a γ_W i γ_C su stvarne gustoće (kg/m3) vode i cementa. F_S i F_L mogu se izraziti kao $\gamma_{FS}v_{FS}$ i $y_{FL}v_{FL}$, odnosno, gdje su γ_{FS} i γ_{FL} gustoće (u kg/m3) od sitnog LWA i NWA. Dakle, jedn. (15) može se napisati na sljedeći način:

$$1{,}25\frac{A_1}{X_1V_G}+\gamma_{GL}\nu_{GL}+\gamma_{FS}\nu_{FS}\left(\frac{1-R_{LFA}}{R_{LFA}}\right)+\gamma_{FL}\nu_{FL}+120-\gamma_{con}=0 \qquad (19)$$

Ako uredimo jedn. (17) u odnosu na ν_{FL} i zamjenom u jedn. (19), dobivamo sljedeću kvadratnu funkciju V_G:

$$p_1V_G^2+p_2V_G+p_3=0 \qquad (20)$$

$$p_1=\frac{-\rho_{GL}+\frac{\gamma_{FL}R_{LFA}\rho_{GL}}{\gamma_{GL}}}{(1-R_{LFA})\gamma_{FS}}+\frac{\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \qquad (21)$$

$$p_2=\frac{\gamma_{con}-\gamma_{FL}R_{LFA}(1-\nu_A)-120}{(1-R_{LFA})\gamma_{FS}}+\nu_A-1 \qquad (22)$$

$$p_3=\frac{A_1}{\gamma_W}+\frac{A_1}{\gamma_CX_1}+\left[\gamma_{FL}R_{LFA}A_1\left(\frac{1}{\gamma_W}+\frac{1}{\gamma_CX_1}\right)-\frac{1{,}25A_1}{X_1}\right]\frac{1}{(1-R_{LFA})\gamma_{FS}} \qquad (23)$$

3.3.3. Potvrđivanje postupka doziranja i zaključak

Za provjeru pouzdanosti predloženog postupka doziranja ciljni uvjeti uspoređeni su sa izmjerenim rezultatima. Glavni istraženi parametar jest R_{LFA}, koji varira od 0-1,0 u koracima od 0,25. U svim smjesama potreban sadržaj zraka bio je ν_A=0,035, a kao vezivno sredstvo korišten je obični Portland cement (γ_c = 3140 kg/m^3). Ukupno izmjeren sadržaj vlage je 23% za krupni LWA, 18% za fini LWA, a 4% za prirodni pijesak. W/C nalazi se u rasponu između 0,34 i 0,39. Vrijednost V_G postupno se smanjio kako se R_{LFA} smanjivao. Izmjereno slijeganje bilo je blizu ciljne vrijednosti.

Na temelju sveobuhvaćane baze podataka s 347 rezultata ispitivanja, koje su prikupljene od betonskih mješavina s ekspandiranim letećim pepelom ili LWA od gline, ova analiza pruža jednostavan vodič za doziranje probne mješavine strukturalnog LWAC. Zbog ograničenog raspona i informacija o podacima, takav pristup je optimiziran za sljedeće uvjete: tlačna čvrstoća betona kretala se između 18 i 50 MPa, suha gustoća betona između 1200 kg/m3 i 2000 kg/m3, a maksimalna veličina zrna agregata je 19 mm ili 25 mm.

4. Eksperimentalni dio rada

Zadatak praktičnog djela je bio pripravljanje dviju pokusnih mješavina samozbijajućeg lakog betona, te uspoređivanje rezultata ispitivanja njihovih svojstava u svježem stanju te mehaničkih karakteristika očvrslog betona nakon 7 dana.

4.1. Općenito o samozbijajućem betonu

Samozbijajući beton je beton koji teče samo 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 obradljivost, otpornost na kemijske i mehaničke utjecaje, smanjenje popuštanja, trajnost i otpornost segregaciji.

Osnovni razlozi početka intenzivnih i vrlo ozbiljnih istraživanja na planu dobivanja samozbijajućih betonskih mješavina, koja su najprije počela u Japanu oko 1983. godine, bili su veliki problem s trajnošću armiranobetonskih konstrukcija i veliki nedostatak kvalificirane radne snage za kvalitetno ugrađivanje betona. Prototip samozbijajućeg betona prvi je put napravljen u Japanu, 1988. godine, uz upotrebu materijala kakvi se normalno dobiju na tržištu. Prototip se nakon očvršćivanja ponašao zadovoljavajuće u pogledu skupljanja, topline hidratacije, sadržaja pora i drugih svojstava. Ovakav beton nazvan je beton visokih svojstava i bio je definiran na sljedeći način, u tri uobičajene faze starosti:

- u svježem stanju mora imat svojstvo samozbijanja;
- u fazi očvršćivanja mora biti bez inicijalnih defekata;
- nakon očvršćivanja očekujemo da bude otporan na vanjske utjecaje.

Svježi samozbijajući beton mora imati ista osnovna svojstva kao i beton za pumpanje. To znači da se mora lako preoblikovat, a da pri tome ne dolazi do segregacije na bilo kojem nivou veličine zrna. Prvi zahtjev je da 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. U tu svrhu najbolji je elektrofilterski SiO_2 prah koji ima prosječnu veličinu čestica od nekoliko mikrometara. Drugi zahtjev je da mort sam za sebe mora također biti stabilan. Taj zahtjev se ispunjava upotrebom sitnog agregata s dovoljnim sadržajem zrna sitnijih od 1 mm, čime se sprječava segregacija između morta i paste. Treći zahtjev je da beton kao cjelina mora biti stabilan i konzistencije unutar određenih granica.

Visoka trajnost postiže se izborom niskog vodovezivnog faktora, što je moguće jedino upotrebom superplastifikatora. Dakle, pored ispunjenja osnovnih zahtjeva za pumpani beton, sposobnost samozbijanja betona visokih svojstava može se postići ispunjenjem sljedećih zahtjeva:

- ograničenjem sadržaja agregata;
- izborom niskog vodovezivnog faktora;
- upotrebom superplastifikatora.

