

Analiza svojstava samoslijegajućeg betona s recikliranim betonskim agregatom

Imširević, Emina

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:862101>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Emina Imširević

**ANALIZA SVOJSTAVA SAMOSLIJEGAJUĆEG BETONA S
RECIKLIRANIM BETONSKIM AGREGATOM**

Diplomski rad

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Hidrotehnika

Teorija i tehnologija betona

Emina Imširević

JMBAG: 0114029611

**ANALIZA SVOJSTAVA SAMOSLIJEGAJUĆEG BETONA S
RECIKLIRANIM BETONSKIM AGREGATOM**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Emina Imširević

U Rijeci, 16.9.2022.

IZJAVA

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta Unaprjeđenje modela stjecanja stručnih kompetencija učenjem uz rad kroz izradu diplomskog rada (GraDiS).

Voditeljica projekta – izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Šifra projekta – A3-21-6

Financijer projekta – Sveučilište u Rijeci – programska linija UNIRI CLASS A3

Pravna nadležnost – Sveučilište u Rijeci

U Rijeci, 16.9.2022.

Mentor

ZAHVALA

Zahvaljujem ssvim djelatnicima Građevinskog fakulteta u Rijeci na razumijevanju i savjetima tijekom cjelokupnog trajanja studija.

Posebno zahvaljujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić i stručnoj komentorici u tvrtki GP Krk d.o.o., dipl. ing. građ. Andreji Polonijo, na brojnim stručnim savjetima, strpljenju i potpori tijekom izrade ovog diplomskog rada. Zahvaljujem laborantima Dinu Juriševiću i Dominiku Štroku na strpljivoj pomoći pri ispitivanju betona. Također, zahvaljujem laborantima Draganu Mrakovčiću, Ivanu Žicu i Davoru Rimbaldo, te svim zaposlenicima GP Krk d.d. na nesebičnom dijeljenju znanja, pomoći i lijepoj suradnji.

Zahvaljujem svom zaručniku i svojoj obitelji jer su mi u svim trenucima mog studiranja pružali podršku, oslonac i lijepe trenutke.

Sažetak

U građevinskoj industriji, upotrebom recikliranog betonskog agregata za proizvodnju betona otvara se niz mogućnosti vezanih uz ponovnu upotrebu materijala. Ovo bi mogao biti veliki korak za čovječanstvo u nastojanjima da se potakne održivi razvoj. S godinama trend korištenja recikliranog agregata raste kao potencijalno rješenje gomilanja otpadnog građevinskog materijala, ne zaboravljajući paralelni trend poboljšanja kvalitete konačnog proizvoda. Smanjenje rezervi prirodnih resursa, drastično povećanje cijena skladištenja građevinskog materijala i nedostatak lokacija za skladištenje su upravo razlozi nastanka ovakvog trenda.

Cjelokupno poznavanje karakteristika novog materijala, kao što je samoslijegajući beton sa recikliranim betonskim agregatom, od presudne je važnosti kako bi se mogli istaknuti i iskoristiti stvarne mogućnosti materijala. Dosadašnja vrlo uspješna istraživanja i praktična primjena općenito betona s recikliranim agregatom ukazuje na vrlo uspješnu upotrebu ovakvog betona za konstrukcijske elemente.

U radu su prikazana dosadašnja istraživanja i saznanja o samoslijegajućim betonima s recikliranim betonskim agregatom na osnovi istraživanja u široj regiji i diljem svijeta . Provedeno je i vlastito istraživanje kako bi se doprinijelo opravdanosti upotrebe ove vrste betona.

Provedena ispitivanja izvršena su na samoslijegajućem betonu s različitim postotnim udjelima recikliranog betonskog agregata. Na potpuno jednak način su izrađeni i njegovani uzorci od betonskih mješavina sa 30 % i 50 % recikliranog betonskog agregata. Ispitivanja koja su provedena vezana su uz svojstva svježeg i očvrslog betona, a to su: sposobnost tečenja, viskoznost i sposobnost zaobilaženja prepreka svježeg betona te tlačna i vlačna čvrstoća, plinopropusnost, vodopropusnost i otpornost na habanje očvrsnulog betona. Rezultati ispitivanja su uspoređeni s rezultatima ispitivanja referentne betonske mješavine od 100 % prirodnog agregata. Na temelju analize rezultata izvedeni su zaključci na kraju rada.

Ključne riječi: reciklirani betonski agregat, samoslijegajući beton, samoslijegajući beton s recikliranim betonskim agregatom, građevinski otpad, mehanička svojstva, trajnosna svojstva

Abstract

In the construction industry, the use of recycled concrete aggregate for the production of concrete opens up a number of possibilities related to the reuse of materials. This could be a big step for humanity in its efforts to promote sustainable development. Over the years, the trend of using recycled aggregate grows as a potential solution to the accumulation of waste construction material, not forgetting the parallel trend of improving the quality of the final product. The reduction of reserves of natural resources, the drastic increase in the price of storage of building materials and the lack of locations for storage are precisely the reasons for the emergence of this trend.

A comprehensive knowledge of the characteristics of a new material, such as self-compacting concrete with recycled concrete aggregate, is of crucial importance in order to highlight and utilize the material's real potential. So far, very successful research and practical application of concrete with recycled aggregate in general indicates a very successful use of this type of concrete for structural elements.

The paper presents previous research and knowledge about self-compacting concrete with recycled concrete aggregate based on research in the wider region and around the world. Our own research was also carried out in order to contribute to the justification of the use of this type of concrete.

The tests were performed on self-compacting concrete with different percentages of recycled concrete aggregate. Treated samples of concrete mixes with 30% and 50% recycled concrete aggregate were made in exactly the same way. The tests that were conducted are related to the properties of fresh and hardened concrete, namely: flowability, viscosity and ability to bypass obstacles of fresh concrete, and compressive and tensile strength, gas permeability, water permeability and wear resistance of hardened concrete. The test results were compared with the test results of the reference concrete mix of 100% natural aggregate. Based on the analysis of the results, conclusions were drawn at the end of the paper.

Keywords: recycled concrete aggregate, self-compacting concrete, self-compacting concrete with recycled concrete aggregate, construction waste, mechanical properties, permanent properties

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. GOSPODARENJE GRAĐEVINSKIM OTPADOM	3
2.1. Ekološki aspekti.....	3
2.2. Ekonomsko stajalište	4
2.3. Gospodarenje građevinskim otpadom	5
3. OPĆENITO O SAMOSLIJEGAJUĆEM BETONU.....	9
3.1. Razvoj samoslijegajućeg betona	9
3.3. Primjena samoslijegajućeg betona	12
3.4. Projektiranje sastava samoslijegajućeg betona	14
3.4.1. Cement.....	17
3.4.2. Agregat	18
3.4.3. Voda.....	19
3.4.4. Dodaci betonu	19
4. SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOSLIJEGAJUĆEG BETONA	23
4.1. Proizvodnja, ugradnja i njega samoslijegajućeg betona	24
4.1.1. Proizvodnja samoslijegajućeg betona	24
4.1.2. Transport i ugradnja samoslijegajućeg betona.....	27
4.1.3. Njega samoslijegajućeg betona	28
4.2. Svojstva svježeg samoslijegajućeg betona.....	28
4.2.1. Sposobnost tečenja.....	29

4.2.2.	<i>Viskoznost</i>	33
4.2.3.	<i>Sposobnost zaobilaženja prepreka</i>	36
4.2.4.	<i>Ostale metode</i>	40
4.3.	Svojstva očvrslog samoslijegajućeg betona	46
4.3.1.	<i>Tlačna čvrstoća</i>	47
4.3.2.	<i>Vlačna čvrstoća</i>	50
4.3.3.	<i>Plinopropusnost</i>	52
4.3.4.	<i>Dubina prodora vode pod tlakom</i>	55
4.3.5.	<i>Otpornost na habanje</i>	56
5.	SAMOSLIJEGAJUĆI BETON S AGREGATOM OD RECIKLIRANOG BETONA	59
5.1.	Agregat od recikliranog betona	59
5.1.1.	<i>Tehnologija proizvodnje recikliranog agregata</i>	59
5.1.2.	<i>Svojstva agregata od recikliranog betona</i>	60
6.	SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOSLIJEGAJUĆEG BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA	64
6.1.	Specifičnosti spravljanja samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata	64
6.1.1.	<i>Normalan postupak miješanja (NMA)</i>	65
6.1.2.	<i>Metoda dvije faze miješanja (TSMA)</i>	66
6.2.	Obradivost svježeg samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata	69
6.3.	Svojstva očvrslog samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata	70

6.3.1.	<i>Struktura samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata.....</i>	<i>70</i>
6.3.2.	<i>Tlačna čvrstoća</i>	<i>71</i>
6.3.3.	<i>Vlačna čvrstoća savijanjem i cijepanjem</i>	<i>74</i>
6.3.4.	<i>Vodopropusnost.....</i>	<i>74</i>
6.3.5.	<i>Otpornost na habanje.....</i>	<i>75</i>
7.	EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	76
7.1.	Uvod.....	76
7.2.	Materijali.....	77
7.3.	Projektiranje sastava svježeg samoslijegajućeg betona.....	78
7.3.1.	<i>Sastavi betonskih mješavina</i>	<i>78</i>
7.4.	Izrada betonskih mješavina.....	79
7.5.	Ispitivanje betonskih mješavina.....	79
7.5.1.	<i>Sposobnost tečenja svježeg SCC.....</i>	<i>79</i>
7.5.2.	<i>Viskoznost.....</i>	<i>80</i>
7.5.3.	<i>Sposobnost zaobilaženja prepreka.....</i>	<i>81</i>
7.5.4.	<i>Tlačna čvrstoća</i>	<i>81</i>
7.5.5.	<i>Vlačna čvrstoća</i>	<i>83</i>
7.5.6.	<i>Plinopropusnost</i>	<i>85</i>
7.5.7.	<i>Određivanje dubine prodiranja vode pod tlakom.....</i>	<i>85</i>
7.5.8.	<i>Otpornost na habanje.....</i>	<i>86</i>
7.6.	Analiza rezultata ispitivanja	87

7.6.1.	<i>Sposobnost tečenja svježeg SCC</i>	87
7.6.2.	<i>Viskoznost</i>	87
7.6.3.	<i>Otpornost zaobilaženja prepreka</i>	88
7.6.4.	<i>Tlačna čvrstoća</i>	88
7.6.5.	<i>Vlačna čvrstoća</i>	89
7.6.6.	<i>Plinopropusnost</i>	91
7.6.7.	<i>Dubina prodiranja vode pod tlakom</i>	92
7.6.8.	<i>Otpornost na habanje</i>	93
8.	ZAKLJUČAK	95
	LITERATURA	97

Popis slika

Slika 1: Udjeli u nastalom građevinskom otpadu u 2020. godini (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2021.)	6
Slika 2: Procijenjene količine građevinskog otpada za razdoblje od 2015. do 2020. godine....	8
Slika 3: Količina obrađenog građevinskog otpada za razdoblje od 2015. do 2021. godine	8
Slika 4: Burj Khalifa (shimanovskadm.ru)	13
Slika 5: Tunel Sodra Lanken (sv.wikipedia.org)	14
Slika 6: Vrste agregata (Bjegović i Štirmer, 2015).....	18
Slika 7: Shema faza u proizvodnji betona.....	25
Slika 8: Pogon za proizvodnju betona (kreativni.hr)	26
Slika 9: Transposort betona na mjesto ugradnje kranom.....	27
Slika 10: Priprema uzorka za ispitivanje konzistencije slijeganja rasprostiranjem	30
Slika 11: V-lijevak	34
Slika 12: L-kutija	37
Slika 13: L-kutija s dimenzijama u mm	38
Slika 14: J-prsten s Abramsovim kalupom i pločom (nl-test.com)	40
Slika 15: : Uređaj za ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu (porometar) (Algušić i Lavriv, 2010.)	45
Slika 16: Kajima uređaj (theconstructor.org).....	46
Slika 17: Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće	50
Slika 18: Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće betona cijepanjem.....	51
Slika 19: Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće betona savijanjem	51

Slika 20: Uređaj za određivanje plinopropusnosti prema metodi Cambureau sa svim elementima (Mrakovčić, 2019.).....	52
Slika 21: Uređaj za ispitivanje vodonepropusnosti betona	56
Slika 22: Boehme uređaj	57
Slika 23: Postrojenje za proizvodnju drobljenog agregata	59
Slika 24: Količina starog morta na zrnima RBA različite veličine (Etxeberria Larrañaga, 2004.)	62
Slika 25: Shematski prikaz normlanog postupka miješanja (Jevtić i sur., 2009.)	65
Slika 26: Metoda dvije faze miješanja (TSMA)(Jevtić i sur., 2009.)	67
Slika 27: Shematski prikaz poboljšane strukture recikliranog agregata prema metodi u dvije faze (TSMA) (Jevtić i sur., 2009.)	68
Slika 28: Kontaktna zona u betonu sa recikliranim agregatom (Jevtić i sur., 2009.)	71
Slika 29: Relativna tlačna čvrstoća betona s recikliranim agregatom, nakon 28 dana, u funkciji količine krupnog recikliranog agregata (Ignjatović i Marinković, 2009.).....	73
Slika 30: Pokretna drobilica na kamenolomu Tresni Breg	78
Slika 31: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće	89
Slika 32: Razultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem	90
Slika 33: Razultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem.....	90
Slika 34: Usporedba srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća savijanjem i cijepanjem.....	91
Slika 35: Rezultati ispitivanja plinopropusnosti	92
Slika 36: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode pod tlakom.....	93
Slika 37: Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje.....	94

Popis tablica

Tablica 1:Karakteristične količine komponenti samoslijegajućeg betona (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.).....	16
Tablica 2: Preporučene metode ispitivanja i razredi samozbijajućih betona (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)	29
Tablica 3: Razredi slijeganja rasprostiranjem (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.).....	32
Tablica 4: Razredi viskoznosti (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)	33
Tablica 5: Razredi viskoznosti samoslijegajućeg betona(The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)	36
Tablica 6: Razredi sposobnosti zaobilaženja prepreka (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)	39
Tablica 7: Razredi otpornosti segregaciji i pripadajuća primjena samoslijegajućeg betona (Džaja i sur., 2016.).....	44
Tablica 8: Klasifikacija betona prema razredu tlačne čvrstoće (EN 1992-1-1, 2004.).....	48
Tablica 9: Razredi otpornosti na habanje (Mrakovčić, 2019.).....	58
Tablica 10: Rezultati ispitivanja sposobnosti tečenja	80
Tablica 11:Rezultati ispitivanja viskoznosti	80
Tablica 12: Rezultati ispitivanja zaobilaženja prepreka L-kutijom	81
Tablica 13: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće	82
Tablica 14: Rezultati međulaboratorijskih ispitivanja tlačne čvrstoće	83
Tablica 15: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem	84

Tablica 16: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem	84
Tablica 17: Rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona.....	85
Tablica 18: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode pod tlakom	86
Tablica 19: Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje	87

1. UVOD

Na ljestvici najviše korištenih materijala, drugi po redu je upravo beton s godišnjom proizvodnjom od nevjerovatnih 10 – 12 milijardi tona. Beton je građevinski materijal 20. stoljeća, a zahvaljujući svim svojim prednostima, zasigurno će biti vodeći građevinski materijal i ovog stoljeća.

Samoslijegajući beton (engl. *Self.Compacting Concrete – SCC*) je beton kojeg karakterizira dobra sposobnost tečenja pod utjecajem vlastite težine, popunjavanje teško dostupnih mjesta u oplati i prolazak kroz gusto složene armaturne šipke, a da pritom zadržava svoju homogenost bez pojave segregacije za vrijeme i nakon ugradnje.

Općepoznato je da samoslijegajući beton ima veliku fluidnost tj. sposobnost tečenja, dobru sposobnost zaobilazanja prepreka i otpornost segregaciji. U usporedbi sa običnim betonom, osjetljiviji je na promjene sastava betonske mješavine zbog kombinacije različitih zahtjeva koje samoslijegajući beton mora ispuniti, kompliciranijeg projektiranja sastava betonske mješavine te niže granice tečenja i viskoznosti.

U sastav betonske mješavine samoslijegajućeg betona ulaze cement, agregat, aditivi i voda, kao i u sastav običnog betona. Uz navedeno, samoslijegajući beton u svom sastavu sadrži i neke od mineralnih dodataka kao što su pucolanski materijali, leteći pepeo, mikrosilika, metakaolin te kemijski dodaci koji poboljšavaju svojstva betona kao što su tečenje, otpornost segregaciji, trajnost i sl. Tradicionalno agregat za beton se sastoji od sitnog i krupnog agregataa različite gradacije. Danas postoji sve veći interes za alternativne zamjene agregata, a glavni potencijal za zamjenu je reciklirani betonski agregat (RBA). Samoslijegajući beton s RBA je samoslijegajući beton u kojemu je dio prirodnog agregata zamijenjen recikliranim ili kombinacijom i drugih vrsta agregata.

U ovom radu prikazani su ekološki i ekonomski aspekti uporabe recikliranog betonskog agregata te analiziran utjecaj određenog udjela takvog agregata na fizička i mehanička svojstva

samoslijegajućeg betona s RBA. Ispitana su svojstva mješavina samoslijegajućeg betona s 30% i 50% masenog udjela RBA.

2. GOSPODARENJE GRAĐEVINSKIM OTPADOM

2.1. Ekološki aspekti

Može se reći kako je beton najzastupljeniji materijal u građevinarstvu nastao kao težnja čovječastva da proizvede materijal koji je čvrst, jeftin i čija će svojstva pridonijeti brzom i jeftinoj gradnji, a s druge strane omogućiti prihvatljiv vijek trajanja građevine. Godišnja proizvodnja betona doseže količine od desetak milijardi tona godišnje, što rezultira rekordnim razinama potrošnje prirodnog agregata.

Uz sve veće prihvaćanje održivog razvoja kao nove vrijednosti, zapažen je štetni utjecaj građevinske industrije na okoliš jer izgradnja po prirodi nije ekološka djelatnost. Da bi to potvrdili, istraživači su pružili sveobuhvatne preglede prouzročenih negativnih učinaka građevinskih aktivnosti. Uglavnom su to propadanje zemljišta, iscrpljivanje prirodnih resursa, stvaranje otpada, emisija CO₂ i razni oblici zagađenja kako fizičkih, kemijskih i vizualnih, pa čak i promjena klime.

Među brojnim negativnim utjecanima često je generiranje građevinskog otpada koji čini ogroman udio ukupnog čvrstog otpada doprinoseći degradaciji okoliša. Zbog svoje nezapaljive prirode, građevinski otpad obično završava na odlagalištima otpada. Građevinski otpad nastaje građenjem novih građevina, bilo nad ili pod zemljom, rušenjem postojećih objekata ili rušenjem objekata uslijed prirodnih katastrofa.

Postoje dva generička pristupa pri postupanju s građevinskim otpadom. S tehničkog gledišta inženjeri zaštite okoliša istražuju tehnologije koje mogu pomoći pri smanjenju količine otpada, ponovnoj upotrebi ili reciklaži građevinskog otpada, odnosno uvođenjem prefabrikacije, korištenjem metalne oplata i korištenjem recikliranog agregata za različite betonske primjene. Uvažavajući da je građevinski otpad i društveno pitanje, drugi generički pristup uključuje gospodarstvo ili upravljačke mjere koje su sve više prisutne. Javna politika regulira građevinsku djelatnost s ciljem smanjenja njezinih negativnih utjecaja na prirodni okoliš za javno dobro, što uključuje zakone, pravilnike, propise, kodekse ponašanja i inicijative koje pokreću. Svjedoci smo težnji reduciranja upotrebe prirodnih materijala dodatnim poticanjima i

drugim propisima članica Europske unije, kojima se potiče povećanje upotrebe recikliranih materijala, što pridonosi buđenju ljudske svijesti o zaštiti okoliša i prirodnih resursa. Ovakvim propisima, mjerama destimulira se upotreba prirodnih materijala i potiče primjena recikliranih materijala (Žuža, 2012.).

Iz svega rečenog može se zaključiti da glavni cilj zaštite prirodnih resursa leži u pronalascima alternativa kako novih izvora sirovina, tako i njihove primjene u građevinarstvu.

2.2. Ekonomsko stajalište

Do danas se gospodarenje čvrstim građevinskim otpadom svodilo na zbrinjavanje otpada na odlagalištima. Međutim, povećanje veličine ovih odlagališta na račun potencijalno ekonomski vrijednijih lokacija je gospodarski problem.

Gradnja novih objekata uglavnom se odnosi na rušenje manje ili više dotrajalih postojećih objekata, čije je obnavljanje skupo, pa je njihovo rušenje i izgradnja novih zgrada isplativije s ekonomskog stajališta.

Rušenje često omogućuje ponovnu obradu i korištenje materijala. Recikliranjem građevinskog otpada također se štedi na troškovima prijevoza i zbrinjavanja. Važno je napomenuti da u ovom slučaju nije potrebno ishoditi dozvolu za zbrinjavanje građevinskog otpada, što uvelike smanjuje troškove za investitore.

Ekonomske prepreke mogu se prevladati primjenom načela “zagađivač plaća” – *Polluter pays principle*- koje potiče recikliranje i korištenje recikliranog agregata.

Troškovi pri upotrebi recikliranog agregata stukturirani su prema troškovima:

- pripreme objekta za rušenje
- rušenja
- odvoženja materijala na mjesto zbrinjavanja takvog otpada

- odvoženja materijala do postrojenja za reciklažu
- proizvodnje recikliranog materijala
- transporta do gradilišta.

Da bi reciklirani agregat bio konkurentan na tržištu, mora se prodavati po puno nižoj cijeni od prirodnog agregata. Trenutačno je primjena recikliranog agregata u niskogradnji opravdana, a s obzirom na količinu dodatnih istraživanja koja je potrebna te cijenu i višu kvalitetu prirodnog agregata, nema snažnog ekonomskog opravdanja za njegovu primjenu u visokogradnji (Žuža, 2012.).

2.3. Gospodarenje građevinskim otpadom

Održivo gospodarenje građevinskim otpadom može značajno smanjiti njegov negativan utjecaj na okoliš. Temeljna načela upravljanja kvalitetom su smanjenje masovne proizvodnje novog otpada, pronalaženje načina za recikliranje i ponovnu uporabu postojećeg otpada te sigurno i ekonomski prihvatljivo odlaganje neželjenog otpada.

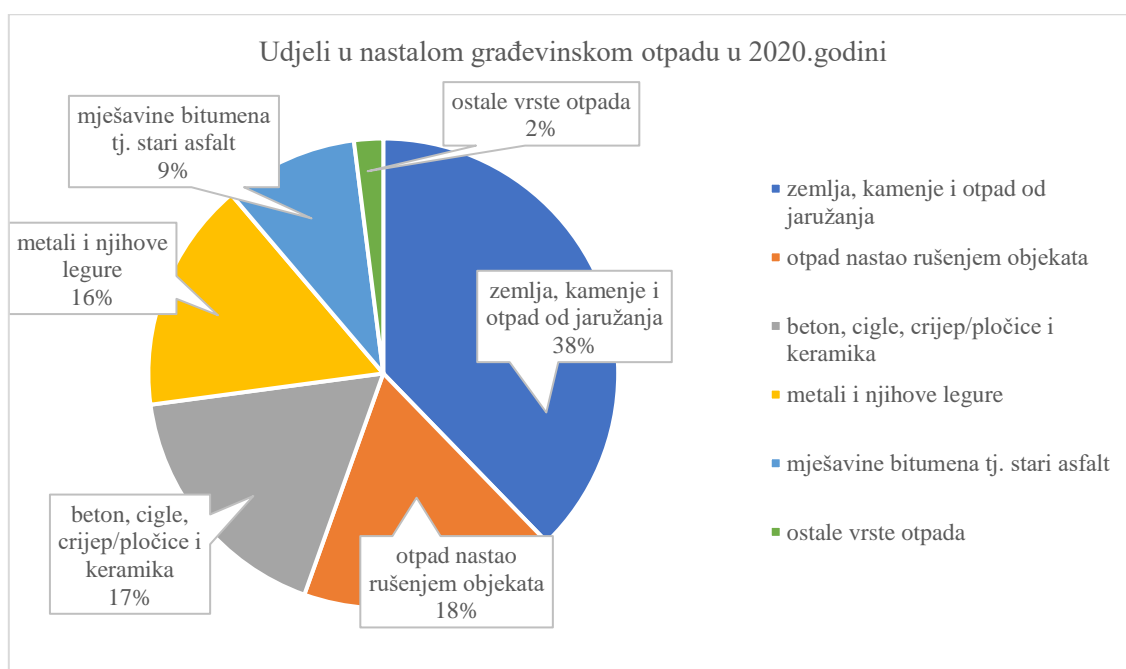
Budući da je svjetski trend korištenje recikliranih materijala u svim područjima ljudskog djelovanja, to se odnosi i na građevinarstvo. U hrvatskoj građevinskoj praksi potrebno je u proizvodni proces uključiti reciklirani građevinski otpad.

Građevinski otpad se prema Zakonu o gospodarenju otpadom (NN 94/13, 73/13, 14/19, 98/7) definira kao posebna kategorija otpada tj. definira se kao otpad nastao prilikom gradnje građevina, rekonstrukcije, uklanjanja i održavanja postojećih građevina i otpad nastao od iskopanog materijala, koji se ne može bez prethodne uporabe koristiti za građenje građevine zbog čijeg građenja je nastao. Prema Pravilniku o katalogu otpada (NN 90/2015) građevinski otpad se svrstava u grupu 17 i dijeli se na:

- beton, cigle, pločice i materijali na bazi gipsa,
- drvo, staklo i plastika,
- mješavina bitumena, ugljeni katran i proizvodi koji sadrže katran,

- metali i njihove legure,
- zemlja, kamenje i materijali iz iskopa,
- ostali građevinski otpad i otpad od rušenja objekta.

Iz izvješća Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske o gospodarenju građevinskim otpadom u 2020. godini vidljivi su podaci o procijenjenim količinama građevinskog otpada, prijavljenim količinama i vrstama građevinskog otpada koji je na bilo koji način oporabljen, zbrinut ili mu je ukinut status otpada. Ukupna količina građevinskog otpada koji je nastao u 2020. godini procijenjen je na 1.399.192,7 t, što čini porast od 2,5% u odnosu na prethodnu godinu. U ukupnoj količini građevinskog otpada, procijenjeno je da najveći udio čini zemlja, kamenje i otpad od jaružanja s 37,7%, te miješani građevinski otpad i otpad nastao rušenjem objekata s 17,7%. Na slici 1. prikazani su udjeli građevinskog otpada u ukupnoj količini za 2020. godinu.



Slika 1: Udjeli u nastalom građevinskom otpadu u 2020. godini (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2021.)

Ciljana stopa oporabe građevinskog otpada, prema Okvirnoj direktivi o otpadu (2008/98/EU), do 2020. godine iznosi 70% mase ove kategorije otpada. Podaci ukazuju na smanjenje stope oporabe građevinskog otpada i to za 7% u odnosu na prethodnu 2019. godinu. Dakle, u 2020. godini izračunata stopa oporabe građevinskog otpada iznosi 60,2%, dok se je u prethodnoj godini vidljiva stopa oporabe od 67,3%. Razlog smanjenja oporabe građevinskog otpada koji se nameće jeste zagrebački potres. Otpad koji je nastao kao posljedica zagrebačkog potresa još uvijek nije adekvatno obrađen zbog velikih količina koje su skladištene kod obrađivača. Svakako prema ovom izvješću u 2021. godini očekivan je daljni napredak u recikliranju i ponovnoj upotrebi građevinskog otpada.

Prema privremenim podacima Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja o gospodarenju građevinskim otpadom u 2021.godini prijavljeno je ukupno 653.197 t nastalog građevinskog otpada. U odnosu na 2020. godinu vidljivo je povećanje količine zemlje i kamenja od iskopa za 108%, starog asfalta za 14%, željeznih metala za 13%, stakla za 17% i smanjenje miješanog građevinskog otpada nastalog rušenjem objekata za 36%, mješavine betona, cigle, crijeva/pločica i keramike, koje sadrže opasne tvari za 25% i betona za 44%.

Trenutno govorimo o privremenim podacima iz razloga što će konačno Izvješće o gospodarenju građevinskim otpadom biti objavljeno u listopadu 2022. godine. Također, u tekstu se spominju uvijek procijenjene količine jer je prijava otpada u Registar onečišćavanja okoliša od strane proizvođača otpada nedostatna. U nastavku su prikazane procijenjene količine nastalog građevinskog otpada za razdoblje od 2015. do 2020. godine (Slika 2) i količina obrađenog građevinskog otpada za razdoblje od 2015. do 2021. godine (Slika 3). Kada govorimo o podacima na slici 3 bitno je napomenuti da se radi o podacima koji nisu temeljeni na procjenama već na prijavama obveznika Registra onečišćavanja okoliša i drugim propisanim izvještajnim obavezama.

Godina	Procijenjena količina nastalog građevnog otpada (t)
2015.	1.189.316,0
2016.	1.226.072,9
2017.	1.225.263,0
2018.	1.243.642,3
2019.	1.365.066,0
2020.	1.399.192,7
2021.	(nije još procijenjeno)

Slika 2: Procijenjene količine građevinskog otpada za razdoblje od 2015. do 2020. godine

Godina	Obrađeni otpad na području RH (t)
2015.	881.554,7
2016.	879.000,0
2017.	994.644,5
2018.	911.442,5
2019.	1.076.662,0
2020.	1.144.214,2
2021.	1.430.714,7

Slika 3: Količina obrađenog građevinskog otpada za razdoblje od 2015. do 2021. godine

U Republici Hrvatskoj postoje zakoni, pravilnici i uredbe kojima se potiče na zbrinjavanje, recikliranje i ponovnu uporabu građevinskog materijala. Neki od tih su:

- Zakon o gospodarenju otpadom (NN 84/21),
- Zakon o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/2013)
- Pravilnik o gospodarenju otpadom (NN 81/20)
- Pravilnik o građevnom otpadu i otpadu koji sadrži azbest (NN 69/2016)

Svi ovi zakoni, pravilnici i uredbe daju pozitivne rezultate u smislu povećanja recikliranja, obrade, uporabe i zbrinjavanja građevinskog otpada što je vidljivo iz podataka na slici 3. Svakako potrebno je i dalje raditi na unapređenju sustava zbrinjavanja, recikliranja i uporabe ovakvog otpada kako bi se postizali što bolji rezultati odnosno ostvarivali ciljevi propisani prema Okvirnoj direktivi o otpadu (2008/98/EU).

3. OPĆENITO O SAMOSLIJEGAJUĆEM BETONU

Beton je građevinski materijal kojeg opisujemo kao heterogen i kompozitan materijal. Dobiva se miješanjem osnovnih triju sastojaka, a to su: cement, agregat i voda. Često se dodaju i drugi sastojci kao što su aditivi i mineralni dodaci kojima se omogućava poboljšanje karakteristika betona. Osim svih ovih sastojaka, u betonu je uvijek prisutan zrak. Miješanjem cementa i vode dobiva se cementa pasta, koja započinje vrlo složen i dugotrajan kemijski proces hidratacije odmah nakon miješanja. Proces hidratacije omogućava cementnoj pasti da pređe u cementni kamen, koji s vremenom očvršćuje.

Postoji više tipova cementa koji često sadrže kemijski aktivne dodatke (pucolani, zgure) ili neke druge kemijski inertne dodatke (punila), koji fizikalno modificiraju svojstva betona. U današnje vrijeme dodaju se i razni polimeri, vlakana i drugi dodaci, s pomoću kojih se uvelike mijenjaju osnovna svojstva betona kao npr. skupljanje, čvrstoća, puzanje i dr. Postizanje zadovoljavajućih svojstava betona ovisit će o odabiru odgovarajućeg udjela osnovnih sastojaka betona, te odgovarajućih dodataka bilo mineralnih ili kemijskih (Žuža, 2012.).

3.1. Razvoj samoslijegajućeg betona

Samoslijegajući ili samozbijajući beton, engl. *self-compacting concrete (SCC)*, je relativno nova vrsta betona razvijena u kasnim 1980-tim godinama u Japanu. Razvoj ove vrste betona potaknut je problemom trajnosti betonskih konstrukcija odnosno ostvarenje trajnosti betonskih konstrukcija uvjetovano je dovoljnim brojem kvalificiranih građevinskih radnika prilikom zbijanja betona. Pojavom problema smanjenja radnika u oblasti građevinarstva u Japanu potaknuto je razvijanje i izvođenje samoslijegajućeg betona. Začetnicima razvitka samoslijegajućeg smatraju se Okamura, Ozawe i Maekawa. Okamura je 1986. godine ukazao na neophodnost ove vrste betona, dok su Ozawe i Maekawa proveli studije za razvoj samozbijajućeg betona kao i temeljne studije o obradivosti ove vrste betona na sveučilištu u Tokiju.

Prvi prototip samoslijegajućeg betona napravljen je korištenjem postojećih materijala na tržištu te je bio dovršen 1988. godine. Svojstva koja se mogu okarakterizirati kao zadovoljavajuća ogledala su se u odnosu na sušenje i skupljanje, toplinu hidratacije, gustoću (nakon očvršćivanja) i dr. Takav beton je bio nazvan betonom visokih svojstava te su se svojstva definirala kao svojstvo samozbijanja u svježem stanju, izbjegavanje inicijalnih defekata u ranoj starosti i otpornost na vanjske utjecaje u očvrslom stanju.

Kako i sam naziv betona kaže, ovaj beton karakterizira tečenje kojim beton u potpunosti zapunjava oplatu bez upotrebe bilo kojeg vibracijskog uređaja. Dakle, ova vrsta betona se zbija samo pod utjecajem vlastite težine odnosno gravitacije.

Razvijanje ove vrste betona potaknuto je problemom trajnosti armiranobetonskih konstrukcija. Pojava segregacije na mikrorazini uočena je vađenjem velikog broja uzoraka iz armiranobetonskih konstrukcija. Znanstvenici su se vodili mišlju kako će se ovakva vrsta betona jednostavno izrađivati zbog svoje tekuće konzistencije i već prisutnog korištenja pri podmorskom betoniranju. No, samoslijegajući beton nije mogao biti primjenjiv na zraku jer nije postojala mogućnost eliminiranja zahvaćenih mjehurića zraka koja je posljedica velike viskoznosti te nije bilo moguće zadovoljiti zbijenost betona u slučajevima kada govorimo o području s gusto složenom armaturom (Glibo,2016.).

U Europi primjena samoslijegajućeg betona počinje 90-tih godina prošloga stoljeća prema japanskim smjernicama i iskustvima. Bitan sastojak betonske mješavine samoslijegajućeg betona jest nova generacija superplastifikatora kojom je omogućeno projektiranje sastava betonske mješavine koja zadovoljava potrebne uvjete viskoznosti i granice tečenja (Štimer i Pečur, 2009.).

Izgradnja cestovne mreže u Švedskoj bio je prvi važniji europski projekt prilikom čijeg su projektiranja i izvođenja znanstvenici u Švedskom istraživačkom institutu (Concrete Research Institute CBI) proučavali ovu vrstu betona. Bitno je spomenuti *udruženje Europskih proizvođača samoslijegajućeg betona* (EFNARC) čiji se doprinos ogleda u primjeni ove vrste betona. Razvili su specifikacije i smjernice za uporabu samoslijegajućeg betona. Radili su i na

područjima vezanim uz odabir materijala, recepture mješavina i važnosti metoda ispitivanja. Godinama nakon objavljivani su mnogi znanstveni radovi, održane mnoge konferencije vezane uz ovu vrstu betona što je rezultiralo sve većom primjenom samoslijegajućeg betona u građevinskoj praksi.

Nužnost razvoja samoslijegajućeg betona ogleda se u podacima o sve većem korištenju ove vrste betona na značajnim objektima i to ne samo u Japanu nego i u cijelom svijetu (Lovrić, 2016.).

3.2. Svojstva samoslijegajućeg betona

Projektiranju sastava samoslijegajućeg betona potrebno je pristupiti na način da se prepoznaju krajnji zahtjevi koje beton treba ispuniti. U skladu s Europskim smjericama (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.) potrebno je pratiti zahtjeve kao što su:

- razred tlačne čvrstoće
- maksimalna veličina zrna agregata D_{max}
 - razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava
 - maksimalni vodocementni faktor
 - minimalna količina cementa
- dodatni zahtjevi za samoslijegajući beton
 - rasprostiranje slijeganjem,
 - viskoznost
 - sposobnost zaobilazanja prepreka
 - otpornost segregaciji
 - temperatura svježeg betona
- drugi tehnički zahtjevi.

Svojstva samoslijegajućeg betona koja treba provjeriti u svježem stanju su:

- tečenje - prirast deformacija bez povećanja naprezanja; procjenjuje se metodom slijeganja rasprostiranjem (Slump flow)

-
- viskoznost –otpor materijala tečenju; procjenjuje se mjerenjem u reometru ili empirijskim postupcima kao što su ispitivanje uz pomoć V-lijevka, određivanjem parametra T_{500} , O-lijevka, Orimet
 - sposobnost zaobilaznja prepreka –sposobnost svježeg samoslijegajućeg betona da teče i zaobilazi gustu amaturu, popunjava oplatu i pritom ne dolazi do segregacije;procjenjuje se ispitivanjem L kutijom
 - otpornost segregaciji –postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu.

Tečenje i viskoznost su dvije osnovne karakteristike sposobnosti popunjavanja oplata samoslijegajućim betonom. Viskoznost je uvelike uvjetovana udjelom superplastifikatora u mješavini. (Štimur i Pečur, 2009.)

Prednosti samoslijegajućeg betona su:

- smanjeni troškovi opreme i radne snage
- bolja obradivost
- jednostavno ugrađivanje
- ekonomičnost i učinkovitost
- smanjenje buke na gradilištu.

Nedostaci samoslijegajućeg betona su:

- uslijed nekvalitetne i loše zabrtvljene oplata dolazi do procurivanja betona kroz opladne spojeve
- cijena – samoslijegajući beton je skuplji od običnih betona jer zahtijeva posebnu tehnologiju izvedbe i kontrolu kvalitete (Rukavina, 2021.)

3.3. Primjena samoslijegajućeg betona

Svjedoci smo današnje primjene samoslijegajućeg betona u svim područjima građevinarstva i svim vrstama elemenata uz praćenje propisanih specifikacija.

Niskogradnja i visokogradnja

Diljem svijeta rasprostranjena je primjena samoslijegajućeg betona, pogotovo u Japanu gdje se još od 1980. godine koristi samoslijegajući beton u izgradnji infrastrukturnih građevina. Pojava smanjenja broja radne snage, sve brža izgradnja, ideje arhitekata u izvođenju neobičnih elemenata dovele su do razvitka i primjene ove vrste betona. Dakle, ova vrsta betona omogućila je praćenje neobične željene geometrije građevina koje i danas okupiraju pažnju promatrača. Primjer jedne građevine nalazi se na slici 4 i to je vrlo poznata Burj Khalifa.