Glavni razlozi za primjenu samozbijajućih betona su:

- skraćenje trajanja gradnje;
- osiguranje dobrog zbijanja u cijeloj konstrukciji, posebno na mjestima suženje gdje je primjena vibratora otežana;
- eliminacija buke koju proizvode vibratori;
- produženje vijeka trajanja oplate.

Upotrebom samozbijajućeg betona mogu se izvoditi novi oblici betonskih konstrukcija s gustom armaturom i više drugih prepreka u njima. Posebno efikasna može biti primjena u sendvič-konstrukcijama, kada se na postojeću konstrukciju dodaje sloj novoga betona radi povećanja nosivosti ili zamjene dotrajalog vanjskog sloja.

Ispitivanje samozbijajućeg betona:

Da bi se mogao pouzdano odrediti sastav betona koji ima sposobnost samozbijanja, potrebno je bilo pronaći potpuno nove metode, posebno za određivanje sposobnosti samozbijanja u laboratorijskim uvjetima, a posebno metode za primjenu na mjestu ugradnje.

Tablica 4.1. *Popis testova za ispitivanje svojstava samozbijajućeg betona* [3]

Karakteristika	**Metoda**	**Mjerna vrijednost**
Tečenje/svojstvo popunjavanja	Razastiranje (Slump-flow)	promjer razastiranja
	Kajima uređaj (Kajima box)	vizualno popunjavanje
Viskoznost/tečenje	T500	vrijeme tečenja
	V-lijevak (V-funnel)	vrijeme tečenja
	O-lijevak (O-funnel)	vrijeme tečenja
	Orimet	vrijeme tečenja
Svojstvo prolaznosti	L-box	omjer prolaznosti
	U-box	visina izdizanja
	J-ring	stopa blokiranja, tečenje
	Kajima-box	vizualno svojstvo prolaznosti
Otpornost prema segregaciji	Penetracija	dubina
	Sieve stability test	Postotak prolaznosti

Kontrola na mjestu ugradbe:

Stupanj zbijenosti ugrađenog betona ovisi uglavnom o njegovoj sposobnosti samozbijanja. Posljedice nedovoljne sposobnosti samozbijanja ne mogu se popraviti kada je beton jednom dospio u konstrukciju. Zbog toga se sav beton mora provjeriti prije ugradbe. Laboratorijske metode nisu praktične za tu svrhu, jer bi se uzimanje uzoraka i ispitivanje moralo vršiti tako često da bi to ometalo proces ugradbe betona. Problem je riješen na način, da je razvijena posebna metoda i aparatura za kontinuiranu kontrolu sposobnosti samozbijanja betona. Budući da se samozbijajući beton, u pravilu, ugrađuje pumpanjem, aparatura se postavlja na mjestu istovara betona iz prijevoznog sredstva u pumpu. Kroz aparaturu se propušta cijela dovezena količina betona. Ako cijela količina betona proteče kroz aparaturu bez zastoja, beton se smatra samozbijajućim. Ako dolazi do zastoja u tečenju, moraju se izvršiti odgovarajuće korekcije sastava betona.

4.2. Materijali

Za pripravljanje pokusnih mješavina korištenu su idući materijali:

- Obični portlandski cement *CEM I 42,5R*
- Liapor lagani agregat frakcija 0-2 mm i 4-8 mm
- Mljevena opeka frakcije < 0.125 mm
- Kameno brašno
- Superplastifikator FTF

4.2.1. Cement

Za pripravljanje mješavina korišten je obični portlandski cement *CEM I 42,5R,* proizvođač Dalmacijacement, Hrvatska. Svojstva cementa *CEM I 42,5R* prikazanu su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. *Svojstva cementa CEM I 42,5R* [13]

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
Gubitak žarenjem	2,5 ± 0,5%	≤ 5,0
Netopivi ostatak	0,25 ± 0,10%	≤ 5,0
% SO_3	3,0 ± 0,2%	≤ 4,0
Kloridi	0,01%	≤ 0,1
Vrijeme vezanja* (početak)	175 ± 25 min	≥ 60
Rana čvrstoća (2 dana)	30 ± 2 MPa	≥ 20
Normirana čvrstoća (28 dana)	55 ± 2 MPa	≥ 42,5; ≤ 62,5

*pri temperaturi od 20 ^{o}C

TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + gips (G)	96-100%	95-100
Ostalo	0-4%	0-5

Neke od karakteristika su vrlo visoka rana i konačna čvrstoća, kratak period početka vezivanja, optimalna obradivost, te znatan razvoj topline hidratacije.

Preporučuje se za primjenu kod: svih betona s visokim zahtjevima za početnom mehaničkom otpornošću, izgradnje zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i infrastruktalnih objekata od betona visokih marki, izgradnje javnih i poslovnih objekata, predgotovljenih i montažnih elemenata, prednapregnutih konstrukcija, mlaznog betona i injektiranja.

Osobito je prikladan za: betonske radove pri niskim temperaturama, izgradnju objekata gdje se traži brzo skidanje oplate, manipulacija elementima ili opterećenje konstrukcije u ranoj dobi, izradu vodonepropusnih betona te onih otpornih na mraz i soli na odmrzavanje.