Slika 4: Burj Khalifa (*shimanovskadm.ru*)

Tunelogradnja

Samoslijegajući beton je savršeno rješenje za popunjavanje oplata profila tunela. Popunjavanje oplata profila tunela izvodi se tako da se s jedne strane tunela upumpava beton, a na vrhu izlazi betonska mješavina te je potrebno osigurati odzračivač. Na slici 5 prikazan je tunel Sodra Lanken u Švedskoj.



Slika 5: Tunel Sodra Lanken (sv.wikipedia.org)

Ploče, podovi i zidovi

Ekonomičnost je prvi bitan razlog zašto je opravdano koristiti samoslijegajući beton prilikom izrade ovih elemenata. Ekonomičnost se ogleda u manjku utrošenog materijala i kraćem vremenu izvođenja. Također, potrebno je osigurati dobru popunjenost oplata kod tankih i gusto armiranih elemenata.

Sanacije

Samoslijegajući beton je vrlo pogodan za korištenje prilikom saniranja određenih konstruktivnih elemenata iz razloga što je jednostavno upumpati samoslijegajući beton u oplatu. Samoslijegajući beton će vrlo lako popuniti oplatu i dio koji je potrebno sanirati te nema potrebe za vibiranjem.

3.4. Projektiranje sastava samoslijegajućeg betona

U usporedbi s običnim betonom, samoslijegajući beton ima manji udio krupnozrnatog agregata, manji je vodocementni omjer, povećan je udio cementne paste i udio superplastifikatora, a prema potrebi moguće je dodati i dodatak za reguliranje viskoznosti. Karakteristike betonske mješavine kao što su fluidnost i viskoznost postići će se ukoliko se

pažljivo odaberu cement i dodatak, uz ograničavanje omjera vode i sitnih čestica te dodavanje superplastifikatora i eventualno dodatka za reguliranje viskoznosti (Štimer i Pečur, 2009.). Glavni sastojci betonske mješavine moraju zadovoljiti opće norme za obični beton (Rukavina, 2021.). Agregat čini gotovo tri četvrtine ukupnog volumena određene mase betona (Žuža, 2021.). Preporučuje se upotreba agregata najvećeg zrna $D_{\max} = 12 - 20$ mm, no u praksi se najčešće vodimo time da najveće zrno agregata D_{\max} ne bude veće od 16 mm (Štimer i Pečur, 2009.). Preostala četvrtina prostora biti će zapunjena cementnim kamenom. Agregat je temeljni materijal koji betonu daje čvrstoću i omogućuje njegovo korištenje kao konstrukcijsko gradivo. Dodaci betonu nisu toliko značajni po volumenu, nego se njihova važnost ogleda u djelotvornosti na svojstva svježeg i očvrslog betona (Žuža, 2012.).

Metoda za projektiranje sastava samoslijegajućeg betona nastala na temelju istraživanja na Sveučilištu u Tokiju jedna je od prvih ovakvih metoda i njeni osnovni principi se i danas primjenjuju. Osnovni principi projektiranja su:

- volumen krupnog agregata u betonu ne prelazi 50%
- sve čestice veće od 0,09 mm smatraju se agregatom, a manje od 0,09 mm vezivom
- vodovezivni omjer i količina superplastifikatora određuju se ispitivanjem viskoznosti metodom V-lijevka
- preporučena vrijednost slijeganja rasprostiranjem iznosi 650 mm i prema tome se prilagođava udio superplastifikatora.

Europske smjernice za projektiranje sastava samoslijegajućeg betona daju i prijedlog okvirne vrijednosti glavnih sastojaka betonske mješavine. Bitno je naglasiti da mnoge uspješne mješavine samoslijegajućeg betona prekoračuju vrijednosti iz tablice 1.

Tablica 1: Karakteristične količine komponenti samoslijegajućeg betona (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)

Komponenta	Karakteristični raspon masenih vrijednosti ((kg/m³))	Karakteristični raspon volumnih vrijednosti (l/m³)
Prah	380 – 600	
Pasta		300 – 380
Voda	150 – 210	150 – 210
Krupni agregat	750 – 1000	270 – 360
Sitni agregat	vrijednost ovisi o volumenu ostalih komponenti; najčešće 48-55% ukupne mase agregata	
v/v		0,85 – 1,10

Projektiranju sastava samoslijegajućeg betona može se pristupiti na više načina. Uobičajeno se projektiranje sastava betonske mješavine zasniva na sljedećem:

- određivanju količine vode i optimiziranju tečenja i stabilnosti paste
- određivanju udjela pijeska i dodataka betonu
- ispitivanju osjetljivosti na vrlo male promjene u količinama sastojaka
- određivanju potrebne količine krupnog agregata
- proizvodnji betona u laboratoriju te ispitivanju zahtijevanih svojstava svježeg betona

-
- ispitivanju svojstava očvrstnalog betona
 - proizvodnji probne mješavine u betonari.

Ukoliko izradom probne mješavine ne zadovoljimo tražene specifikacije, potrebno je ponoviti postupak projektiranja mješavine. Neka od rješenja koja se nude s obzirom na nedostake i uočene pogreške su:

- prilagodba vodovezivnog omjera i omjera cementa i veziva
- ispitivanje tečenja i ostalih svojstava paste
- korištenje drugog aditiva
- prilagodba omjera sitnog agregata i superplastifikatora
- korištenje regulatora viskoznosti
- prilagodba omjera i granulacije krupnog agregata.

3.4.1. Cement

Cement je, prema hrvatskoj normi HRN EN 197-1, hidrauličko vezivo odnosno praškasti materijal anogranskog porijekla koji dodavanjem vode te uz pomoć kemijskih reakcija i pratećih fizikalnih procesa, prelazi u čvrstu cementnu pastu ili cementni kamen. Kao i kod drugih vrsta betona, cement mora biti u skladu sa preporukama proizvođača i zahtijevanim svojstvima projektanta. Prilikom projektiranja sastava samoslijegajućeg betona, zbog velike količine praškastih materijala, pa i veće količine cementa, potrebno je koristiti miješane portland cimente CEM II ili CEM I u kombinaciji sa mineralnim dodacima. Na reološka svojstva betona utječu svojstva cementa i to finoća mliva i sadržaj trikalcijskog silikata (C_3S). Trikalcijski silikat (C_3S) je najvrijedniji cementni mineral koji brzo razvija čvrstoću, te doprinosi krajnjoj čvrstoći cementa. Negativna strana finoće i većeg sadržaja C_3S jeste da se povećava plastična viskoznost tj. smanjuje se sposobnost rasprostiranja.). Udruženje proizvođača samoslijegajućeg betona *EFNARC* preporučuje da dozvoljeni sadržaj trikalcijskog

silikata (C_3S) ne smije biti veći od 10%. Ukoliko premašuje tu vrijednost, stvarat će probleme vezane uz obradivost betona. Također, prema preporukama *EFNARC-a* dozvoljena količina cementa je $350-450 \text{ kg/m}^3$. Ukoliko je premašena ta vrijednost doći će do problema povećanog skupljanja (Lovrić, 2016.).

3.4.2. Agregat

Agregat je mješavina kamenih zrna raznih veličina i čini 60-80% volumena betona. Postoje različite vrste agregata koje se primjenjuju i to su prirodni, umjetni i reciklirani (Slika 6).



Slika 6: Vrste agregata (Bjegović i Štirmer, 2015)

Agregat koji se koristi prilikom projektiranja sastava samoslijegajućeg betona je najčešće prirodni ili drobljeni, maksimalne veličine zrna $D_{\max}=20 \text{ mm}$ (u Republici Hrvatskoj 16 mm). Također, prilikom projektiranja sastava agregat dijelimo na krupni i sitan agregat (pijesak).

Agregat čija je frakcija veličine $4-8 \text{ mm}$ i $8-16 \text{ mm}$ naziva se krupnim agregatom, dok se sitnim agregatom naziva agregat frakcije $0-4 \text{ mm}$. Glavni uvjet koji određuje maksimalnu veličinu zrna jeste razmak širki armature i zaštitni sloj betona od oplata. Na svojstva samoslijegajućeg betona više utječe sitni agregat, nego krupni. Cementna pasta sa svojim sitnim česticama manjim od $0,125 \text{ mm}$ „podmazuje“ zrna krupnog agregata i na taj način smanjuje kut unutarnjeg trenja čestica. Smanjen kut unutarnjeg trenja može se postići i diskontinuiranom granulometrijskom krivuljom. Onaj dio agregata koji je sitniji od $0,125 \text{ mm}$ naziva se punilom,

filerom ili praškastom frakcijom. Također, agregati moraju ispunjavati sve opće i posebne zahtjeve koji su bitni za krajnju namjenu betona. Granulometrijski sastav samoslijegajućih betona karakteriše veliki udio sitnih čestica (Lovrić,2016.).

3.4.3. Voda

Voda je ključan sastavni element betona, a njen utjecaj ogleda se u fazama izrade i pripreme betona. Voda za izradu betona mora biti kemijski čista tj. ne smije sadržavati određene primjene koje štetno djeluju na beton, što se dokazuje kemijskim analizama ako ne koristimo vodu za piće.

Omjerom mase vode i cementa (v/c) odnosno vodocementnim omjerom obično se izražava količina vode u svježem betonu. (Žuža, 2012.) Samoslijegajući beton karakterizira niži v/c omjer (0,38-0,4).

3.4.4. Dodaci betonu

Dodaci betonu dodaju se kako bi se poboljšala svojstva betona, prije ili za vrijeme miješanja betonske mješavine. Dije se na kemijske, mineralne i vlakna za mikroarmiranje. Za pripremu mješavina samoslijegajućeg betona najčeće se koriste sljedeći dodaci:

- kemijski dodaci:
 - superplastifikatori
 - regulator viskoznosti
- mineralni dodaci:
 - punilo ili filer
 - leteći pepeo
 - silicijska prašina
 - metakaolin
 - zgura.

Superplastifikatori (reduktori vode visokog stupnja) - čija je uloga smanjenje vode u visokom stupnju bez utjecaja na konzistenciju betonske mješavine, značajno povećanje slijeganja odnosno rasprostiranja betonske mješavine bez utjecaja na sadržaj vode ili kombinacija oba slučaja (Savić, 2015.).

Regulator viskoznosti – kako sam naziv kaže mijenja viskozitet tj. plastičnu viskoznost. Dodaje se često betonima kako bi se poboljšala svojstva pumpanja betona (pumpabilnost) koji nemaju dovoljan viskozitet cementne paste (iz razloga što je vrlo malo cementa ili je prisutna velika količina superplastifikatora) (Lovrić, 2016.)

Punilo ili filer su sitne čestice frakcije 0,125 do 0,063 mm iako je najpovoljnija frakcija 0,063 mm. Punilo ili filer jeste inertni ili poluinertni mineralni dodatak dobiven iz vapnenca, dolomita i dr. Ovaj mineralni dodatak dodaje se betonu ukoliko želimo poboljšati obradljivost betona. Kada govorimo o samoslijegajućem betonu bitno je napomenuti da prilikom korištenja punila ili filera može doći do potrebe za većom količinom vode. Ukoliko se koristi punilo ili filer na bazi kalcijevog karbonata mogu se očekivati dobra reološka svojstva samoslijegajućeg betona.

Leteći pepeo nastao kao sekundarni produkt u savremenim termoelektranama spada u industrijski mineralni dodatak prema postanku, a prema svojstvu, zbog svog aktivnog sudjelovanja u procesu hidratacije cementa spada u pucolane. Leteći pepeo nastaje kao sekundarni produkt u savremenim elektranama čiji je pogon na uglj. Kao takav nusprodukt on prethodno mora biti samljeven. Karakterizira se kao fini prah sferičnog oblika čestica. Nastaje prilikom izgaranja ugljene prašine i/ili uz sekundarne materijale za izgaranje.

Leteći pepeo se dodaje betonu ukoliko želimo:

- smanjiti potrebu za vodom i/ili izdvajanje vode,
- poboljšati obradljivost i nepropusnost betona,
- usporiti oslobađanje topline hidratacije.

Potrebno je biti oprezan prilikom korištenja letećeg pepela u mješavini betona jer postoji mogućnost da mješavina postane vrlo kohezivna i otporna na tečenje.

Silicijska prašina (mikrosilika ili silikatna prašina) isto kao i leteći pepeo, prema postanku svrstavamo u industrijske mineralne dodatke, a prema svojstvu, zbog svog aktivnog učešća u procesu hidratacije cementa, u pucolane. Zbog svih svojih karakteristika, karakteriziramo ju kao najkvalitetniji pucolan s najvećom pucolanskom aktivnošću. Nastaje kao nusprodukt proizvodnje silicijskih i ferosilicijskih legura. Prilikom proizvodnje silicijske prašine zahtijevaju se i određena fizikalna svojstva kao što su: indeks aktivnosti, specifična ploština i sadržaj suhe tvari u mulju.

Silicijska prašina se dodaje betonu ukoliko želimo:

- poboljšati obradivost,
- povećati kohezivnost,
- zapuniti unutrašnju strukturu (čestice cementa su puno veće od čestica silicijske prašine),
- poboljšati otpornost na segregaciju (eliminirati izdvojenu vodu) (Algušić i Lavriv, 2010.).

Metakaolin se dobiva “termičkom aktivacijom” kaolinske gline. Karakterizira se kao amorfni proizvod dehidracije kaolita s visokom pucolanskom aktivnošću. Može se proizvesti i iz otpadnog taloga industrije za reciklažu papira. (Mitrović i sur., 2005)

Zgura (troska) nastaje prilikom proizvodnje željeza u visokim pećima. Zgura pliva u rastaljenom željezu po površini. Prilikom naglog hlađenja takve zgure nastaju zrnca klinkerskog oblika. Razlikuju se dva oblika i to bazični i kiseli. Razlika leži u sastavu bazičnih oksida CaO, Al₂O₃ i SiO₂. Bazična zgura sadrži minimalno 50% CaO i Al₂O₃, a stari ostatak čini SiO₂. Kisela zgura sadrži daleko manje od 50% CaO i Al₂O₃, ali zato veći udio čini SiO₂. Bazičnoj zguri se dodaju katalizatori kao što su vapno ili gips kako bi ona imala svojstva

veziva. Belit je osnovni mineral bezične zgure čiji je produkt hidratacije jako sličan ili gotovo identičan hidratu belita iz cementnog klinkera što dovodi do zaključka da su procesi hidratacije zgure i proces hidratacije portland cementog klinkera istog tipa. (Wurth, 2011.)

4. SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOSLIJEGAJUĆEG BETONA

Beton svrstavamo u složene građevinske materijale jer zahtijeva složena ispitivanja kako bi se odredila njegova svojstva. Beton kao građevinski materijal mora ispuniti dva osnovna zahtjeva, a to su:

- u svježem stanju potpuno popunjavanje oplata ili kalupa
- u očvrsлом stanju ispunjenje traženih zahtjeva kvalitete.

Kvaliteta betonske konstrukcije uvjetovan je gore navedenim zahtjevima. Ukoliko prvi zahtjev nije ispunjen, neće biti ispunjen ni drugi.

Specifičnost projektiranja samoslijegajućeg betona leži u kompleksnosti spravljanja jer ne postoje norme za projektiranje ove vrste betona. Europskim smjernicama za samoslijegajući beton (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.) dane su metode ispitivanja, osnovni zahtjevi i preporuke za proizvodnju i ugradnju i to su:

- razred tlačne čvrstoće (HRN EN 206-1)
- razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava betonske mješavine
 - maksimalni vodocementni omjer
 - minimalna količina cementa

maksimalna veličina zrna agregata D_{max} . Svojstva betona u očvrsлом stanju pod utjecajem su načina ugradnje betona, pa se svojstva betona mogu razmatrati kroz 3 zahtjeva:

- u svježem stanju zahtijeva se svojstvo samozbijanja,
- u ranoj starosti zahtijeva se izbjegavanje inicijalnih defekata
- u očvrsлом stanju zahtijeva se otpornost na vanjske utjecaje (Algušić i Lavriv, 2010.).

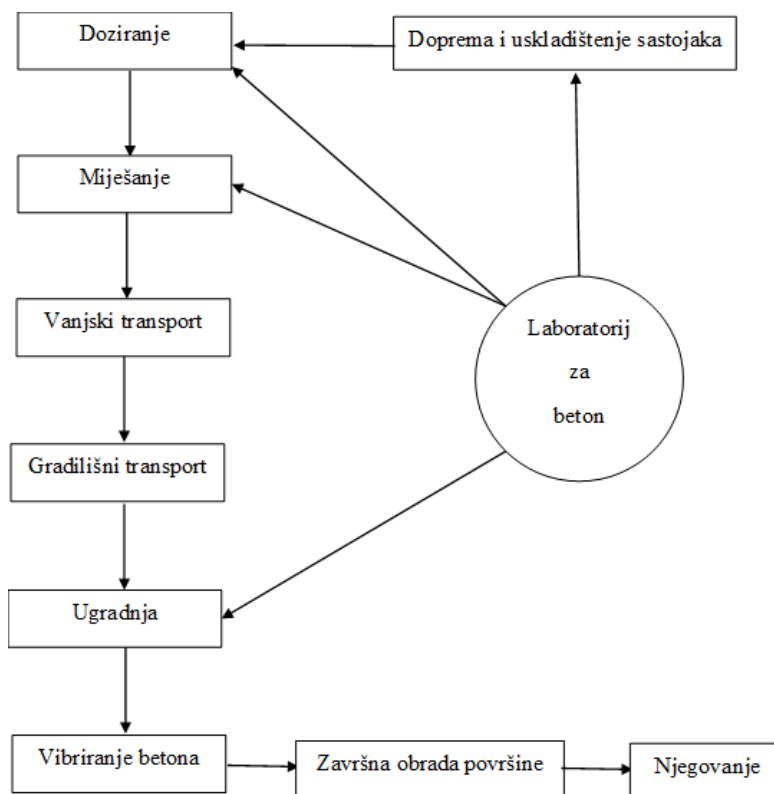
4.1. Proizvodnja, ugradnja i njega samoslijegajućeg betona

4.1.1. Proizvodnja samoslijegajućeg betona

Beton je moguće proizvoditi na gradilištu, betonarama, tvornicama prefabrikata ili u centralnim tvornicama betona. Beton se s ovih lokacija transportira na gradilište. Proizvodnja samoslijegajućeg betona ne razlikuje se tehnološki od proizvodnje običnog betona.

Proces proizvodnje betona podijeljen je u više faza koje su prikazane na slici 7:

- doprema i uskladištenje sastojaka betona
- doziranje i miješanje
- vanjski transport
- gradilišni transport
- ugradnja
- završna obrada slobodne površine betona
- njegovanje betona.



Slika 7: Shema faza u proizvodnji betona

Osnovna težnja u svim fazama proizvodnje jest dobivanje dobro izmješane i homogene mješavine planiranog sastava i traženih svojstava svježeg i očvrslog betona.

Kada se govori o proizvodnji betona, neizostavno je spomenuti poslove upravljanja proizvodnjom betona koji uključuju:

- izradu tehnoloških shema rada postrojenja
- organizaciju pripreme i provedbe poslova
- svakodnevne kontrole, umjeravanja i remonte elemenata postrojenja
- izradu tehnoloških rješenja i organizaciju transporta za pojedina betoniranja
- sudjelovanje u izradi projekta betona

- izradu planova betoniranja
- kontrola ispitivanja s obradom podataka i podešavanjima proizvodnje
- izvještavanje
- upravljanje kvalitetom.

Doziranje cementa, agregata, vode i tekućih dodataka radi se po masi. Miješanje betona ovisi o tipu miješalice i vrsti betona. Trajanje miješanja može biti od 1 do 2 minute. Beton je potrebno miješati onoliko dugo dok god se ne homogenizira tako da bi u očvrslom stanju imao podjednaka svojstva u svim dijelovima. Tako izmiješan beton ispušta se u transportno sredstvo.

Miješalice je moguće instalirati na samom gradilištu, što je jako čest slučaj. Danas prevladava centralna proizvodnja betona što podrazumijeva instaliranje miješalice velikog kapaciteta sa svim popratnim postrojenjima na jednu centralnu lokaciju od koje se onda proizvedeni beton transportira na gradilišta kao što je prikazano na slici 8.



Slika 8: Pogon za proizvodnju betona (kreativni.hr)

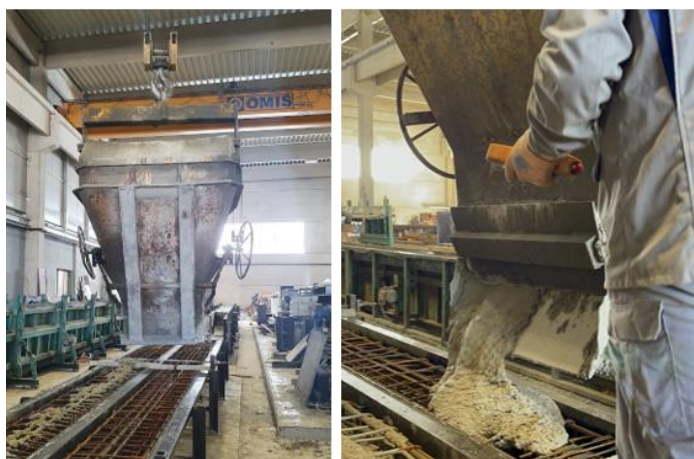
4.1.2. *Transport i ugradnja samoslijegajućeg betona*

Automiješalice (mikseri) su najčešća sredstva transporta betona od betonare (centralnog mjesta proizvodnje) do mjesta ugradnje. Automiješalice su posebno dizajnirane i konstruirane za tu namjenu. Specifičnost automiješalice jeste kruškolika posuda s betonom koja se tokom vožnje polagano okreće. Tim okretanjem beton se miješa kako ne bi došlo do zbijanja i razdvjanja komponenata betona tijekom transporta.

Transport betona može se vršiti i nekim drugim sredstvima transporta kao što su obični kamioni odnosno kamioni kiperi. Kamionom kiperom moguće je transportirati samo betone krute konzistencije tj. one koje je teško ispuštati iz automiješalice.

Prilikom transporta betona bitno je uzeti u obzir vrijeme vezivanja betona, odnosno bitno je voditi brigu o tome da beton ne počne vezati ili očvršćivati u mikseru. Transport običnog betona i samoslijegajućeg betona se ne razlikuje tehnološki, ali je bitno uzeti u obzir svojstva svježeg samoslijegajućeg betona prilikom njegovog transporta. Često samoslijegajući beton ima puno više kemijskih dodataka tj. aditiva u svom sastavu što je potrebno uzeti u obzir prilikom transporta i to na način da se svojstva i zadaci tih kemijskih dodataka dobro prouče.

Beton se, iz transportnog sredstva, prebacuje kranovima ili pumpama za beton na mjesto ugradnje. Na slici 9 prikazano je transportiranje betona kranom i uz pomoć kible.



Slika 9: Transposort betona na mjesto ugradnje kranom

Ugradnja samoslijegajućeg betona je vrlo jednostavna jer nema potrebe za vibiranjem betona što nije slučaj kod običih betona. Bitno je prilikom ugradnje betona obratiti pažnju na konzistenciju betona koji se ugrađuje kako bi se na vrijeme moglo reagirati.

4.1.3. Njega samoslijegajućeg betona

Njega samoslijegajućeg betona je ista kao i njega običnog betona, što podrazumijeva njegu betona polijevanjem vode. To je faza koja se odvija na gradilištu odmah nakon ugradnje betona. Ovisno o vremenskim uvjetima u kojima se nalazi ugrađeni beton birat će se način njegovanja betona. Njega betona je neophodna zato što voda u ugrađenom betonu ima tendenciju brzog isparavanje što uzrokuje pojave pukotina u betonu. Zbog toga je neophodno takve površine prekriti folijom ili nekim drugim paronepropusnim materijalima ili njegovati vodom. U zimskim vremenskim uvjetima tj. onda kada je temperatura nepovoljna za očvršćivanje betona, potrebno je omogućiti povoljne temperature (veće od 5°C) za taj proces odabirom odgovarajućeg njegovanja (Žuža, 2012.).

4.2. Svojstva svježeg samoslijegajućeg betona

Specifičnost samoslijegajućeg betona leži i u količini i vrstama ispitivanja koja su potrebna za određivanje svojstava svježeg betona. Kada želimo odrediti svojstva svježeg običnog betona, najčešće je dovoljno ispitati konzistenciju svježeg betona metodom slijeganja ili metodom rasprostiranja. Kada želimo odrediti svojstva svježeg samoslijegajućeg betona onda ova dva ispitivanja nisu dovoljna jer ne postoji mogućnost određivanja viskoznosti, sposobnosti zaobilaženja prepreka, te pojave segregacije. Zbog gore navedenih razloga, svojstva svježeg samoslijegajućeg betona opisuju se sljedećim ispitivanjima:

- ispitivanje konzistencije (tečenja) metodom –slijeganja rasprostiranjem
- određivanje viskoznosti
- određivanje sposobnosti zaobilaženja prepreka
- određivanje otpornosti segregaciji

- određivanje temperature svježeg betona (ukoliko se razlikuje od HRN EN 26-1)
- druga ispitivanja (čiji rezultati daju odgovore na tražene tehničke zahtjeve koje beton mora ispuniti).

U tablici 2 prikazane su preporučene metode ispitivanja i razredi samozbijajućih betona prema Europskim smjernicama za samoslijegajući beton.

Tablica 2: Preporučene metode ispitivanja i razredi samozbijajućih betona (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)

Svojstva samoslijegajućeg betona	Preporučene metode ispitivanja	Oznaka razreda
Tečenje	Rasprostiranje - slijeganjem (Slump-Flow)	SF1, SF2, SF3
Viskoznost	Vrijednost t_{500} ili V-lijevak	VS1, VS2/VF1, VF2
Sposobnost zaobilaženja prepreka	L-kutija	PA1, PA2

4.2.1. Sposobnost tečenja

Sposobnost tečenja definirana je kao prirast defomarcija bez povećanja naprezanja. Sposobnost tečenja se procjenjuje i za to se koristi metoda slijeganja rasprostiranjem (eng. *Slump flow*). Moguće je ispitivanje provesti i uz pomoć Kajimaine kutije. Metoda slijeganja rasprostiranjem je primarna metoda za provjeru konzistencije betona, te se njome opisuje tečenje betona bez prepreka. Vizualnim pogledom i mjerenjem vrijednosti t_{500} dobivaju se dodatne informacije. Prilikom ugradnje velikih količina betona na gradilištu je moguće kontrolirati konzistenciju betona upravo uz pomoć ispitivanja sposobnosti tečenja.

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-8 kojom se ispituje sposobnost punjenja i viskoznost samoslijegajućeg betona.

Za provođenje ovog ispitivanja potrebna je sljedeća oprema (slika 10):

- Abramsov kalup u bliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm
- ploča debljine minimalno 2 cm, dimenzija 90x90 cm, na kojoj je obilježen krug na središnjem dijelu ploče za nalijeganje stošca i koncentričnim krugom promjera 500 mm
- druga oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, metar.



Slika 10: Priprema uzorka za ispitivanje konzistencije slijeganja rasprostiranjem

Postupak ispitivanja:

1. postaviti ploču na ravnu i stabilnu površinu, te ju navlažiti spužvom, crijevom za vodu, krpom i sl. pazeći da se na površini ne stvori debeo film vode

2. postaviti Abramsov kalup na ploču (naopačke)
3. s pomoću lopatice napuniti kalup do vrha (beton se ne nabija, samo se s površine ravnalom ili nekim drugim predmetom zaravna površina) i maknuti višak
4. vertikalno podignuti stožac bez poremećaja uzorka i pustiti da beton slobodno isteče; istovremeno s podizanjem stošca mjeri se vrijeme potrebno da beton dosegne obilježeni krug promjera 500 mm (t_{500})
5. nakon što se beton prestao rasprostirati, mjeri se konačni promjer betona u dva okomita smjera; na osnovi prosjeka dva zabilježena promjera dobiva se vrijednost rasprostiranja slijeganjem u mm.

Također, potrebno je vizualno promotriti uzorak i provjeriti pojavljuju li se neka nepoželjna svojstva kao što su izdvajanje vode, morta ili cementne paste na rubovima i/ili nakupine krupnog agregata na određenim mjestima što bi upućivalo na pojavu segregacije.

Rezultati ispitivanja:

Što je veći razred slijeganja rasprostiranjem (SF) to je sposobnost ispunjavanja oplata pod vlastitom težinom veća. Vrijednost za samoslijegajuće betone mora biti najmanje 650 mm.

Vrijednost SF se dobiva kao srednja vrijednost izmjerenih promjera d_1 i d_2 (zaokružena na 10 mm).

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

gdje je:

SF - razred slijeganja rasprostiranjem ((mm)

d_1 - najveći promjer rasprostrtog betona (mm)

d_2 - promjer rasprostrog betona za 90° u odnosu na d_1 (mm)

U tablici 3 prikazani su razredi slijeganja rasprostiranjem i primjena samoslijegajućih betona s obzirom na SF i to sve prema Europskim smjericama iz 2005. godine.

Tablica 3: Razredi slijeganja rasprostiranjem (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)

Razred	Tečenje (mm)	Primjena
SF1	550-650	<ul style="list-style-type: none"> – nearmirane ili slabo armirane betonske strukture, – ugradnja pumpama (npr. betonska obloga), – elementi koji su kratki i ne zahtijevaju dugo horizontalno tečenje betona.
SF2	660-750	prikladno za većinu radova (npr. zidovi, stupovi)
SF3	760-850	za elemente s gusto složenom armaturom, složenog oblika

Na osnovi prikazanog u Tablici 7 vidljivo je da se teži dobivanju SF2 razreda, jer je takav beton najprikladniji za većinu radova. Samoslijegajući beton SF3 razreda proizvodi se, najčešće, s maksimalnim zrnom $D_{\max} < 16$ mm. Ovakav beton ima bolji površinski izgled nego beton SF2 razreda, no teže je kontrolirati pojavu segregacije.

Sekundarni pokazatelj je vrijeme t_{500} . Niže vrijednosti upućuju na veću protočnost. Vrijeme koje se pokazalo kao prihvatljivo za primjenu u građevinarstvu, prema nekim istraživanjima, iznosi 3 – 7 sekundi. Preporuka je da vrijeme tečenja bude 2 – 5 sekundi ukoliko se radi o primjeni na stambenim konstrukcijama. Izmjerena vrijednost t_{500} zaokružuje se na desetinku sekundi i ona opisuje viskoznost betona. Takva izmjerena vrijednost se svrstava u razrede viskoznosti prikazane u tablici 4.

Tablica 4: Razredi viskoznosti (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)

Razred	t_{500} (s)	Primjena
VS1	$<2,0$	elementi s gusto postavljenom armaturom, horizontalni elementi, elementi složenog poprečnog presjeka i oblika (velikih širina i dužina)
VS2	$\geq 2,0$	prikladan za većinu radova (zidovi, stropovi...)

Krupni agregat ima tendenciju da ostane u središnjem dijelu mase betona, a mort i cementna pasta imaju tendenciju da isteknu na rubovima ukoliko se radi o većoj segregaciji. Kod manje segregacije mort ima tendenciju odlijevanja na rubovima.

4.2.2. Viskoznost

Viskoznost je svojstvo svježeg betona koje se definira kao otpornost materijala tečenju. Može se mjeriti u reometru, ali i odrediti empirijskim postupcima kao što je ispitivanje pomoću V-lijevka. Neke od drugih metoda koje se mogu primijeniti su određivanje parametra t_{500} , O-lijevak, Orimet i dr.

Vrlo brzo tečenje na početku i potpuno zaustavljanje nakon kratkog perioda karakteristično je za betone male viskoznosti, dok je velika viskoznost karakterizirana duljim tečenjem betona. U tablici 9 prikazani su, prema Europskim smjernicama (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.), kriteriji i razredi viskoznosti samoslijegajućeg betona.

Ispitivanje V-lijevkom se vrši prema normi HRN EN 12350-9. Ovo ispitivanje je bilo osmišljeno da se uz pomoć njega mjeri protočnost, ali rezultat je pod utjecajem drugih karakteristika betona. Oblik V-lijevka odgovoran je za blokiranje betona koji sadrži previše krupnog agregata. Ukoliko nam je vrijeme protoka dugo, to može upućivati na nisku

defomabilnost zbog visoke viskoznosti paste s velikim trenjem među česticama. Učinak suženja lijevka na protok betona nije potpuno poznat.

Za provođenje ovog ispitivanja potrebna je sljedeća oprema (slika 11):

- V-lijevak
- kanta za prihvat betona
- dodatna oprema: lopatica, štoperica i dr.



Slika 11: V-lijevak

Postupak ispitivanja:

1. postaviti V-lijevak na čvrstu i ravnu površinu, te navlažiti unutarnju površinu lijevka, pazeći pri tome da su vrata na dnu kalupa otvorena kako bi se višak vode mogao odstraniti

2. zatvoriti vrata i postaviti kantu ispod lijevka
3. zapuniti u potpunosti lijevak bez nabijanja ili zbijanja betona, lopaticom poravnati i očistiti višak betona
4. pričekati desetak sekundi
5. otvoriti vrata na dnu kalupa i pustiti beton da proteče pod utjecajem vlastite težine
6. štopericu pokrenuti onog trena kada se vrata na dnu kalupa otvore; bilježi se vrijeme potrebno da se izvrši pražnjenje i to do trenutka kada se nazire svjetlost kroz lijevak odozgo gledano.

Potrebno je voditi računa o tome da se cijelo ispitivanje obavi unutar 5 min.

Rezultati ispitivanja:

Ovim ispitivanjem se ispituje sposobnost protoka betona. Kraće vrijeme protoka ukazuje na veću protočnost. Vrijeme koje se uzima kao optimalno vrijeme protoka samoslijegajućeg betona je oko 10 sekundi. Ukoliko se ispitivanjem pokaže da je protok betona kroz V-lijevak ograničen i vrijeme protoka bude produženo, to ukazuje na osjetljivost mješavine na blokiranje. Sklonost betona segregaciji pokazat će se vremenom protoka i to značajno većim vremenom protoka. U tablici 5 prikazani su razredi viskoznosti samoslijegajućeg betona prema Europskim smjernicama.

Tablica 5: Razredi viskoznosti samoslijegajućeg betona (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)

Razredi	V-lijevak (s)	Karakteristike
VS1/VF1	≤ 8	<ul style="list-style-type: none"> – odlična sposobnost punjenja – prikladno za gustu armaturu – dobra sposobnost samoslijeganja – vrlo dobra završna površina betona – veća mogućnost pojave izdvajanje vode i segregacije
VS2/VF2	< 8	<ul style="list-style-type: none"> – moguća pojava tiksotropnih efekata (povoljno za smanjenje pritiska na oplatu) – poboljšanje otpornosti na segregaciju – lošiji izgled površine betona (šupljine) – osjetljivost na zastoje i kašnjenja između uzastopnih pumpanja betona

4.2.3. Sposobnost zaobilaznja prepreka

Sposobnost zaobilaznja prepreka je svojstvo svježeg betona koje se definira kao sposobnost svježeg samoslijegajućeg betona da teče i zaobilazi gustu armaturu i pri tome popunjava oplatu bez pojave segregacije. Potrebno je uzeti u obzir geometriju, gustoću armature i maksimalnu veličinu zrna agregata u betonskoj mješavini prilikom određivanja sposobnosti zaobilaznja prepreka. Određuje se L-kutijom.

Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12350-10. Ovim ispitivanjem se određuje sposobnost prolaska samoslijegajućeg betona kroz uske otvore između dvije ili tri armaturne

šipke bez pojave segregacije ili blokiranja. Segregacija kao ozbiljan nedostatak mješavine se može uočiti vizualnim pogledom.

Za provođenje ovog ispitivanja potrebna je sljedeća oprema (slika 12):

- L-kutija
- druga oprema: lopatica, štoperica i dr.



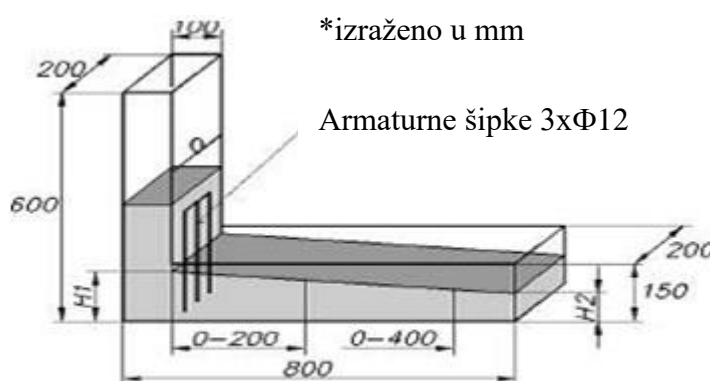
Slika 12: L-kutija

L-kutija se sastoji od vertikalnog i horizontalnog dijela koji su odijeljeni jedan od drugog pomičnom pregradom, ispred kojih se nalaze šipke armature (3 glatke šipke na razmaku od 41 mm ili 2 glatke šipke promjera 12 mm na razmaku od 59 mm).

Postupak ispitivanja:

1. postaviti L-lutiju na ravnu i čvrstu podlogu, te osigurati slobodno otvaranje kliznih vrata, navlažiti unutarnju površinu L-kutije i odstraniti višak vode
2. zatvoriti vrata
3. napuniti vertikalni presjek betonom
4. pričekati 1 min da odstoji beton
5. podignuti klizna vrata i pustiti beton da isteče van u horizontalni dio L-kutije.

Nakon što se beton prestane gibati, potrebno je izmjeriti visinske razlike na kraju horizontalnog dijela uređaja između površine betona i ruba posude, te isto tako i na vertikalnom dijelu. Mjerenja se provode na tri mjesta (dva na krajevima i jedno u sredini) i na osnovu tih mjerenja izračunaju se srednje vrijednosti ΔH_1 i ΔH_2 . Razlika između visine posude i tih izračunatih vrijednosti daju vrijednosti H_1 i H_2 (slika 13) koje su potrebne za proračun omjera blokiranja koji u biti definira sposobnost prolaza betona.



Slika 13: L-kutija s dimenzijama u mm

Potrebno je voditi računa o tome da se cijelo ispitivanje obavi unutar 5 min.

Sposobnost zaobilaženja prepreka računa se prema formuli:

$$\rho_a = \frac{H_2}{H_1} \quad (4)$$

gdje je:

ρ_a - omjer sposobnosti zaobilaženja prepreka (/)

H_1 - srednja dubina betona u vertikalnom dijelu L-kutije (mm)

H_2 - srednja dubina u horizontalnom dijelu L-kutije (mm)

Rezultati ispitivanja:

Ukoliko beton teče slobodno i u mirovanju bude horizontalan, tada je omjer $H_2/H_1=1$. Dakle, što je omjer bliži vrijednosti 1, što bi značilo da su vrijednosti H_2 i H_1 približno iste, protok betona je bolji. Minimalna prihvatljiva vrijednost je 0,8 dana. Također, vizualno se može utvrditi blokiranje agregata iza šipki bez obzira na proračunate vrijednosti sposobnosti zaobilaženja prepreka. U tablici 6 prikazani su razredi ispitivanja L-kutijom.