4.2.2. Agregat

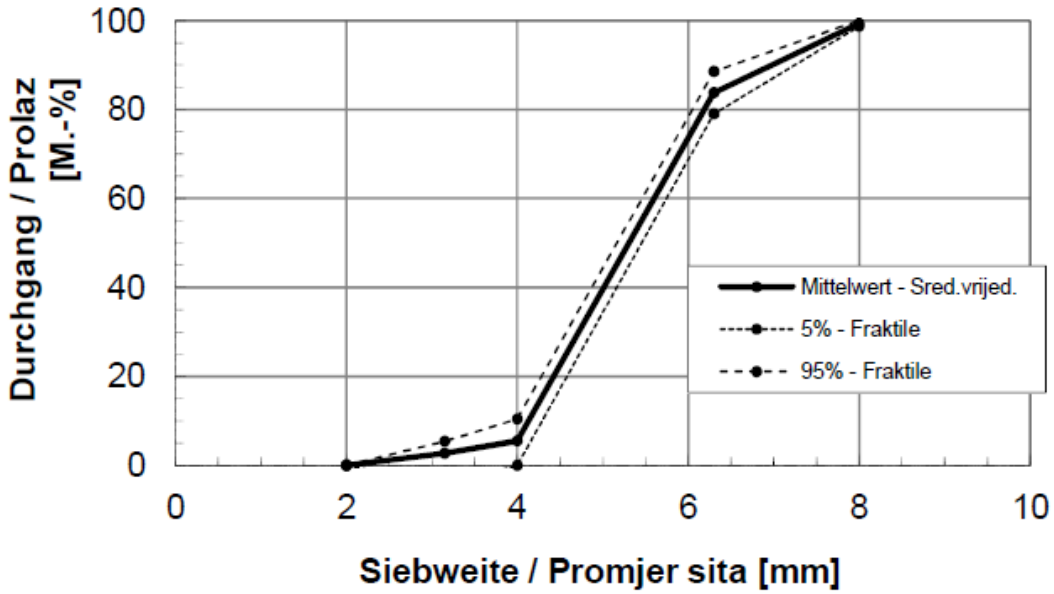
Korišten je laki agregat od Liapora. Liapor - prirodno čista i oko 180 mil. godina stara glina iz razdolja lias, ere jura, kvalitetna je sirovina za liapor proizvode. U liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi od 1100 – 1200 ℃. Pri tome sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju. U tehnički usavršenom procesu vrlo točno se kontroliraju specifična težina, veličina i tvrdoća kuglice. Tako nastaju kuglice sa zatvorenom strukturom pora, porozne na zrak, potrebne čvrstoće, s visokim svojstvima kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline. Liapor proizvodi su nezapaljiv i negoriv građevni materijal, koji se prema standardu DIN 4102 svrstava u najviši požarni razred A1, s neograničenim vijekom trajanja.

Zbog kemijsko – mineraloškog sastava liapor sirove gline i zadanih uvjeta u proizvodnji, liapor kuglice su otporne na vatru, smrzavanje, upijanje vode, lužine i kiseline te na pritisak. Liapor lagani agregati upotrebljavaju se izradu nearmiranih i armiranih laganih betona, kao i za izradu prednapetih laganih betona.

Pokusne mješavine sadrže dvije frakcije i to:

- Liapor F9 – 5 4 – 8,
- Liapor K 0 – 2.

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm prikazana su na dijagramu 4.1., odnosno u tablici 4.3..

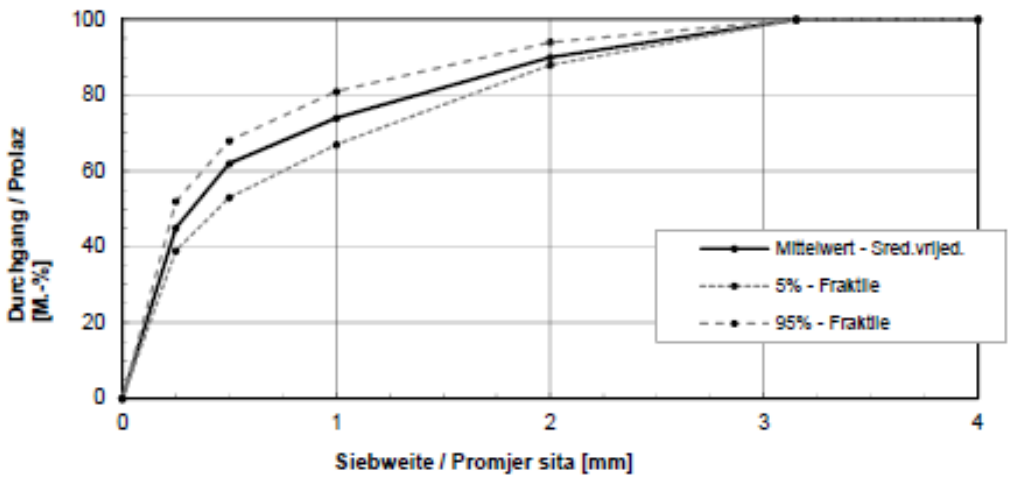


Dijagram 4.1. *Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm* [9]

Tablica 4.3. *Svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm* [9]

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Okruglo	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	4 - 8	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	950 ± 25	kg/m^3
	Specifična gustoća	1700 ± 50	kg/m^3
	Upijanje vode w_{30} (30 min)	8 ± 4	M.-%
	Upijanje vode w_{60} (60 min)	9 ± 4	M.-%
	Tvrdoća zrna (rasuto)	> 17,0	MPa
	Postojanost na smrzavanje	< 4,0	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,07	M.-%
	Sumporni spojevi SO_3	< 0,4	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO_2	53 ± 5	%
	Al_2O_3	18 ± 5	%
	Fe_2O_3	15 ± 5	%
	CaO	6 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm prikazana su na dijagramu 4.2., odnosno u tablici 4.4..