Tablica 6: Razredi sposobnosti zaobilaženja prepreka (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.)

Razred	H2/H1	Primjena
PA1	$\geq 0,80$ sa 2 šipke	razmak šipki armature 80 – 100 mm
PA2	$\geq 0,80$ sa 3 šipke	razmak šipki armature 60 – 80 mm

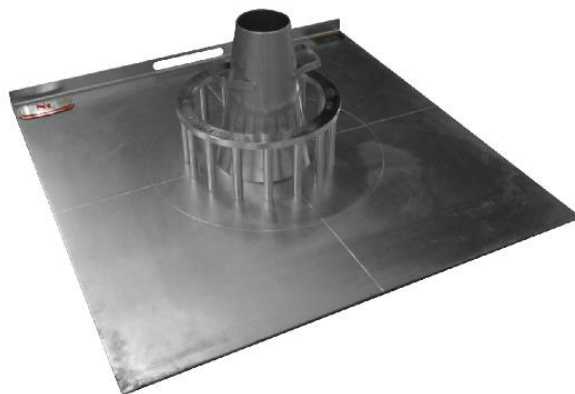
4.2.4. Ostale metode

Ispitivanje J-prstenom

Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12350-12. Ovom normom definirana se svojstvo popunjivosti i prolaznosti samoslijegajućih betona, a koristi se i za ispitivanje otpornosti prema segregaciji. Tijekom ovog ispitivanja mjeri se i rasprostiranje, vrijeme rasprostiranja t_{500} i stopa blokiranja.

Za provođenje ovog ispitivanja potrebna je sljedeća oprema (slika 14):

- Abramsov kalup u bliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm
- ploča debljine minimalno 2 cm, dimenzija 90x90 cm, na kojoj je obilježen krug na središnjem dijelu ploče za nalijeganje stošca i koncentričnim krugom promjera 500 mm
- J-prsten
- ravna šipka duljine 400 mm
- druga oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, metar.



Slika 14: J-prsten s Abramsovim kalupom i pločom (nl-test.com)

Postupak ispitivanja:

1. navlažiti ploču i unutarnju površinu stošca
2. postaviti ploču na ravnu podlogu
3. postaviti centrično Abramsov kalup i oko njega J-prsten na način da bude smješten koncentrično kalupu i čvrsto pritisnut
4. uliti beton u Abramsov kalup
5. pripremiti štopericu, vertikalno podignuti Abramsov kalup i mjeriti vrijeme razrastiranja (vrijeme potrebno da uzorak dosegne promjer 500 mm)
6. izmjeriti konačni promjer u dva međusobno okomita smjera (proračunava se prosjek dvaju izmjerenih promjera u mm)
7. postaviti ravnu šipku na J-prsten i izmjeriti visinsku razliku između donjeg dijela šipke i površine betona u sredini (Δh_0) i 4 visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima (Δh_{x1} , Δh_{x2} , Δh_{y1} , Δh_{y2}).

Provjeriti pojavu segregacije rasprostrtog betona i odvajanje cementne paste na rubovima betona.

Rasprostiranje J-prstena SF_j računa se po sljedećoj formuli.

$$SF_j = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5)$$

gdje je:

SF_j - rasprostiranje (mm)

d₁ - najveći promjer rasprostiranja (mm)

d_2 - promjer rasprostiranja okomit na d_1 (mm)

Vrijeme potrebno da uzorak dosegne promjer od 500 mm izražava se u sekundama s točnošću od desetinke sekunde.

Stopa blokiranja se računa po sljedećoj formuli.

$$PJ = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \quad (6)$$

gdje su Δh izmjerene visine.

Rezultati ispitivanja:

Specifičnost ovog ispitivanja je u tome što ispitivanje mjerenje protoka i sposobnosti zaobilazanja prepreka daju međusobno ovisne rezultate jer je izmjereni protok uvjetovan stopom blokiranja kroz šipke armature. Jasno je da je za veću razliku u visini, sposobnost prolaska betona kroz prepreke manja i da je količina blokiranja manje uvjetovana obilježjima protoka. Segregaciju i/ili blokiranje je u većini slučajeva pouzdanije vizualno definirati nego proračunom.

Određivanje segregacije sijanjem

Sposobnost cementne paste da spriječi relativno gibanje krupnog agregata u betonu definira otpornost prema segregaciji. Definira se kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu. Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12350-11.

Za provođenje ovog ispitivanja potrebna je sljedeća oprema:

- perforirano sito kvadratnih otvora veličine 5 mm s okvirom promjera 300 ili 315 mm, visine 40 ili 74 mm,
- vaga digitalnog tipa s preciznošću od 20 g.

Postupak ispitivanja:

1. nakon uzorkovanja pustiti beton da odstoji 15 min i pri tome se bilježi bilo kakvo izdvajanje vode
2. onda se gornji dio uzorka izlije u perforirano sito kvadratnih otvora veličine 5 mm
3. pričekava se 2 min te se zabilježi masu materijala koja je prošla kroz isto.

Segregirajući dio SR dobiva se iz formule:

$$SR = \frac{m_{ps} - m_p}{m_c} * 100\% \quad (7)$$

gdje je:

SR – segregirajući dio

m_{ps} – masa dna sita i betona koji je prošao kroz sito (g)

m_p – masa dna sita (g)

m_c – masa betona (g)

Rezultati ispitivanja:

Rezultat ispitivanja je omjer segregacije izračunat kao omjer mase uzorka i mase materijala koji je prošao kroz sito. Provedenim ispitivanjem beton se svrstava u razred otpornosti segregaciji koji su prikazani u tablici 7.

Tablica 7: Razredi otpornosti segregaciji i pripadajuća primjena samoslijegajućeg betona (Džaja i sur., 2016.)

Razred	Otpornost segregaciji (%)	Primjena
SR1	≤ 20	Za tanke ploče i vertikalne elemente za koje se ne zahtijeva tečenje betona u oplati do 5 m. Dimenzije otvora veće od 80 mm.
SR2	≤ 15	Za vertikalne elemente koji zahtijevaju tečenje betona veće od 5 m i s dimenzijama otvora od 80 mm. Koristi se i za elemente s otvorima manjim od 80 mm, ali onda tečenje betona mora biti manje od 5m.

Tečenje i viskoznost su glavni parametri sposobnosti popunjavanja oplata samoslijegajućeg betona. (Algušić i Lavriv, 2010.)

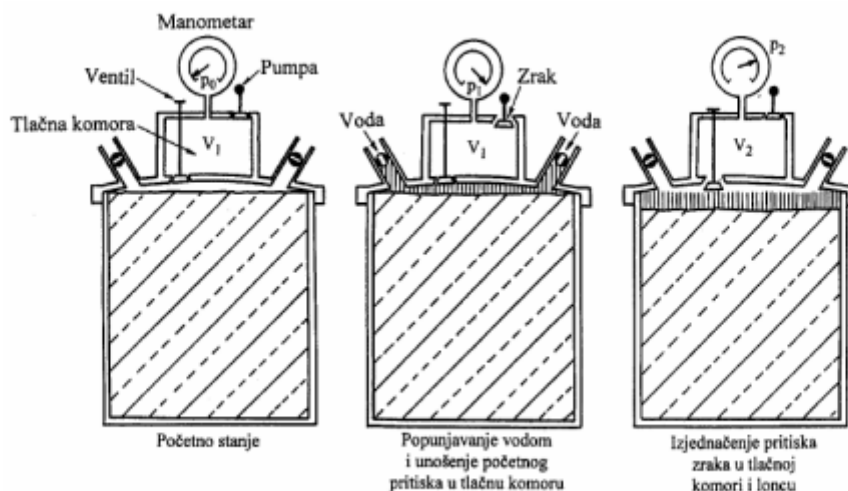
Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

Poroznost ili sadržaj zraka u svježem betonu ispituje se porometrom. Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12350-7. Ovom normom specificirana je metoda određivanja sadržaja zraka u svježem betonu koji je napravljen od agregata normalne težine, gustoće i najveće veličine zrna agregata od 63 mm.

Potrebna oprema za provođenje ispitivanja je porometar (slika 15). Ispitivanje se provodi na sljedeći način:

1. uzorak se postavi u posudu poznatog volumena i posudu se zatim poklopi
2. prostor između uzorka i poklopca popunjava se vodom,
3. pošto se u poklopcu nalazi tlačna komora poznatog volumena, napumpa se zrak do pritiska oko 1 bar (očita se točno na manometru kao pritisak p_0)

4. otvori se ventil kako bi se pritisak raspodijelio u posudi i tlačnoj komori
5. na manometru aparata za mjerenje sadržaja zraka očita se sadržaj zraka “z” u % volumena posude za beton.



Slika 15: : Uređaj za ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu (porometar) (Algušić i Lavriv, 2010.)

Fill posuda (Kajima uređaj)

Ovim ispitivanjem dolazi se do rezultata koji govore o sposobnosti punjenja samoslijegajućih betona s najvećim zrnom agregata veličine 20 mm. Kajima uređaj (slika 16) se sastoji od spremnika s ravnom i glatkom podlogom. Spremnik je ispunjen s 35 prepreka izrađenih od PVC-a promjera 20 mm i međusobne udaljenosti 50 mm.

Na gornjem dijelu uređaja postavljena je cijev promjera 100 mm i visine 500 sa lijevkom na vrhu visine 100 mm. Ova cijev služi za punjenje. Ispitivanje se provodi na način da se spremnik napuni betonom i izmjeri razlika u visini između dviju strana spremnika. Ova razlika u visinama je mjera sposobnosti popunjavanja betona.

Karakteristika ovog ispitivanja je teško izvođenje na gradilištu zbog složenosti uređaja i velike mase betona, ali daje dobre smjernice o karakteristikama samoslijegajućih betona.



Slika 16: Kajima uređaj (theconstructor.org)

4.3. Svojstva očvrstlog samoslijegajućeg betona

Svojstva očvrstnalog samoslijegajućeg betona dobivaju se provođenjem ispitivanja na uzorcima, koji se pripremaju i njeguju na normama propisan način. Svojstva betona koja su propisana u EC2 su:

- tlačna čvrstoća
- vlačna čvrstoća,
- gustoća očvrstlog betona
- modul elastičnosti
- skupljanje i puzanje
- vodonepropusnost
- otpornost na smrzavanje (sa ili bez soli za odmrzavanje)
- otpornost na habanje

- plinopropusnost
- druga svojstva vezana uz trajnost betona.

Čvrstoća betona je funkcija strukture betona. Čvrstoća betona najvažnija je karakteristika betona jer je osnovni zadatak pri projektiranju konstrukcije upravo da izdrži određeno opterećenje. Naprezanje uzrokovano opterećenjem koje savladava koheziju u betonu jednako je čvrstoći betona (Žuža, 2012.).

Kada se svojstva očvrstlog samoslijegajućeg i običnog betona uspoređuju, ne nailazi se na velike razlike (Glibo, 2017.).

4.3.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća betona je jedan od glavnih parametara kvalitete kako običnih betona tako i samoslijegajućih betona i betona sa recikliranim agregatom. Tlačna čvrstoća betona propisana je projektom i prema europskoj normi EC2, oznakom za klasu betona odnosno razredom tlačne čvrstoće C. Klasifikacija prema EC2 s obzirom na tlačnu čvrstoću prikazana je u tablici 8.

Tlačna čvrstoća ovisi o mnogo parametara, a neki od njih su:

- vrsta i čvrstoća cementa
- kakvoća i granulometrijski sastav ispunje
- vodocementni (v/c) i agregatnocementni (a/c) faktor
- način pripreme, ugradbe i njegovanja uzorka
- vlažnosti uzorka pri ispitivanju
- starosti, temperaturi i zrelosti betona
- poroznosti

- strukturi betona
- prirodnim primjesama u ispuni i vodi
- utjecaju aditiva.

Tablica 8: Klasifikacija betona prema razredu tlačne čvrstoće (EN 1992-1-1, 2004.)

Razred tlačne čvrstoće
C12/15
C16/20
C25/30
C30/37
C40/50
C50/60
C55/67
C60/75
C70/85
C80/95
C90/105

Ispitivanje čvrstoće betona može se provoditi nerazornim, razornim i polurazornim metodama. Nerazorna ispitivanja su ona koja se obavljaju na konstrukciji, dakle bez razaranja uzorka, a razorna su ona koja se odnose većinom na ispitivanja provedena u laboratoriju na uzorcima uzetim iz konstrukcije ili proizvedenim uzorcima. Osnovna razlika je u tome što se nakon nerazornih ispitivanja ispitni uzorci ili dio ispitane konstrukcije ostaje isti tj. nepromijenjen i takvo provedeno ispitivanje nema utjecaja na funkcionalnost dijela ili cijele konstrukcije. Neke od nerazornih metoda su sklerometriiranje, ultrazvučno ispitivanje i pull-out metoda (Žuža,

2012.). U daljnjem tekstu govori se o razornim metodama ispitivanja tlačne čvrstoće u laboratorijima.

Tlačna čvrstoća se ispituje prema normi HRN EN 123390-3. Uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće izrađuju se i njeguju prema normi HRN EN 123390-2. Uzorci su oblika kocke (150x150x150 mm) ili valjka (d=150 mm i h=300 mm), te su njihove dimenzije određene normom HRN EN 123390-1.

Uzorak je potrebno površinski očistiti i osušiti prije postavljanja u prešu (slika 13). Uzorci za ispitivanje se postavljaju u prešu okomito na smjer ugradnje i moraju se postaviti u centar preše kako bi nanošenje opterećenja bilo ujednačeno. Opterećenje je potrebno nanositi jednoliko (bez udara) i brzina nanošenja opterećenja mora biti u rasponu od 0,2 MPa/s do 1,0 MPa/s. Rezultat pokusa je maksimalno opterećenje (F) pri kojem je došlo do sloma uzorka.

Tlačnu čvrstoću betona izračunavamo prema sljedećoj formuli:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (8)$$

gdje je:

f_c - tlačna čvrstoća betona (N/mm²)

F - maksimalno opterećenje pri slomu (sila sloma) (N)

A_c - površina uzorka (mm²)



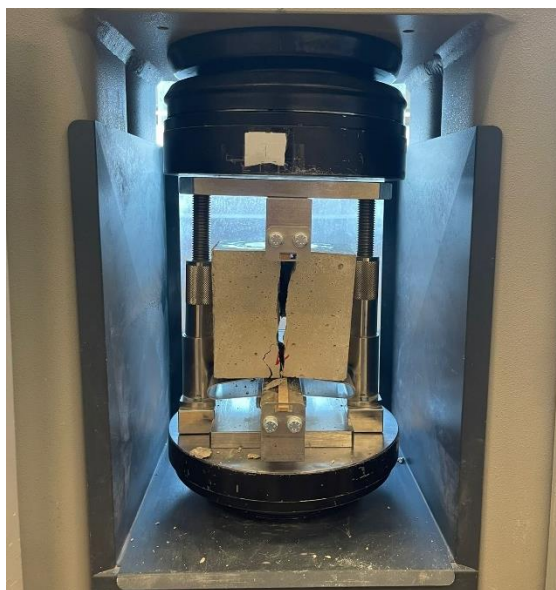
Slika 17: Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće

4.3.2. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća betona može se ispitati direktnim i indirektnim pokusima. Češće se rade indirektna ispitivanja zbog jednostavnije izvođenja. Indirektna ispitivanja za dobivanje vlačne čvrstoće su:

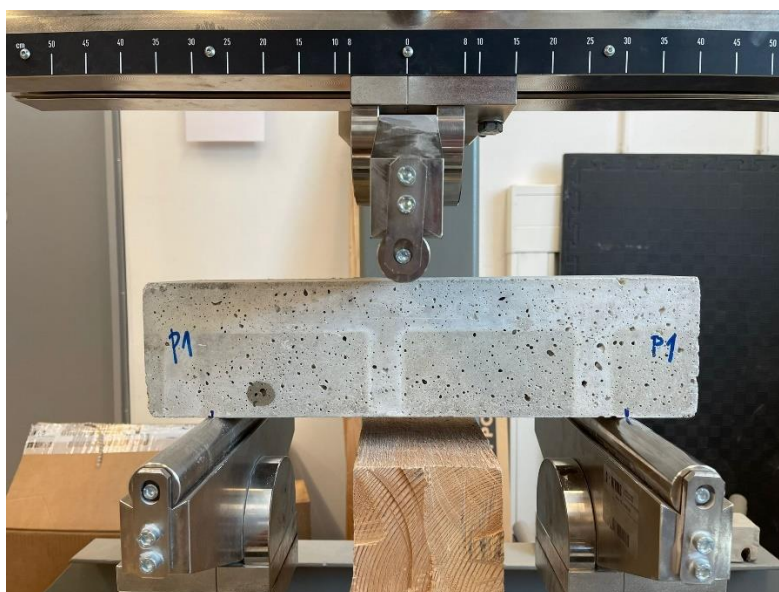
- ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem,
- ispitivanje vlačne cijepanjem.

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem provodi se prema normi HRN EN 12390-6 na uzorcima oblika valjka. Valjak se opterećuje tlačnom silom po izvodnici valjka. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem može se provoditi i na uzorcima kocke standardnih dimenzija kao što je prikazano na slici 19.



Slika 18: Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće betona cijepanjem

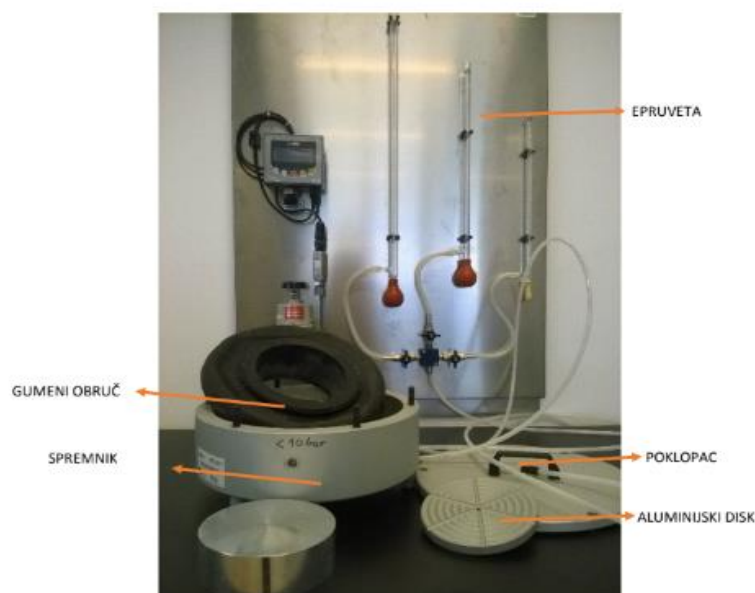
Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem provodi se prema normi HRN EN 12390-5 te se ispitivanje provodi na uzorcima oblika prizme koji se opterećuju jednom ili dvije koncentrirane sile. Ispitivanje s jednom koncentriranom silom prikazano je na slici 20. Opterećenje se mora nanositi jednoliko, bez udara i brzinom nanošenja opterećenja između 0,04 i 0,06 MPa/s.



Slika 19: Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće betona savijanjem

4.3.3. Plinopropusnost

Plinopropusnost se ispituje kako bi se odredio koeficijent prolaska plinova tj. kako bi bolje mogla opisati trajnost konstrukcija od betona koja je uvjetovana kretanjem agresivnih tvari kroz mikrostrukturu betona. Plinopropusnost se može ispitivati prema metodi Cambureau. Ovom metodom nije moguće ispitivati uzorke zasićene vodom ili one koji imaju evidentne pukotine ili šupljine. Uzorak koji se ispituje je oblika valjka promjera 150 mm i visine 50 mm. Betonski se uzorak izlaže djelovanju kisika ili dušika pod određenim tlakom, te se mjeri vrijeme prolaska mjehurića zraka u poznatim uvjetima okoline. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti prema metodi Cambureau se nalazi na slici 21.



Slika 20: Uređaj za određivanje plinopropusnosti prema metodi Cambureau sa svim elementima
(Mrakovčić, 2019.)

Oprema koja je potrebna za provođenje ispitivanja je:

- uređaj za ispitivanje plinopropusnosti prema metodi Cambureau s tri epruvete volumena 10, 25 i 100 cm³
- boca s kisikom

- kompresor
- štoperica.

Postupak ispitivanja:

1. u gumeni obruč postavi uzorak, te se poklopi aluminijskim diskom, na način da su urezi okrenuti prema uzorku,
2. spremnik se zatvara i učvršćuje s 6 vijaka,
3. gumeni obruč je potrebno napuhati na 6 bara uz pomoć kompresora kako bi se omogućio prolazak plina samo kroz uzorak,
4. epruvete su napunjenje mješavinom vode i sapunice,
5. tlak kisika potrebno je namjestiti na 1,5 bara,
6. nakon što su svi koraci do sad odrađeni potrebno je odrediti odgovarajuću veličinu epruvete i to na način da se pojedinačno otvore ventili na epruvetama i posmatrati koja najviše odgovara.
7. Nakon što je određeno koja epruveta najbolje odgovara mjeri se vrijeme koje je potrebno mjehuriću da stigne od 0 do kraja građiranog dijela epruvete.

Rezultati ispitivanja:

Optimalno vrijeme kretanja mjehurića unutar epruvete je 20 do 60 sekundi. Ukoliko je izmjereno vrijeme manje od 20 sekundi potrebno je ispitati plinopropusnost u manjoj epruveti ili ukoliko je izmjereno vrijeme veće od 60 sekundi onda je plinopropusnost potrebno ispitati u većoj epruveti. Protok kisika smatra se stacionarnim ukoliko razlika između dva uzastopna mjerenja nije manja od 3%. Ispitivanje se provodi za tlak vrijednosti 1, 1.5, 2, 2.5, 3 i 3.5 bara.

Protok plina Q_f za svaku promjenu tlaka dobiva se prema sljedećoj formuli:

$$Q_f = \frac{V_f}{T_{0-1}} \quad (9)$$

gdje je:

Q_f - protok plina (m^3/s)

V_f - referentni volumen plina (m^3)

T_{0-1} - vrijeme potrebno da mjehurić prođe od nule do graduiranog dijela epruvete (s)

Koeficijent propusnosti kisika za svaki pojedinačni mjereni tlak dobiva se prema sljedećoj formuli:

$$K_x = \frac{2 * Q_f * p_0 * H * \eta}{A * (p^2 - p_a^2)} \quad (10)$$

gdje je:

K_x - koeficijent propusnosti kisika za x mjereni tlak ($x = 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$ bara) (m^2)

A - poprečna površina betonskog uzorka (m^2)

H - visina uzorka (m)

Q_f - protok plina (m^3/s)

p - apsolutni ulazni tlak (Pa)

p_a i p_0 - atmosferski tlak (prema standardu se pretpostavlja da se radi o istom tlaku) (Pa)

η - dinamička viskoznost fluida ($2,02 * 10^{-5}$ N/m² za kisik pri temperaturi od 20°C)

Naposljetku se prosječni specifični koeficijent prolaska kisika dobiva prema sljedećoj formuli:

$$K = \frac{K_{1.5} + K_2 + K_{2.5} + K_3 + K_{3.5}}{5} \quad (11)$$

gdje je:

K - prosječni specifični koeficijent prolaska kisika (m^2)

$K_{1.5}, K_2, K_{2.5}, K_3, K_{3.5}$ - koeficijenti prolaska kisika pri tlaku vrijednosti 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 bara

4.3.4. Dubina prodora vode pod tlakom

Vodonepropusnost ili vodopropusnost betona može se odrediti uz pomoć postupka određivanja dubine prodiranja vode pod tlakom. Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12390-8. Ispitivanje se vrši na uzorcima kocke duljine brida 150 mm čije su dimenzije i njegovanje propisane normom HRN EN 123390-2.

Postupak ispitivanja:

1. uzorci se nakon 28 dana izvade iz kalupa, nakon čega im se ohrapavi površina čeličnom žicom (ohrapaviti onu površinu koja će biti izložena pritisku vode),
2. uzorci se onda postavljaju na uređaj za ispitivanje vodonepropusnosti betona (slika 22) i stežu se između gumenih brtvi kako vi se omogućio prodor vode pod tlakom (pritisak vode je oko 500 kPa),
3. nakon 72 sata uzorci se uklanjaju iz aparata i cijepaju se na uređaju za ispitivanje čvrstoće i to okomito na stranu koja je bila izložena pritisku vode,
4. nakon što se rascijepi uzorak markerom se označava trag vode i mjeri se najveća dubina prodiranja u mm.



Slika 21: Uređaj za ispitivanje vodonepropusnosti betona

Rezultati ispitivanja:

Na osnovu rezultata ovog ispitivanja, koji nam govore o dubini prodiranja vode (pod tlakom) u betonu, mogu se dati zaključci o vodopropusnosti/vodonepropusnosti betona.

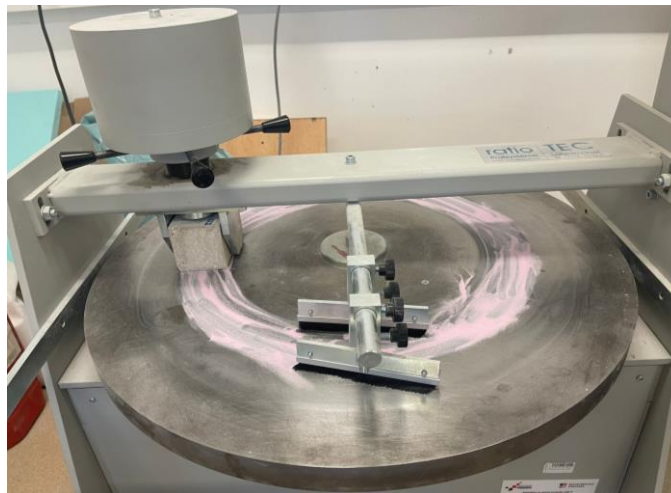
4.3.5. Otpornost na habanje

Otpornost na habanje se provodi prema normi HRN EN 13892-3. Ispitivanje se provodi na Boehme uređaju (slika 23). Ispitivanje se vrši na uzorcima kocke duljine brida 70 mm čije su dimenzije i njegovanje propisane normom HRN EN 123390-2. Nakon njegovanja, uzorke je potrebno izvaditi iz vode i osušiti u sušioniku na 105°C 24 sata ili do stalne mase. Nakon sušenja uzorci se ispituju u već spomenutom Boehme uređaju.

Postupak ispitivanja:

1. prvotno se izmjeri početna masa uzorka betona,
2. te se potom uzorak učvrsti u uređaju pomoću opteretnog tega,

- uzorak se u uređaj postavlja na jednu stranu (ona koja je pogodna), pazeći da to ne bude strana uzorka koja nije bila u kalupu (uzorak se ispituje uvijek samo na jednoj strani koja je odabrana)
- na ispitnu stazu potrebno je posipati 20 g brusnog praha (standardni abrazivni materijal koji se koristi je pijesak aluminijevog oksida) nakon čega se uređaj može pokrenuti.
- ispitivanje se prema normi provodi u 16 ciklusa od kojih se svaki sastoji od 22 okretaja opterećene brusne ploče. Nakon svakog ciklusa potrebno je brusnu ploču očistiti i okrenuti uzorak za 90° po vertikalnoj osi uz novo posipanje brusnog praha na okretnoj ploči. Nakon svakog četvrtog ciklusa potrebno je uzorak izvagati i zabilježiti vrijednost mase.



Slika 22: Bohme uređaj

Gubitak volumena se računa prema sljedećoj formuli:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (12)$$

gdje je:

ΔV - promjena volumena tj. gubitak volumena (cm³)

Δm - gubitak mase nakon 16 ciklusa (g)

ρ - gustoća betona koja se ispituje (g/cm^3)

Rezultati ispitivanja:

Prema normi je količina obrušenog materijala određena iz izgubljenog volumena ΔV u odnosu na površinu od 50 cm^2 . U tablici 9 prikazani su, s obzirom na granične vrijednosti, određeni razredi otpornosti na habanje.

Tablica 9: Razredi otpornosti na habanje (Mrakovčić, 2019.)

Razred	Najveća dopuštena količina obrušenog betona ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)
XM1 (umjereno)	25
XM2 (znatno)	21
XM3 (ekstremno)	18

5. SAMOSLIJEGAJUĆI BETON S AGREGATOM OD RECIKLIRANOG BETONA

5.1. Agregat od recikliranog betona

5.1.1. Tehnologija proizvodnje recikliranog agregata

Postrojenja za proizvodnju recikliranog agregata, u daljnjem tekstu RBA, (reciklažna ili drobilična postrojenja) uglavnom se ne razlikuju značajno od postrojenja za proizvodnju drobljenog agregata. Suština tehnološkog procesa je da se od komada otpadnog betona drobljenjem proizvede granulirani materijal određenih veličina zrna, što bi značilo da su drobljenje i prosijavanje dvije osnovne operacije ovog tehnološkog procesa.

Jedan tip postrojenja za proizvodnju drobljenog recikliranog agregata prikazan je na slici 27. Radi se o mobilnoj drobilici.



Slika 23: Postrojenje za proizvodnju drobljenog agregata

Droblilica se sastoji od:

1. koša za prihvatanje otpadnog materijala

2. drobilica (čeljusna ili neka druga vrsta drobilice)
3. transportna traka.

5.1.2. Svojstva agregata od recikliranog betona

U državama EU, zbog nedostatka standarda kojima su specificirani zahtjevi i uvjeti kvalitete za agregat od recikliranog materijala, koriste se standardi za normalni agregat za proizvodnju betona (EN 12620:2002).

Specifičnost uporabe RBA, kao komponente betonske mješavine, leži u potpunom poznavanju sastava takvog agregata. Ispitivanja su pokazala različitosti svojstava RBA u odnosu na svojstva prirodnog agregata. Neka od tih različitosti su:

- veća količina prašinih čestica
- veći sadržaj ogranskih i eventualno drugih štetnih materija
- veće upijanje vode
- manju zapreminsku težinu
- manju otpornost na habanje
- manju otpornost na mraz.

RBA se također razlikuje od prirodnog agregata oblikom zrna i površinom koja je hrapavija. Način drobljenja utječe na teksturu drobljenog agregata tj. vrsta upotrebljenog stroja za drobljenje utječe na njegovu teksturu. Povećana potrošnja vode je rezultat teksture i oblika zrna jer je vidljivo kako RBA, iste veličine kao i prirodni agregat, ima veću površinu koju obavija cementna pasta (Žuža, 2012.). Također, povećana propusnost vode i zraka između cementne paste i agregata rezultat je raspucane površine RBA. Zbog toga beton koji u svom sastavu ima RBA ima veće vrijednosti propusnosti plinova, pare i vode u odnosu na običan beton (Zaharieva i sur., 2003.).

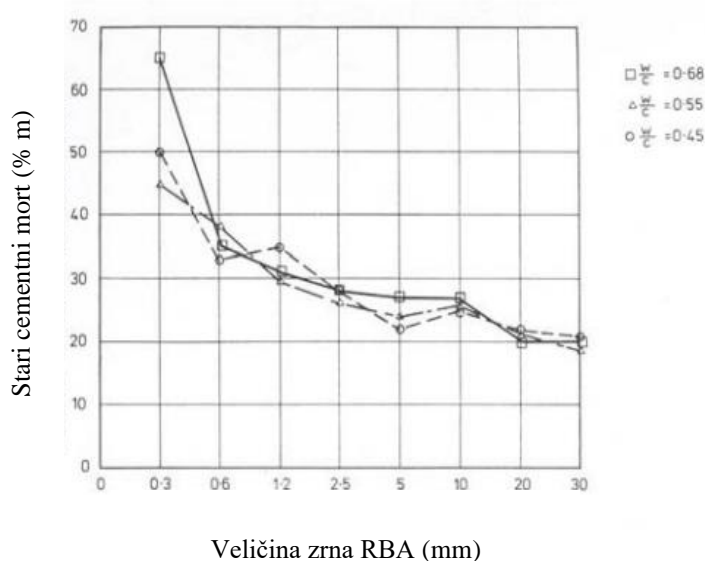
Može se reći da se RBA sastoji od originalnog agregata i zastarog starog morta (“zalijepljenog sloja morta”). Iz rečenog može se zaključiti da fizička i mehanička svojstva RBA ovise o svojstvima starog morta i njegovoj količini. Također, poznato je da je staristari mort oko zrna originalnog agregata u biti porozan materijal i da njegova poroznost ovisi o vodocementnom faktoru betona koji je recikliran (Nagataki, 2009.). Na količinu starog morta uvelike utiče proces drobljenja izvornog betona i veličina RBA (Hansen i Narud, 1983.).

Glavni faktori koji pri istom načinu i snazi usitnjavanja (drobljenja) utječu na količinu starogmorta u RBA su:

- vodocementni faktor,
- čvrstoća izvornog betona (od kojeg se dobiva RBA),
- veličina zrna agregata u izvornom betonu (Etxeberria Larrañaga,2004.).

Raspon kretanja količine cementnog morta u RBA iznosi od 25 – 65 % i izražava se u zapreminskim postocima. Ovaj raspon razlikuje se po pojedinim frakcijama i to na način da sitnija frakcija ima veću količinu starog cementnog morta i obratno (Hansen, 1992. i de Juan M, 2009.).

Veća debljina sloja cementnog morta u RBA rezultat je manje vrijednosti vodocementnog faktora izvornog betona i manje veličine zrna prirodnog agregata u izvornom betonu. Navedenu tvrdnju potvrđuje dijagram na slici 28, gdje se na x-osi nalazi veličina zrna RBA u mm, a na y-osi stari cementni mort u masenim procentima.



Slika 24: Količina starog morta na zrnima RBA različite veličine (Etxeberria Larrañaga, 2004.)

Kada je u pitanju upijanje vode, EN ne propisuju nikakva ograničenja u svezi vrijednosti upijanja vode RBA. Upijanje vode je svojstvo po kojem se RBA najviše razlikuje od prirodnog agregata. Upijanje vode ovisi o kvaliteti i debljini zastarog cementnog morta oko zrna agregata. Krupni RBA karakteriše upijanje vode u rasponu od 3,5 - 10% (Poon i Lam, 2008.). Kod sitnog RBA upijanje vode se kreće u rasponu od 5,5 – 13 % (Hansen, 1992.). Ako se usporede rasponi upijanja vode RBA i prirodnog drobljenog i riječnog agregata vidljiva je velika razlika, jer se upijanje vode kod ovog agregata kreće oko 1 %.

Upijanje vode RBA je sposobnost koja je uvjetovana većim stupnjem upijanja starog cementnog morta koji obavija zrno agregata i karakteriše se punom većom vrijednosti upijanja vode negoli kod izvornog agregata.

Povećano upijanje vode RBA utječe na konzistenciju betona i na svojstva očvrstlog betona koja su vezana uz trajnost betona. Neka od tih svojstava su: upijanje vode, otpornost na mraz, karbonatizacije i dr. Zbog toga, mnogi istraživači limitiraju količinu RBA u betonskoj mješavini na 20 – 30 % kako bi se osigurao uvjet upijanja vode ukupne količine agregata od 5 %, a sve rečeno kako bi proizvodnja betona za konstrukcijsku primjenu bila kvalitetna (Kikuchi i sur., 1988.).

Gustoća ili zapreminska težina RBA je također jedan od parametara koji su zanimljivi za proučavanje, odnosno razlike koje se pojavljuju kod korištenja RBA i prirodnog agregata. Kada govorimo o gustoći RBA, u načelu ona je uvijek manja od gustoće prirodnog agregata. Gustoća RBA ovisi o gustoći i količini starog cementnog morta koji obavija izvorni agregat. Može se reći da gustoća ili volumna masa RBA ovisi o:

- čvrstoći izvornog betona
- veličini zrna RBA.

Istraživanjima je pokazano da čvrstoća izvornog betona utiče na gustoću RBA i to je vidljivo u činjenici da sa istim kvanitetom morta, RBA dobiven od betona veće čvrstoće ima veću gustoću (Nagataki i sur., 2000.). Veličina zrna agregata RBA dobivena procesom drobljena utječe na gustoću RBA i agregati sa većom količinom starog cementnog morta imaju manju gustoću (Hansen, 1986.).

Kada govorimo o otpornosti na habanje RBA, ona je manja u odnosu na prirodni agregat. Posljedica manje otpornosti na habanje jeste odvajanje i drobljenje poroznog omotača morta oko zrna RBA. Razlike u otpornosti na habanje RBA kreću se u velikim granicama i to od 0 – 70 %, što ovisi i o kvaliteti izvornog betona (Poon i Lam, 2008.).

6. SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOSLIJEGAJUĆEG BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

Dokazano je da RBA korišten za spravljanje betonske mješavine ima manju gustoću i veću vodoupojnost od uobičajenih agregata i to sve zbog starog morta koji obavlja agregat. Razne nečistoće koje se nalaze u RBA, a čije je porijeklo od ostalih materijala koji su korišteni pri izgradnji (opeka, žbuka, gips, željezo i sl.), utjecat će na smanjenje fizikalnih i mehaničkih svojstava betona. Zbog svih tih navedenih činjenica, uzroke loših karakteristika betona na bazi recikliranog agregata najčešće pripisujemo lošim svojstima RBA.

Najčešća proučavana svojstva očvrslog betona na bazi recikliranog agregata u istraživanjima su tlačna čvrstoća, gustoća betona, modul elastičnosti, vlačna i savojna čvrstoća te skupljanje i pužanje. U nešto manjem obimu istraživanja su zastupljena ispitivanja trajnosnih svojstava kao što su plinopropusnost, vodonepropusnost i otpornost na smrzavanje i odmrzavanje.

Ispitivanja svojstava svježeg betona na bazi recikliranog agregata koja se najčešće ispituju su ispitivanje konzistencije, sadržaj zračnih pora, izdvajanje vode. Također, mnoga istraživanja su usmjerena ispitivanju svojstava agregata kao što su kvaliteta i stanje vlažnosti (Sironić, 2010.).

Samoslijegajući beton na bazi recikliranog agregata može se miješati, transportirati i ugrađivati na isti način kao i običan samoslijegajući beton.

6.1. Specifičnosti spravljanja samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata

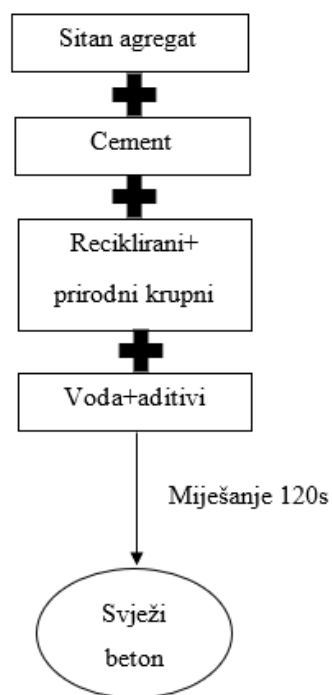
U ovom poglavlju, na osnovu podataka iz literature (Glibo, 2016., Klobučar, 2016., Jevtić i sur., 2009.), biti će prikazani prijedlozi tehnologije spravljanja samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata u zavisnosti od redoslijeda doziranja komponenata u miješalicu, načina i trajanja miješanja. U svim slučajevima krupni je agregat ili reciklirani krupni agregat ili mješavina recikliranog i prirodnog agregata, dok je sitan agregat isključivo prirodan.