Dijagram 4.2. *Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 0 – 2 mm* [10]

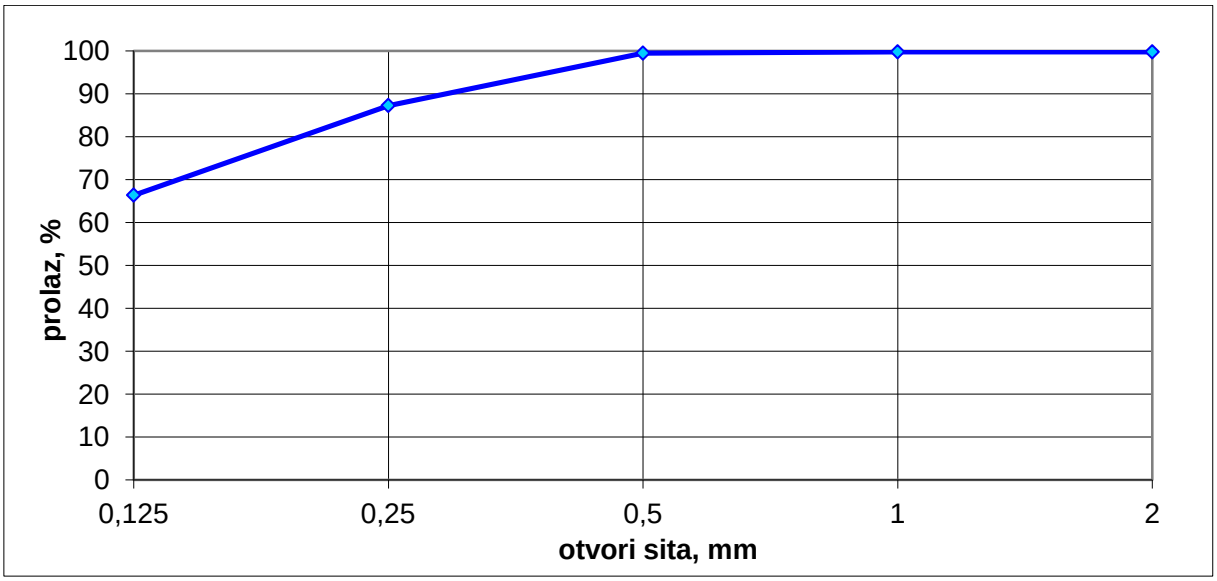
Tablica 4.4. *Svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm* [10]

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Lomljeno	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	0 - 2	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 30	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	800 ± 15	kg/m^3
	Specifična gustoća	1770 ± 10	kg/m^3
	Upijanje vode w_{BVK}	25 - 35	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,02	M.-%
	Sumporni spojevi SO_3	< 0,8	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO_2	55 ± 5	%
	Al_2O_3	24 ± 5	%
	Fe_2O_3	14 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

4.2.3. Mljevena opeka

Mljevena opeka je nastala mljevenjem opeke u mlinu sa kuglama. Dobiveni materijal je podijeljen u 2 frakcija: < 0.125 mm i > 0.125 mm. Frakcija < 0.125 se koristila kao filer a frakcija > 0.125 mm kao dio agregata. Gustoća joj je 2,00 g/cm^3.

Za pokusne mješavine se koristila frakcija < 0.125 mm kao filer. Granulometrijski sastav mljevene opeke prikazan je na dijagramu 4.3..



Dijagram 4.3. *Granulometrijski sastav mljevene opeke* [11]

4.2.4. Kameno brašno

Kameno brašno je drobljeni ili mljeveni zrnati kameni materijal krupnoće do 0,71 mm. Specifična težina iznosi 2,7 g/cm^3.

4.2.5. Superplastifikator FTF

Tablica 4.5. *Karakteristike superplastifikatora FTF* [12]

Kemijski simbol	Polikarbosilatni eter
Stanje	tekuće
Boja	narančasta
Gustoća (20°C)	1,07 ± 0,02 g/cm^3
pH vrijednost	3,0 - 5,0
Sadržaj klorida	≤ 0,1%

4.3. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama

Za ispitivanje svježeg betona korištene su sljedeće metode: V-lijevak, metoda razastiranja, L-box, J-prsten, te ispitivanje sadržaja zraka. Na uzorcima očvrslog betona starim 7 dana provedena su ispitivanja čvrstoće na pritisak, te ispitivanje metodom ultrazvuka.

4.3.1. V-lijevak (V-funnel)

V-lijevak test se koristi za određivanje viskoznosti i svojstva popunjavanja samozbijajućeg betona. V-lijevak se popuni sa svježim betonom te se mjeri vrijeme za potpuno istjecanje betona iz lijevka, slika 4.1.

Slika 4.1. *V-lijevak [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Postupak ispitivanja:

Potrebno je očistiti lijevak te navlažiti sve unutarnje površine. Lijevak treba postaviti vertikalno sa horizontalnim gornjim otvorom. Vrata se zatvore te se postavi kanta za primanje uzorka betona prilikom njegovog istjecanja. Lijevak se napuni sa betonom te se poravna njegova gornja površina. Nakon počeka od (10±2) sekunde vrata se naglo otvore te se istodobno uključi štoperica. Beton istječe iz lijevka te se štoperica zaustavlja čim se ugleda otvor vertikalno kroz lijevak. Izmjereno vrijeme se definira kao vrijeme istjecanja betona. Instrument je potrebno očistiti nakon testiranja.

Rezultati:

Tablica 4.6. *Razredi ispitivanja V-lijevkom* [3]

RAZRED	VF1	VF2
V-lijevak (s)	≤ 9	9 - 25

4.3.2. Metoda razastiranja (Slump-flow)

Metoda razastiranja se koristi kod određivanja tečenja i samozbijanja betona, odnosno njegove deformabilnosti. Mjere se dva parametra: veličinu rasprostiranja i vrijeme rasprostiranja (za T50). Test nije prikladan za zrna agregata veća od 40 mm.

Postupak ispitivanja:

Ploču postaviti na ravnu i stabilnu površinu, te je navlažiti sa spužvom ili krpom. Također navlažiti unutarnju površinu stošca te ga postaviti u centar ploče. Popuniti stožac sa svježim betonom bez ikakvog nabijanja i vibriranja te poravnati gornju površinu betona. Nakon počeka od otprilike 30 sekunda prilikom čišćenja ploče, podignuti stožac vertikalno na način da betoni steče u svim smjerovima. Početi mjerenje vremena širenja u trenutku kad stožac otpusti beton. Zaustaviti štopericu čim beton dosegne krug promjera 500 mm. Izmjereno vrijeme označava se kao T50. Test je završen kad se beton prestane širiti. Izmjeriti najveći promjer razasutog betona d_{max} te promjer okomit na njega d_{perp}, slika 4.2..