6.1.1. Normalan postupak miješanja (NMA)

Normalan, uobičajen ili tradicionalan postupak miješanja podrazumijeva sljedeći redoslijed doziranja komponenti:

1. sve čvrste komponente betonske mješavine
2. voda.

Na kraju pristupa se miješanju u trajanju približno 120 sekundi. Dakle, prvo se odmijere količine komponenti materijala, krupnog i sitnog agregata, cementa i vode. U miješalicu se dozira najprije polovina krupnog agregata, zatim sitan agregat i cement, pa naposljetku ostatak krupnog agregata. Cjelokupna količina vode s aditivima dodaje se na kraju i započinje proces miješanja koji traje oko 2 min. Ovakav postupak se naziva normalnim postupkom miješanja (*Normal Mixing Approach - NMA*) i prikazan je na slici 29.



Slika 25: Shematski prikaz normalnog postupka miješanja (Jevtić i sur., 2009.)

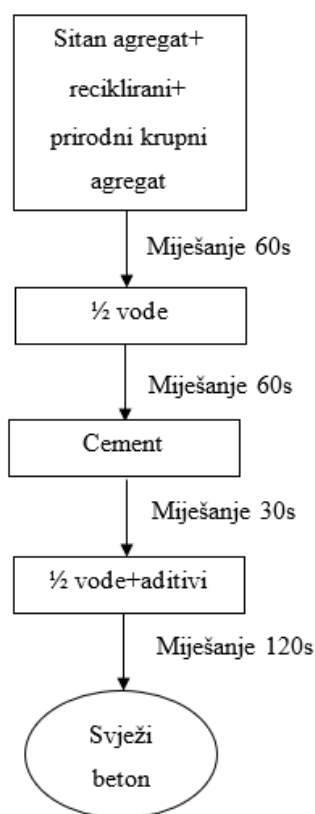
6.1.2. Metoda dvije faze miješanja (TSMA)

Metoda dvije faze miješanja bazira se na principu podjele ukupne količine vode na dva dijela zbog čega se ovaj pristup može nazvati metodom dvije faze miješanja (*Two Stage Mixing Approach - TSMA*) (Tam i Tam, 2008.).

Postupak spravljanja betona metodom dvije faze miješanja je sljedeći:

1. doziranje agregata (krupnog i sitnog)
2. homogeniziranje miješanjem “na suho” 60-tak sekundi
3. doziranje polovine ukupne proračunate količine vode
4. miješanje oko 30-tak sekundi
5. doziranje ukupne količine cementa
6. doziranje ostatka (druge polovine) količine vode i dodavanje aditiva u tu količinu vode ukoliko je aditiv sastavni dio mješavine
7. miješanje oko 120 sekundi.

Cijeli postupak je prikazan na shemi koja se nalazi na slici 30.

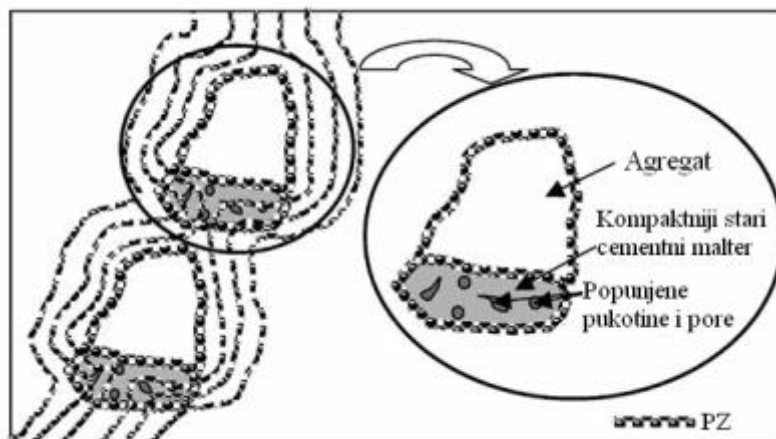


Slika 26: Metoda dvije faze miješanja (TSMA)(Jevtić i sur., 2009.)

Ova metoda miješanja betona dana je kao poboljšanje u odnosu na normalni način miješanja. Naime, za vrijeme prve faze miješanja pri doziranju polovine količine proračunate vode, a zatim cementa, donekle se navlaže zrna recikliranog agregata, te se formira tanak sloj cementne paste na površini recikliranog agregata koji može prodrijeti u stari stari cementni mort i tako popuniti pukotine i šupljine. U drugoj fazi miješanja dodaje se preostala voda koja je dovoljna za proces hidratacije. U ovoj drugoj fazi miješanja se dodaju aditivi koji su potrebni mješavini samoslijegajućeg betona i to baš u tom trenutku kako bi se aditiv jednako raspodijelio u mješavini.

Prema podacima Tam-a i sur. (2005.) iz ispitivanja je uočena, putem elektronske mikroskopije, bolja kontakna zona tj. ona je jača i gušća, te su šupljine u betonu na bazi recikliranog agregata pripremljenog u dvije faze miješanja u puno većoj mjeri popunjene nego šupljine u betonu na bazi recikliranog agregata, pripremljenog na tradicionalan način (Tam i sur., 2005.).

Također, veći broj praznina i pukotina otkriven je u novofomiranoj kontaktnoj zoni u RAC-u kod tradicionalnog spravljanja betona (NMA). Ovaj efekt pripisuje se nedostatku vode koju su upila zrna recikliranog agregata tj. potpuna hidratacije je bila spriječena uslijed nedostatka vode. Na slici 31 prikazan je shematski prikaz poboljšane strukture recikliranog agregata prema miješanju u dvije faze.



Slika 27: Shematski prikaz poboljšane strukture recikliranog agregata prema metodi u dvije faze (T SMA) (Jevtić i sur., 2009.)

Ako se fokusiramo na glavni problem koji prati uporabu recikliranog agregata dobivenog drobljenjem starog betona, odnosno na povećanu poroznost stare kontaktne zone, da se zaključiti da je poboljšanje kvalitete novog betona uvjetovano poboljšanjem mehaničkih svojstava kontaktne zone kako je i više puta naglašeno. To poboljšanje moguće je ostvariti i upotrebom nekog vrlo sitnog materijala točnije vrlo sitnog poculanskog materijala (npr. silikatne prašine), koji bi maksimalno ispunio šupljine i pukotine u zrnima recikliranog agregata, odnosno u matrici morta izvornog betona.

Dodatkom silikatne prašine u slučaju primjene recikliranog agregata ili u slučaju primjene običnih betona, generalno vodi ka poboljšanju svojstava betona. Betoni s dodatkom silikatne prašine ostvaruju veću čvrstoću u dužem vremenskom periodu.

Osnovna mehanička svojstva betona spravljenog metodom dvije faze miješanja (TSMA) u odnosu na beton spravljen tradicionalnom metodom miješanja (NMA), tj. tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti, kod samoslijegajućeg betona s RBA mogu se poboljšati od 10 do 30 % u ovisnosti od udjela RBA u novom betonu (Tam i Tam, 2008.).

6.2. Obradivost svježeg samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata

Utjecaj vlažnosti agregata na fizičko-mehanička svojstva betona na bazi recikliranog agregata je posebno proučavan. Utjecaj je proučavan kako u svježem tako i u očvrslom stanju betona. Može se reći da se svi zaključci mogu primijeniti i na samoslijegajući beton na bazi recikliranog agregata uz obraćanje pažnje na svojstva samoslijegajućeg betona.

Prema literaturnim podacima vidljivo je da je za primjenu betona na bazi recikliranog agregata uobičajenih čvrstoća optimalno koristiti reciklirani agregat koji je sušen na zraku, odnosno u stanju u kome je dostavljen (Larbi i sur., 2000. i Poon i sur., 2004.).

Od interesa je poznavanje utjecaja vlažnosti recikliranog agregata na svojstva svježeg i očvrsllog betona na bazi recikliranog agregata zbog velikog stupnja vodoupojnosti. U velikom broju studija predlaže se korištenje agregata koji je zasićen i/ili prethodno navlažen, kako bi se spriječio ubrzan pad obradivosti i ugradivosti kod ovakvih betona iz razloga što ukoliko je reciklirani agregat potpuno suh, onda je vrlo vjerovatno da će doći do povećanog upijanja vode unutar prvih 10-tak min, a samim time i do smanjenja vodocementnog faktora. Međutim, pokazalo se da prethodno zasićenje agregata nije neophodno iz tehnoloških razloga, sve dok se u obzir uzima prirodna vlažnost agregata prilikom projektiranja betonske mješavine.

Tlačna čvrstoća betona sa suhim i zasićenim površinskim suhim recikliranim agregatom je uglavnom nešto niža u odnosu na referentni beton. Razlika je značajnija prilikom ispitivanja čvrstoće na savijanje betona sa zasićenim agregatom. Betoni sa suhim i zasićenim recikliranim agregatom manje su otporni na utjecaj mraza, dok su se za ova konkretna ispitivanja bolje pokazali betoni s recikliranim agregatom čija su zrna imala manju količinu vode (Poon i sur., 2004.).

6.3. Svojstva očvrsllog samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata

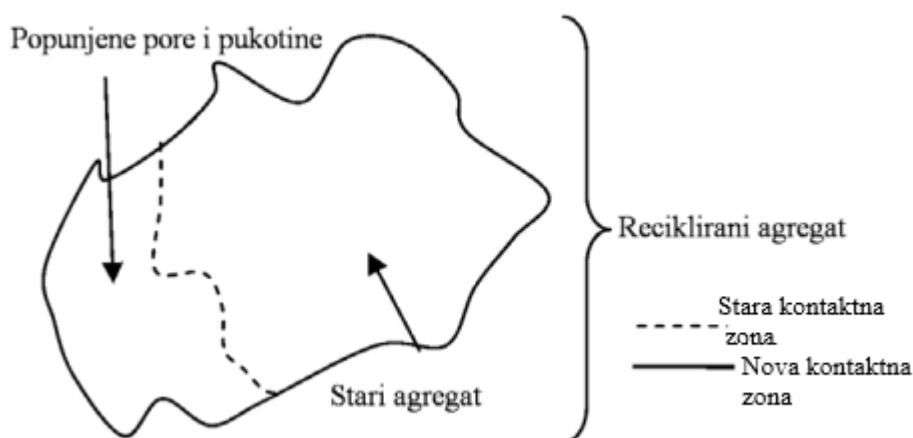
6.3.1. *Struktura samoslijegajućeg betona na bazi recikliranog agregata*

Struktura betona može se promatrati na više načina i to:

- makrostruktura - dvokomponentni sistem u čiji sastav ulaze komponenta morta i komponenta krupnog agregata,
- mikrostruktura - struktura cementnog kamena,
- kontaktna (tranzitna) zona (eng. *Interface*), zona sučeljka, između agregata i cementnog kamena.

Kritično mjesto kod betona je upravo kontaktna zona (zona sučeljka) između cementne oaste i zrna agregata. Mnoga svojstva betona kao kompozita, naročito trajnost, zavise upravo od svojstava kontaktne zone (kvaliteta, debljina) (Jevtić, 1996.). Trajost običnih i samoslijegajućih betona se razlikuju jer se beton promatra upravo na nivou mikroteksture. Samoslijegajući betoni zbog svoje veće gustoće i kompaktnije strukture imaju bolja svojstva trajnosti.

Beton spravljen s RBA u ovom smislu je još i kompleksniji zbog svoje strukture. Naime, običan i/ili samoslijegajući beton koji u svom sastavu ima reciklirani ima dvije kontaktne zone. Jedna kontaktna zona je između recikliranog agregata i nove cemente paste (nova kontaktna zona) i druga kontaktna zona je između recikliranog agregata i "starog" morta (stara kontaktna zona). Na slici 32 nalazi se shematski prikaz kontaktne zone u betonu s recikliranim agregatom.



Slika 28: Kontaktna zona u betonu sa recikliranim agregatom (Jevtić i sur., 2009.)

Sve navedeno je bitno napomenuti jer na kontaktnoj zoni stari cementni mort sadrži značajnu poroznost i pukotine, što u konačnici ima utjecaja na svojstva betona, pogotovo tlačnu čvrstoću. Upravo ove pore i pukotine povećavaju potrebu za vodom, odnosno povećavaju upijanje vode iz nove mješavine što uzrokuje problem nedostatka vode za potrebe potpune hidratacije cementa u novonastaloj mješavini samoslijegajućeg betona sa recikliranim agregatom.

Površinska svojstva agregata, stupanj izdvajanje vode, tip hemijskih veza, način njege betona su samo od nekih uvjeta kvalitete kontaktne zone. Generalno govoreći, reciklirani agregat se prilikom spravljanja betona ograničava na određeni postotak (najčešće reda veličine 20-30% u odnosu na masu agregata) upravo zbog svoje lošije kvalitete u odnosu na prirodni agregat, svoje varijacije u kvaliteti i heterogenosti. Ovo se odnosi na udio krupnozrnatog recikliranog agregata, dok je istovremena upotreba i sitnozrnatog i krupnozrnatog agregata još kompleksnija (Žuža, 2012.).

6.3.2. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća betona je jedan od glavnih parametra koji se ispituje, te je upravo to parametar koji se najviše ispituje. Ovisi o mnogo parametara što dovodi do različitosti rezultata dobivenih diljem svijeta. Iako se pojavljuje toliko različitosti u rezultatima ispitivanja svi se slažu oko

jednog, a to je da je tlačna čvrstoća betona sa recikliranim agregatom u načelu manja od referentne tlačne čvrstoće betona spravljenog od prirodnog agregata.

Tlačna čvrstoća, prema mnogim autorima, ovisi o raznim parametrima, a neki od njih su:

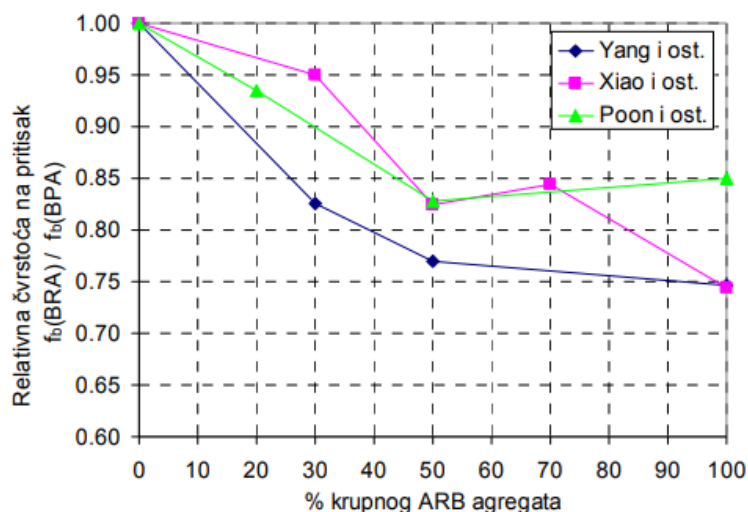
- tip recikliranog agregata i ostala svojstva recikliranog agregata (vodoupojnost, stanje vlažnosti, masni udio i dr.),
- količina tj. maseni udio sitnih i krupnih frakcija recikliranog agregata,
- odnos količine agregata i cementa u betonskoj mješavini,
- vodocementni faktor projektiranog betona (što je veći v/c faktor, niža je tlačna čvrstoća,
- čvrstoća izvornog betona (od kojeg se proizvodi RBA) odnosno čvrstoća izvornog agregata,
- odnosi čvrstoća izvornog betona od kojeg je proizveden RBA i projektirane čvrstoće betona

Kada obratimo pažnju na količinu tj. maseni udio sitnih i krupnih frakcija RBA mnogi autori poput Hansena, Rahala i dr. govore o tome kako se prilikom primjene i krupne i sitne frakcije recikliranog agregata očekuje pad tlačne čvrstoće za 15 – 40 % u odnosu na obične betone istog vodocementnog omjera. Primjena samo krupne frakcije ($d \geq 4$ mm) recikliranog agregata i prirodne sitne frakcije rezultira maksimalnim padom čvrstoće od 5 – 10 %.

Skoro linearan pad čvrstoće betona s recikliranim agregatom može se dobiti ukoliko se u betonskoj mješavini koristi krupni prirodni agregat, a sitni agregat (pijesak) čini upravo reciklirani i to do 50 % za potpunu zamjenu prirodne frakcije recikliranom. Rast linarnog pada uvjetovan je povećanjem količine sitnog RB agregata.

Hansen (1983.) smatra da se prirodni krupni agregat može zamijeniti RBA i to do 30% bez značajnih promjena u tlačnoj čvrstoći novonastalog betona s recikliranim agregatom u odnosu na običan beton. Potaknuti zaključcima Hansena (1983.), znanstvenici su proveli još mnogo

istraživanja s istim ciljem. Mnogi radovi poput radova Yang-a i sur., Xiao-a i sur., i Poon-a i sur. potvrđuju navode Hansena, u kojem ima i eksperimenata s rezultatima koji govore o smanjenju tlačne čvrstoće betona koji sadrže krupan RBA agregat, u usporedbi sa 10 % kod Hansena. Na slici 33 prikazan je dijagram relativne tlačne čvrstoće betona nakon 28 dana, u u funkciji količine krupnog RBA (Ignjatović i Marinković, 2009.).



Slika 29: Relativna tlačna čvrstoća betona s recikliranim agregatom, nakon 28 dana, u funkciji količine krupnog recikliranog agregata (Ignjatović i Marinković, 2009.).

Iz svega rečenog i svih dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da se povećanjem recikliranog agregata u betonskoj mješavini smanjuje tlačna čvrstoća RAC-a.

Ostali ali ne i manje važni parametri koji također utječu na čvrstoću betona su:

- ujednačenost kvalitete recikliranog agregata (problem nastaje onda kada se u pogon za recikliranje dopremaju i recikliraju betoni bez klasifikacije sa velikim razlikama u tlačnim čvrstoćama)
- razni aditivi koji se dodaju betonima tijekom spravljanja
- suho miješanje i miješanje u dvije faze

- starost betona....

Ukoliko se želi postići ekvivalentna tlačna čvrstoća kao kod izvornog betona potrebno je staviti 10 – 15 % više cementa u betonsku mješavinu ili smanjiti v/c faktor dodatkom aditiva. U načelu samoslijegajući betoni mogu doseći jednake vrijednosti tlačne čvrstoće kao i kod običnog samoslijegajućeg beton ukoliko je čvrstoća agregata zadovoljavajuća, odnosno čvrstoća agregata je veća ili približna čvrstoći cementnog kamena (Žuža, 2012.).

6.3.3. Vlačna čvrstoća savijanjem i cijepanjem

Jedno od mehaničkih svojstava koje se ne razlikuje značajno kod običnih samoslijegajućih betona i samoslijegajućih betona na bazi recikliranog agregata je vlačna čvrstoća savijanjem ili cijepanjem. Vlačna čvrstoća savijanjem ili cijepanjem samoslijegajućeg betona maksimalno 10% je manja od vlačne čvrstoće savijanjem ili cijepanjem običnog samoslijegajućeg betona (Hansen, 1992.).

Veće razlike, od 10 – 20 %, mogu se očekivati ukoliko su u sastavu betonske mješavine samoslijegajućeg betona na bazi s recikliranim agregatom zastupljene sve frakcije recikliranog agregata. Najčešće se vlačna čvrstoća određuje cijepanjem ili na osnovu ispitivanja savijanja.