Slika 4.2. *Metoda razastiranja (Slump-flow)* [5]

Rezultati:

Tablica 4.7. Razredi ispitivanja metode razastiranja (slump-flow) [3]

RAZRED	SF1	SF2	SF3
$(d_1+d_2)/2$ (mm)	550-650	660-750	760-850

RAZRED	VS1	VS2
T50 (s)	≤ 2	> 2

4.3.3. L-box test

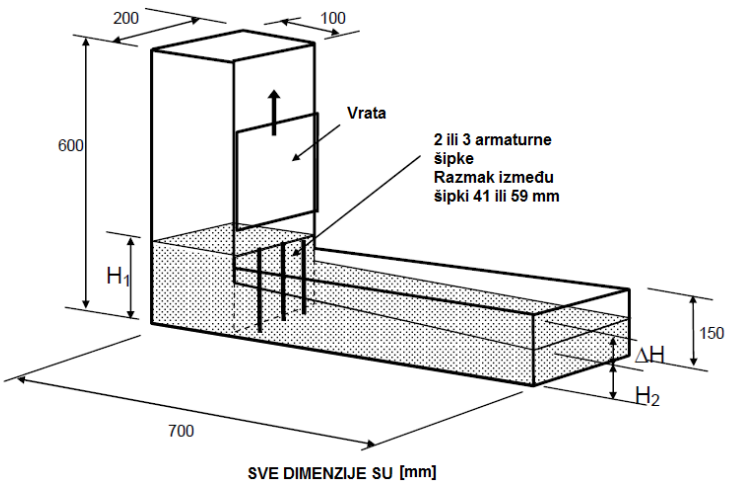
L-box aparaturom ispituje se sposobnost prolaska betona kroz uske prostore između šipki armature. Sposobnost prolaska definira se visinom i duljinom koju beton zauzme prilikom tečenja. Postoje dva tipa L-box uređaja ovisno o preprekama, jedan sa 3 glatke šipke i drugi sa 2 glatke šipke profila Ø12 mm, slika 4.3.. Šipke su na međusobnom razmaku 41 mm, odnosno 59 mm.

Postupak:

Postaviti L-box uređaj na ravnu horizontalnu podlogu. Popuniti vertikalni dio uređaja sa svježim betonom. Nakon 10 sekunda podignuti klizna vrata te pričekati dok se beton ne zaustavi prilikom tečenja iz vertikalnog dijela u horizontalni. Izmjeriti visinsku razliku na kraju uređaja između površine betona i gornjeg dijela uređaja na 3 mjesta, dva na krajevima i jedan u sredini, te izračunati njihovu prosječnu vrijednost ΔH.

Tablica 4.8. *Razredi ispitivanja L-box* [3]

RAZRED	Uvjet	Primjena
PL1	H2/H1 ≥ 0,80 2 šipke	Razmak 80-100 mm
PL2	H2/H1 ≥ 0,80 3 šipke	Razmak 60-80 mm



Slika 4.3. *L-box uređaj* [5]

4.3.4. J-prsten (J-ring)

Ovim se testom istražuje svojstvo popunjivosti i prolaznosti samozbijajućih betona. Može se koristiti i za ispitivanje otpornosti prema segregaciji usporedbom dva uzorka. Mogu se dobiti tri parametra: razastiranje, vrijeme razastiranja $T50_J$ (neobavezno) i stopa blokiranja. Razastiranje kod J-prstena odnosi se na deformaciju betona dok potrebno vrijeme razastiranja se odnosi na brzinu deformacije.

Postupak ispitivanja:

Postaviti ploču na ravnu podlogu. Napuniti kantu sa 6-7 litara samozbijajućeg betona te ostaviti da miruje otprilike 1 minutu, a za to vrijeme blago navlažiti unutarnje površine stošca i ploču, te postaviti konus u centar kruga od 200 mm. Postaviti J-prsten oko stošca. Napuniti stožac uzorkom iz kante te očistiti beton koji se pao na ploču prilikom punjenja. Nakon otprilike 30 sekunda podignuti stožac i uključiti štopericu. Zaustaviti štopericu kad beton dosegne krug od 500 mm. Izmjereno vrijeme označava se s $T50_J$. Postaviti šipku sa ravnom stranom na J-prsten te izmjeriti relativnu visinsku razliku između donjeg dijela šipke i površine betona u središtu Δh_0 i četiri visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima Δh_{x1}, Δh_{x2}, Δh_{y1} i Δh_{y2}. Izmjeriti najveći promjer razastiranja te promjer okomit na njega.

Slika 4.4. *J-prsten test* [17]

Rezultati:

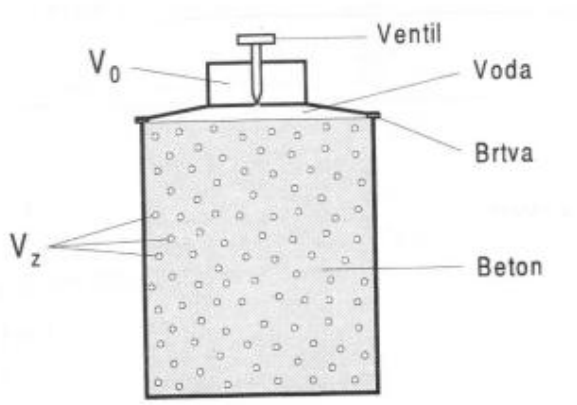
Tablica 4.9. *Razredi ispitivanja J-prstenom* [3]

RAZRED	Uvjet	Primjena
PL1	H2/H1 ≥ 0,80 2 šipke	Razmak 80-100 mm
PL2	H2/H1 ≥ 0,80 3 šipke	Razmak 60-80 mm

4.3.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

Sadržaj zraka u svježem betonu ispitan je pomoću porometra. Porometar se sastoji od čvrste, valjkaste posude volumena 8 dm^3 i poklopca na kojem je mali rezervoar zraka volumena V_0, manometar, ručna pumpa i ventil. Nakon što se beton uspe u posudu, rub posude se obriše i zatvori poklopcem. Između poklopca i betona nalije se voda da se ispuni prazan prostor iznad betona. U rezervoaru se napumpa zrak do pritiska od oko 1 bar, što se točno očita na manometru kao pritisak p_0. Tada se otvori ventil i dio zraka ispusti u donju posudu, te se pritisak u rezervoaru i posudi izjednači. Očita se novi pritisak p_1 i izračuna volumen zraka u betonu V_z po Boyle-ovom zakonu:

$$V_z = \frac{V_0 \cdot (p_0 - p_1)}{p_1}$$



Slika 4.5. *Porometar* [1]

Manometar aparata za mjerenje sadržaja zraka (porometra) tako je baždaren da se direktno očita sadržaj zraka z u % volumena posude za beton, bez računanja.

4.3.6. Ispitivanje čvrstoće na pritisak

Svježi beton se ugrađuje u kalupe oblika kocaka dimenzija 15x15x15 cm. Uzorci betona stoje u kalupima 24 sata u prostoriji relativne vlažnosti zraka najmanje 95% i temperature 20 ± 3 °C. Nakon toga uzorci se vade iz kalupa i potapaju u vodu gdje se čuvaju do dana ispitivanja. Na dan ispitivanja uzorci se vade iz vode te se obrišu tako da su im sve površine suhe i zatim se izmjeri masa i sve dimenzije uzorka. Tada su uzorci spremni za ispitivanje.

Ispitivanje se vrši na zasićenim, površinski suhim uzorcima pomoću preše za određivanje tlačne čvrstoće betona. Ispitno tijelo se stavi u prešu i opterećuje brzinom od 0.6 ± 0.4 MPa/s do sloma, a zatim se očita naprezanje i sila u trenutku loma.

Slika 4.6. *Preša za ispitivanje čvrstoće na pritisak*

4.3.7. Ispitivanje metodom ultrazvuka

Metoda ultrazvuka spada u nerazorne metode ispitivanja, koja je zasnovana na principu refleksije ultrazvučnih valova. Odašiljač šalje ultrazvučne valove koji se reflektiraju i dolaze do prijemnika, te se mjeri brzina prolaska ultrazvučnog vala kroz beton. Može se primijeniti za određivanje čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti betona, otkrivanje prisutnosti i dubine pukotina u betonu i kontrolu izvedenih sanacija. Ocjena kvalitete betona prema brzini prolaska ultrazvučnog vala dana je u tablici 4.10.

Tablica 4.10. *Ocjena kvalitete betona metodom ultrazvuka* [5]

Brzina prolaska ultrazvuka (km/s)	Kvaliteta betona
> 4,5	Odlična
3,5 - 4,5	Dobra
3,0 – 3,5	Srednja
2,0 – 3,0	Loša
< 2,0	Izuzetno loša

4.4. Proračun sastava betona

U svrhu istraživanja izrađene su dvije mješavine betona SZLB1 i SZLB2. Njihove recepture prikazane su u tablici 4.11.. Obe mješavine betona sadrže cement CEM I 42,5R i Liapor lagani agregat frakcija 0-2 mm i 4-8 mm. Prva mješavina (referentna) sadrži filer od mljevene opeke frakcije < 0,125 mm, a druga mješavina sadrži filer od mljevene opeke frakcije < 0.125 mm i kamenog brašna. Količine cementa i vode su jednake u obe mješavine što nam daje i jednak vodocementni faktor w/c od 0,5 dok je vodovezivni faktor kod prve mješavine 0,39 a kod druge 0,37. Obe mješavine su napravljene s dodatkom superplastifikatora u količini od 1,2% na količinu cementa.

Receptura se odnosi za količinu od 1000 l.

Tablica 4.11. *Sastav mješavina SZLB1 i SZLB2*

Sastav [kg]	**SZLB1**	**SZLB2**
Cement	400	400
Voda	200	200
Mljevena opeka < 0,125 mm	65,3	32
Kameno brašno	-	43,3
Superplastifikator FTF	4,7	4,7
Liapor 0-2 mm	498,3	498,7
Liapor 4-8 mm	513,3	513,7
Ostatak vode	16,4	22,5

4.5. Rezultati ispitivanja

4.5.1. Rezultati metode V-lijevka (V-funnel)

Tablica 4.12. *Rezultati metode V-lijevka*

Mješavina	SZLB1	SZLB2
t (s)	6,96	8,97
Razred	VF1	VF1

Slika 4.7. *Ispitivanje V-lijevkom [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Mješavina SZLB1 ima kraće vrijeme istjecanja od mješavine SZLB2 što pokazuje da ima bolja svojstva tečenja. Dodatkom filera od kamenog brašna mješavini SZLB2 opada svojstvo tečenja. Obe mješavine spadaju u razred VF1.

4.5.2. Rezultati metode razastiranja (Slump-flow)

Rezultati ispitivanja metodom razastiranja(slump-flow) prikazani su u tablici 4.13..

Tablica 4.13. *Rezultati metode razastiranja (slump-flow)*

Mješavina	SZLB1	SZLB2
T_{50} (s)	1,16	1,87
d_1 (mm)	770	775
d_2 (mm)	755	740
$S = \frac{d_1 + d_2}{2}$	762,5	757,5
Razred	VS2/SF3	VS2/SF3

Slika 4.8. *Rezultati metode razastiranja (Slump-flow)* [5]

Vrijeme razastiranja T50 je kraće, te je promjer razastiranja veći kod mješavine SZLB1 u odnosu na mješavinu SZLB2. Također se zaključuje da dodatak kamenog brašna u mješavinu SZLB2 smanjuje njeno svojstvo tečenja. Obe mješavine su u razredima VS2/SF3.

4.5.3. Rezultati L-box testa

Rezultati L-box ispitivanja prikazani su u tablici 4.14..

Tablica 4.14. *Rezultati L-box ispitivanja*

Mješavina	**SZLB1**	**SZLB2**
Δh_{11} (mm)	500	520
Δh_{12} (mm)	510	510
Δh_{13} (mm)	505	510
Δh_{sr1} (mm)	505	516,7
H_1=600- Δh_{sr1} (mm)	95	83,3
Δh_{21} (mm)	60	70
Δh_{22} (mm)	60	60
Δh_{23} (mm)	60	70
Δh_{sr2} (mm)	60	66,7
H_2=150- Δh_{sr} (mm)	90	83,3
H_2 / H_1	0,95	1,0
Razred	PL2	PL2

Slika 4.9. *L-box [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Iz prikazanih rezultata zaključujemo da mješavina SZLB2 ima bolje svojstvo prolaznosti u odnosu na SZLB1. Obe mješavine spadaju u razred PL2.

4.5.4. Rezultati J-prstena (J-ring)

Rezultati ispitivanja J-prstenom prikazani su u tablici 4.15..

Tablica 4.15. *Rezultati ispitivanja metodom J-prstena (J-ring)*

Mješavina	**SZLB1**	**SZLB2**
d_1 (mm)	750	690
d_2 (mm)	700	640
$\frac{d_1+d_2}{2}$ (mm)	725	665
$T50_J$ (s)	2,15	4,06
Δh_0 (mm)	115	105
h_{x1} (mm)	130	130
h_{x2} (mm)	130	130
h_{y1} (mm)	130	130
h_{y2} (mm)	130	125
$\frac{h_{x1}+h_{x2}+h_{y1}+h_{y2}}{4} - \Delta h_0$	15	23,75
Razred	VS2	VS2

Slika 4.10. *J-prsten (J-ring)[slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Mješavina SZLB1 ima kraće vrijeme razastiranja $T50_J$, veće ukupno razastiranje od SZLB2. Obe mješavine spadaju u razred VS2 ali ne zadovoljavaju uvjet prolaznosti $\frac{h_{\square 1}+h_{\square 2}+h_{\square 1}+h_{\square 2}}{4} - \Delta h_0 \leq 10$.

4.5.5. Rezultati ispitivanja sadržaja zraka u svježem betonu

Tablica 4.16. *Rezultati ispitivanja sadržaja zraka*

Mješavina	SZLB1	SZLB2
Poroznost (%)	4,0	3,6

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je sadržaj zraka u mješavini SZLB1 veći nego u SZLB2 što se može objasniti većim sadržajem sitnih čestica u SZLB2.

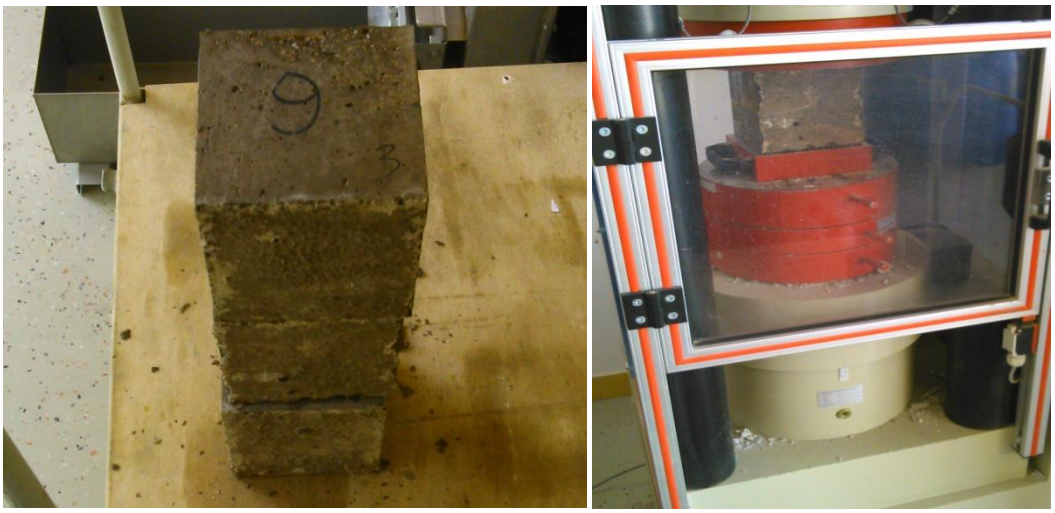
Slika 4.11. *Ispitivanje pomoću porometra [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

4.5.6. Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak

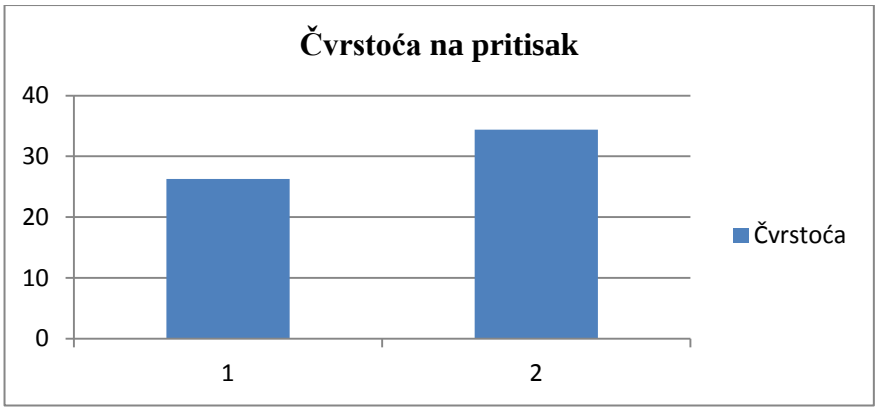
Ispitivanje čvrstoće na pritisak provedeno je na zasićenim, površinski suhim uzorcima betona nakon 7 dana pomoću preše, slika 4.11.. Rezultati su prikazani u tablici 4.17..

Tablica 4.17. *Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak*

Mješavina	SZLB1	SZLB2
$f_{c,sr}$ (Mpa)	26,3	34,4
F (kN)	591,2	773,6



Slika 4.12. *Uzorci, preša za ispitivanje čvrstoće [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*



Dijagram 4.4. *Rezultati čvrstoće na pritisak*

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je čvrstoća na pritisak odnosno sila pri lomu značajno veća kod mješavine SZLB2 u odnosu na SZLB1. Uzrok tome je filer od kamenog brašna.

4.5.7. Rezultati ispitivanja metodom ultrazvuka

Tablica 4.18. *Rezultati ispitivanja metodom ultrazvuka*

Mješavina	SZLB1	SZLB2
T_{sr} (μs)	43,3	42,1
v (km/s)	3,5	3,6
Kvaliteta betona	dobra	dobra

Metodom ultrazvuka utvrđeno je da je kvaliteta mješavina SZLB1 i SZLB2 dobra i bez defekata pri čemu je brzina prolaza ultrazvučnih valova kroz SZLB2 veća.

4.5.8. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti određuje se pomoću izraza: $E_d = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)}$, gdje je v - brzina prolaska ultrazvučnih valova (km/s); ρ - gustoća betona (kg/m^3); ν - poisson-ov koeficijent.

Tablica 4.19. *Dinamički modul elastičnosti*

Mješavina	SZLB1	SZLB2
v (km/s)	3,5	3,6
ρ (kg/m^3)	1785,5	1807,1
ν	0,20	0,20
E_d (GPa)	19,7	21,1

5. Zaključak

U svrhu ovog završnog rada izrađene su dvije pokusne mješavine samozbijajućeg lakog betona. Obe mješavine sadrže cement CEM I 42,5R i Liapor lagani agregat frakcija 0-2 mm i 4-8 mm. Prva mješavina (SZLB1) sadrži filer od mljevene opeke frakcije < 0,125 mm, a druga mješavina (SZLB2) sadrži filer od mljevene opeke frakcije < 0,125 mm i kamenog brašna. U ispitivanjima svježeg betona pokazalo se da SZLB1 ima bolja svojstva tečenja, ali lošije svojstvo popunjavanja. Prema metodi V-lijevka, vrijeme istjecanja za SZLB1 je bilo 6,96 s, dok je za SZLB2 8,97 s. Prema metodi razastiranja, vrijeme razastiranja T50 je kraće, te je promjer razastiranja veći kod mješavine SZLB1 u odnosu na mješavinu SZLB2. Metodom razastiranja i J-prstenom pokazalo se da beton ima izlučivanje vode jer je specifična površina filera od opeke manja u odnosu na pravi filer. Izlučivanje vode je veće kod SZLB1 jer ima veći sadržaj mljevene opeke. Trebalo bi ispitati finoću mliva opeke, te je prosijati na situ od 0,063 mm da bi zaista imalo funkciju filera. Obradivost obe mješavine je zadovoljavajuća. SZLB2 ima bolja svojstva popunjavanja te manji sadržaj zraka u svježem stanju, što se pokazalo u metodi L-box, odnosno ispitivanjem porometrom. Sadržaj zraka u SZLB1 iznosi 4% dok je u SZLB2 3,6%. Ispitivanjem tlačne čvrstoće nakon 7 dana, te izračunom srednje vrijednosti čvrstoće svih uzoraka pojedine mješavine vidljivo je da je tlačna čvrstoća SZLB2 veća od SZLB1. Veličina čvrstoće iznosila je za SZLB1 26,3 MPa, te za SZLB2 34,4 MPa. Pomoću metode ultrazvuka određen je dinamički modul elastičnosti koji je veći kod SZLB2.

Uspoređivanjem svih rezultata ispitivanja možemo zaključiti dodatak filera od kamenog brašna u mješavini SZLB2 smanjuje svojstva tečenja, ali povećava tlačnu čvrstoću te dinamički modul elastičnosti. Također smanjuje se sadržaj zraka zbog veće količine sitnih čestica. Zaključuje se da SZLB2 u odnosu na SZLB1 ima više prednosti nego nedostataka.

Literatura

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

[2] Juradin S.: Predavanja iz Građevinskih materijala, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu.

[3] Juradin S., Krstulović P.: Građevinski materijali II, Samozbijajući beton, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu.

[4] Vukoje S.: Diplomski rad (tema: laki betoni visokih čvrstoća), Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu, Split, 2012.

[5] Alagušić M., Lavrin F.: Diplomski rad (tema: eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona), sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.

[6] Niyazi Ugur Kockal, Turan Ozturan: Strength and elastic properties of structural lightweight concretes, Materials & Design, 32 (2011), 2396 – 2403, Turkey, 2010.

[7] L.H.Nyugen, A.L.Beaucour, S.Ortola, A.Noumowé: Influence of the volume fraction and nature of fine lightweight aggregates on the termal and mechanical properties of structural concrete, Construction and building materials, 51 (2014), 121 – 132, 2013.

[8] Keun-Hyeok Yang, Gwang-Hee Kim i Yong-Hwa Choi: An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concretes, Construction and building materials, 55 (2014), 431 – 439, 2014.

[9] Tehnički list za Liapor F9 - 5 4 – 8

[10] Tehnički list za Liapor K 0 – 2

[11] Tehnički opis za mljevenu opeku

[12] Tehnički list za Readyplast FTF1

[13] http://cemex.hr

[14] http://wikipedia.org/wiki/Perlite

[15] http://wikipedia.org/wiki/Vermiculite

[16] http://liapor.mk/Files/Liapor-HR - lagani beton 2009-07

[17] http://www.humboldtmfg.com/j_ring_test_set_for_self_consolidating_concrete.html

[18] http://insulationcorp.com/eps/

[19] http://www.simprolit.ru/english/simpro1.html

[20] http://en.wikipedia.org/wiki/Permeable_paving

[21] http://bricolage.bricoportale.it/costruzioni-fai-da-te/cemento-cellulare/gasbeton-prezzi

[22] http://gwalior.all.biz/concrete-foam-bgg1009404