Na vlačnu čvrstoću utječe vrsta veziva i količina veziva, odnosno pokazano je da se sa povećanjem količine cementa povećala i vlačna čvrstoća (Žuža, 2012.).

6.3.4. Vodopropusnost

Rezultati vodopropusnosti betona na bazi recikliranog agregata i običnog betona se ne razlikuju. Ispitivanja provedena u cilju doprinosa istraživanju betona od RBA pokazuju da vodopropusnost ne ovisi od vrste ili udjela recikliranog agregata.

Također, ispitivanja provedena u pokazuju da se reciklirani agregati mogu upotrebljavati za vodonepropusne betone. Prilikom korištenja recikliranog agregata potrebno je, prema DAfStb-smjernici za betone od recikliranih agregata, poznavati porijeklo agregata (porijeklo građevinskog otpada i osjetljivost na djelovanje alkalija) (Sánchez i Gutierrez, 2004.).

6.3.5. Otpornost na habanje

Rijetka istraživanja su provedena poput istraživanja autora Kryžanowskog i sur., i Sironića kada je u pitanju otpornost na habanje betona na bazi recikliranog agregata .

Pri procjeni trajnosti betona, habanje je jedan od važnih parametara. Pojava habanja je jako izražena na prometnicama, pješačkim stazama i aerodromskim pistama, pa se prilikom projektiranja ovakvih konstrukcija posebnu pažnju treba usmjeriti upravo na ovu pojavu.

Betoni na bazi recikliranog agregata pokazuju dobru otpornost na habanje, čak i bolju od betona s vapnenačkim agregatom, što se može pripisati boljoj pionjivosti cementne paste i recikliranog agregata (Sironić, 2010.).

7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

7.1. Uvod

Eksperimentalni dio rada obuhvatio je pripremu betonskih mješavina i laboratorijska ispitivanja koji su provedeni dijelom u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci, a dijelom u okviru projekta Unaprjeđenje modela stjecanja stručnih kompetencija učenjem uz rad kroz izradu diplomskog rada (GraDiS), u laboratoriju i betonari tvrtke GP Krk d.d.-a. Sva laboratorijska ispitivanja su provedena u skladu s hrvatskim normama. Pripremljeni su uzorci i ispitana svojstva svježeg i očvrslom samoslijegajućeg betona s RBA. Projekt sastava samoslijegajućeg betona preuzet je od tvrtke GP Krk d.d.

Na osnovu tog sastava referentne mješavine projektirane su dvije betonske mješavine i to:

- beton s 30% zamjenom RBA (BRA30)
- beton s 50% zamjenom RBA (BRA50).

Od svake recepture izrađeno je 12 kocki (dimenzija 150x150x150 mm), 3 valjka (dimenzija $d=150$ mm i $h=300$ mm), 3 prizme (dimenzija 100x100x400) i 3 kockice (dimenzija 70x70x70 mm), odnosno $0,08$ m³, što je ukupno $0,24$ m³ betona.

Provedena su sljedeća ispitivanja na svježem betonu:

- rasprostiranje slijeganjem,
- određivanje viskoznosti V-lijevkom
- određivanje sposobnosti zaobilaženja prepreka L-kutijom.

Sljedeća ispitivanja su provedena na očvrslom betonu:

- tlačna čvrstoća
- vlačna čvrstoća savijanjem i cijepanjem
- plinopropusnost
- dubina prodiranja vode pod tlakom

- otpornost na habanje na očvrslom betonu.

Cilj laboratorijskih ispitivanja bio je analizirati utjecaj zamjene dijela prirodnog agregata recikliranim od betonskog loma na svojstva samoslijegajućeg betona.

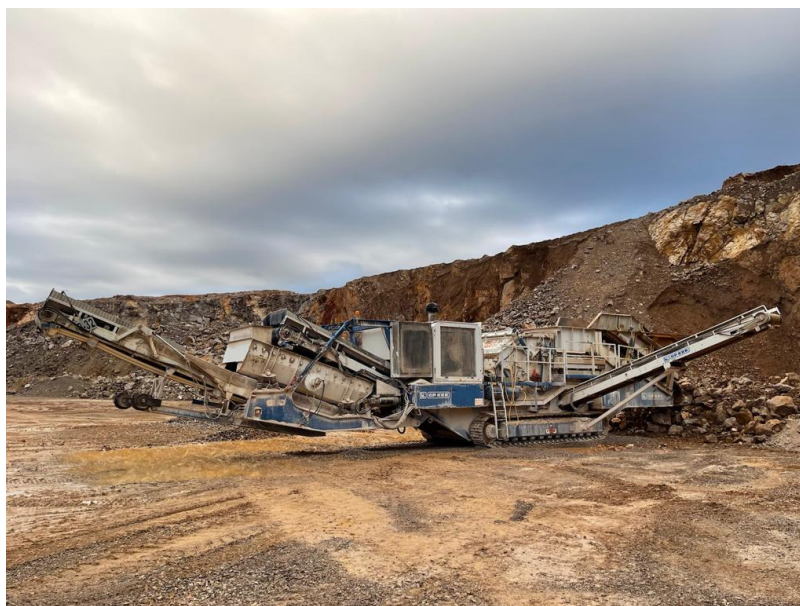
7.2. Materijali

Materijali koji su korišteni u izradi betonskih mješavina su:

- cement CEM I 42,5 R,
- voda iz gradskog vodovoda,
- reciklirana voda,
- superplastifikator,
- filer, mljeveni vapnenac,
- agregat – drobljeni vapnenac s kamenoloma Garica u tri frakcije (0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm),
- reciklirani betonski agregat – drobljene betonske kocke u tri frakcije (0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm).

Pri izradi referentne betonske mješavine korištena je voda iz gradskog vodovoda, dok se pri izradi preostalih dvaju betonskih mješavine koristila reciklirana voda.

RBA je nastao drobljenjem ispitanih betonskih kocki koje su prethodno korištene u ispitivanjima čvrstoće u laboratoriju tvrtke GP Krk d.d.. Betonske kocke su drobljene u pokretnoj drobilici na kamenolomu Tresni Breg kao što je prikazano na slici 34.



Slika 30: Pokretna drobilica na kamenolomu Tresni Breg

7.3. Projektiranje sastava svježeg samoslijegajućeg betona

Projektiranje betonske mješavine provedeno je prema Europskim smjernicama (The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.). Za svaku mješavinu rađene su probne mješavine. Za referentnu mješavinu rađeno je 6 probnih mješavina od 1 m³ kako bi se provjerila konzistencija i provele korekcije betonske mješavine ukoliko je potrebno. Za druge dvije betonske mješavine nisu rađene probne mješavine, nego su se na osnovu najbolje referentne mješavine odredile projektirali sastavi betonskih mješavina sa 30% i 50% zamjene udjela RBA. Projektirani razred tlačne čvrstoće je C40/50.

7.3.1. Sastavi betonskih mješavina

Budući da je istraživanje u okviru ovoga rada provedeno prema recepturi za mješavine SCC proizvođača GP Krk d.d., u nastavku nisu naznačene mase pojedinih sastojaka nego je dan popis sastojaka koji su korišteni za pojedinu mješavinu. Za sve je mješavine korištena jednaka masa pojedinih istih sastojaka i to: cementa, agregata 0 – 4 mm, filera, superplastifikatora i vode s vodocementnim omjerom 0,3. U mješavini BRA30 zamijenjeno je 30% prirodnog agregata s RBA dok je u mješavini BRA50 zamijenjeno 50% prirodnog agregata s RBA.

7.4. Izrada betonskih mješavina

Nakon definiranja točnih sastava betonskih mješavina, pristupilo se izradi betonskih mješavina. Referentna betonska mješavina rađena je u betonari Krk tvrtke GP Krk d.d., dok su druge dvije mješavine rađene u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Prilikom izrade referentne betonske mješavine korištena je NMA metoda miješanja, dok se prilikom izrade preostalih dvaju mješavina koristila TSMA metoda miješanja. NMA metodom se ukupna količina vode dodaje odjednom i to u već pripremljenu mješavinu agregata i cementa. Nakon dodavanja vode pristupa se miješanju u trajanju od 60 sekundi. Nakon završetka miješanja uzorkuje se svježa betonska mješavina kako bi se provjerila svojstva svježeg betona. Prilikom pripreme mješavine TSMA metodom najprije se dodaju agregat i polovica potrebne vode, pa se pristupa miješanju 60 s. Zatim se dodaje cement, miješa se 30 s i nakon toga dodaje preostala voda u kojoj se može nalaziti i superplastifikator, kao što je ovdje bio slučaj. Nastavlja se s miješanjem idućih 120 s.

Nakon ispitivanja svojstava svježeg betona pristupa se izradi betonskih uzoraka. Uzorke ostavljamo 24 h na sobnoj temperaturi, $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ i vlažnosti do 50%. Nakon toga uzorci se raskalupljuju i ostavljaju u bazenu, koji je ispunjen vodom, idućih 28 dana na njegovanju.

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja koja su izvršena dijelom u laboratoriju tvrtke GP Krk d.d. na Krku i dijelom u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Svi rezultati se odnose na prethodno navedene uzorke betonskih mješavina.

7.5. Ispitivanje betonskih mješavina

7.5.1. Sposobnost tečenja svježeg SCC

Ispitivanje sposobnosti tečenja ispitano je metodom slijeganja rasprostiranjem prema normi HRN EN 12350-8 uz pomoć Abramsovog kalupa kako je opisano i u poglavlju 4.2.1. Ispitivanje je provedeno na svim mješavina. U tablici 10 prikazani su rezultati ispitivanja.

Tablica 10: Rezultati ispitivanja sposobnosti tečenja

Sposobnost tečenja				
Oznaka mješavine	d₁ (mm)	d₂ (mm)	(d₁+d₂)/2 (mm)	Razred rasprostiranja
REF	650	630	640	SF1
BRA30	830	730	780	SF3
BRA50	810	730	770	SF3

7.5.2. Viskoznost

Ispitivanje viskoznosti provedeno je s pomoću V-lijevka prema normi HRN EN 12350-9 i kako je opisano u poglavlju 4.2.2.. Ispitivanje je provedeno na svim mješavinama. U tablici 11 prikazani su rezultati ispitivanja V-lijevkom i t_{500} dobiveno iz ispitivanja sposobnosti tečenja.

Tablica 11: Rezultati ispitivanja viskoznosti

Viskoznost				
Oznaka mješavine	t_v (s)	t₅₀₀ (s)	Razred viskoznosti (V-lijevak)	Razred viskoznosti (t₅₀₀)
REF	15,52	5,26	VF2	VS2
BRA30	14,05	6,41	VF2	VS2
BRA50	17,32	7,91	VF2	VS2

7.5.3. Sposobnost zaobilaženja prepreka

Ispitivanje sposobnosti zaobilaženja prepreka provodi se prema normi HRN EN 12350-10 s pomoću L-kutije s tri armaturne šipke kako je opisano u poglavlju 4.2.3.. Ispitivanje je provedeno na svim mješavinama. U tablici 12 prikazani su rezultati ispitivanja sposobnosti zaobilaženja prepreka.

Tablica 12: Rezultati ispitivanja zaobilaženja prepreka L-kutijom

Sposobnost zaobilaženja prepreka				
Oznaka mješavine	H₁ (mm)	H₂ (mm)	H₂/H₁ (/)	Razred ispitivanja
REF	110	95	0,86	PA2
BRA30	100	90	0,90	PA2
BRA50	100	90	0,90	PA2

7.5.4. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća ispitana je prema normi HRN EN 12390 – 3. Tlačna čvrstoća ispitana je na normiranim kockama brida 150 mm koje su čuvane u vodi temperature 20±2°C 28 dana (detaljno opisano u poglavlju 4.3.1.). Karakteristična tlačna čvrstoća utvrđena ispitivanjem mora biti jednaka ili veća od karakteristične tlačne čvrstoće traženog razreda tlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća ispitana je na 6 uzoraka svake mješavine, ukupno 18 uzoraka. U tablici 13 prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na svim mješavinama.

Tablica 13: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća (MPa)			
Oznaka uzorka	REF	BRA30	BRA50
K1	53	61,71	63,91
K2	55,2	64,92	58,11
K3	52,8	59,62	55,88
K4	57,3	58,03	60,68
K5	58,1	61,69	66,45
K6	56,4	65,86	66,58
Sr.vrijednost	55,47	61,79	61,94
Sdev	2,21	3,00	4,44

Nakon provedenih ispitivanja tlačne čvrstoće uočeno je da se dobiveni rezultati ne poklapaju s očekivanim rezultatima na osnovu dosadašnjih saznanja i istraživanja Žuže (2012.) Dakle, Očekivan je pad tlačne čvrstoće betonskih mješavina sa udjelom RBA. U ovom slučaju to se nije dogodilo pa su provedena međulaboratorijska ispitivanja tlačne čvrstoće kako bi se odbacio uzrok ispitivanja na različitim prešama. U betonari Krk GP KRK d.d.-a napravljena je mješavina normalnog betona čija je tlačna čvrstoća ispitana i u laboratoriju tvrtke GP Krk d.d. i u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakuleta u Rijeci. Na osnovu rezultata prikazanih u tablici 14 vidljivo je nepostojanje neusklađenosti između tlačnih preša. Zaključak koji se nameće jeste da metoda dvostrukog miješanja (TSMA) uvelike može utjecati na tlačnu čvrstoću betona, što je ovim radom i dokazano.

Tablica 14: Rezultati međulaboratorijskih ispitivanja tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća (provjera)		
Oznaka uzorka	30P-GPKRK	30P-GRADRI
K1	36,3	33,16
K2	38,2	37,88
K3	39,5	37,59
K4	39,1	32,13
K5	37,1	37,46
K6	36,9	34,07
Sr. vrijednost	37,85	35,38
Sdev	1,29	2,56

7.5.5. *Vlačna čvrstoća*

Vlačna čvrstoća ispitana je prema normi HRN EN 12390-5. Vlačna čvrstoća ispitana je na normiranim prizmama dimenzija 100x100x400 mm koje su čuvane u vodi temperature $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 28 dana (detaljnije opisano u poglavlju 4.3.2.). Uzorci su opterećeni jednom koncentriranom silom u sredini raspona. Brzina nanošenja opterećenja je 0.05 MPa/s. Vlačna čvrstoća ispitana je na 3 uzorka prizmi svake mješavine, ukupno 9 prizmi i cijepanjem na 6 uzoraka kocki svake mješavine, ukupno 18 kocki. U tablici 15 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem na uzorcima prizme, a u tablici 16 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće.

Tablica 15: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

Vlačna čvrstoća (MPa)			
Oznaka uzorka	REF	BRA30	BRA50
P1	6,11	7,62	7,36
P2	5,9	8,49	7,33
P3	5,39	8,11	7,26
Sr. vrijednost	5,80	8,07	7,32
Sdev	0,37	0,44	0,05

Tablica 16: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća cijepanjem (MPa)			
Oznaka uzorka	REF	BRA30	BRA50
K1	3,7	5,32	5,66
K2	3,76	4,85	4,57
K3	4,11	4,86	4,12
K4	4,23	4,57	3,65
K5	3,99	4,82	4,26
K6	3,66	3,44	3,44
Sr. vrijednost	3,91	4,64	4,28
Sdev	0,24	0,64	0,79

7.5.6. Plinopropusnost

Metode za laboratorijsko ispitivanje plinopropusnosti još uvijek nisu normirane, pa se plinopropusnost ispituje prema preporukama od strane tehničkog odbora 116-PCD unutar Europske organizacije RILEM. Plinopropusnost ili propusnost dušika ispitana je prema preporukama Cembureau kako je opisano u poglavlju 4.3.3.. Uzorci, valjci, koji su ispitani promjera su 150 mm i visine 50 mm. Plinopropusnost je ispitana na 3 uzorka svake mješavine, ukupno 9 uzoraka. U tablici 17 prikazani su rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona.

Tablica 17: Rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona

Prosječni specifični koeficijent prolaska kisika K (m²)			
Oznaka uzorka	REF	BRA30	BRA50
PL1	3,68	3,08	-
PL2	3,81	-	7,28
PL3	3,56	1,73	3,34
K_{srednje}	3,68	2,41	5,31
Sdev	0,13	0,95	2,79
Plinopropusnost	Srednja	Srednja	Srednja
Kvaliteta	Normalna	Normalna	Normalna
*rezultati su prikazani u jedinici 10 ⁻¹⁷ m ²			

7.5.7. Određivanje dubine prodiranja vode pod tlakom

Određivanje dubine prodiranja vode pod tlakom je ispitivanje koje se koristi kako bi se odredila vodopropusnost betona. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN 12390-8. Uzorci koji se ispituju su kocke brida 150 mm čuvane u vodi temperature 20±2°C 28 dana kako je opisano i u poglavlju 4.3.4.. Ispitano je 6 uzoraka svake mješavine, ukupno 18 uzoraka. Ispitivanje je

provedeno u uređaju za ispitivanje vodonepropusnosti betona Controls 55-C0246/6 sa 6 ispitnih mjesta. U tablici 18 prikazani su rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode.

Tablica 18: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode pod tlakom

Određivanje dubine prodiranja vode pod tlakom (mm)			
Oznaka uzorka	REF	BRA30	BRA50
K1	16,5	16,75	19,85
K2	19,5	18	15
K3	11	8,75	-
K4	21	9	-
K5	12	8,75	9,75
K6	12,5	16,85	12,05
Sr. vrijednost	15,42	13,02	14,16
Sdev	4,1	4,60	4,36

7.5.8. Otpornost na habanje

Otpornost na habanje ispitano je prema normi HRN EN 13892-3. Ispitivanje je provedeno na Boehme uređaju na uzorcima kocke duljine brida 70 mm čuvane u vodi temperature $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 28 dana. Nakon njegovanja, uzorci su izvađeni i osušeni u sušioniku na 105°C 24 sata (detaljnije opisano u poglavlju 4.3.5.). Ispitana su 3 uzorka svake mješavine, ukupno 9 uzoraka. U tablici 19 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na habanje.

Tablica 19: Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje

Gubitak volumena ΔV (cm³/50cm²)			
Oznaka uzorka	REF	BRA30	BRA50
KC1	13	17	15
KC2	12	12	13
KC3	14	15	14
Sr.vrijednost	13	15	14
Sdev	1	3	1
Razred otpornosti na habanje	XC3	XC3	XC3

7.6. Analiza rezultata ispitivanja

7.6.1. Sposobnost tečenja svježeg SCC

Referentna mješavina betona spada u razred rasprostiranja SF1 koja je prikladna za ugradnju pumpom, nearmirane ili slaboarmirane elemente, elemente koji su kratki i ne zahtijevaju dugo horizontalno tečenje, dok su ostale dvije mješavine pogodne za elemente s gusto složenom armaturom. Obje mješavine s udjelom RBA, spadaju u razred rasprostiranja SF3 i imaju dulje vrijeme rasprostiranja u odnosu na REF mješavinu. Kako je dokazano i u radu Macan (2016.), RBA utječe na konzistenciju betona. Utjecaj RBA na konzistenciju betona vidljiv je kao smanjenje pokretljivosti betonske mješavine jer se smanjuje količina slobodne vode u cementnoj pasti, zbog većeg upijanja vode RBA.

7.6.2. Viskoznost

Sve tri mješavine spadaju u isti razred viskoznosti VF2/VS2. Mješavine BRA30 i BRA50 imaju vrijeme t_{500} nešto dulje od REF mješavine. Razlog ovakvog rezultata leži u korištenju

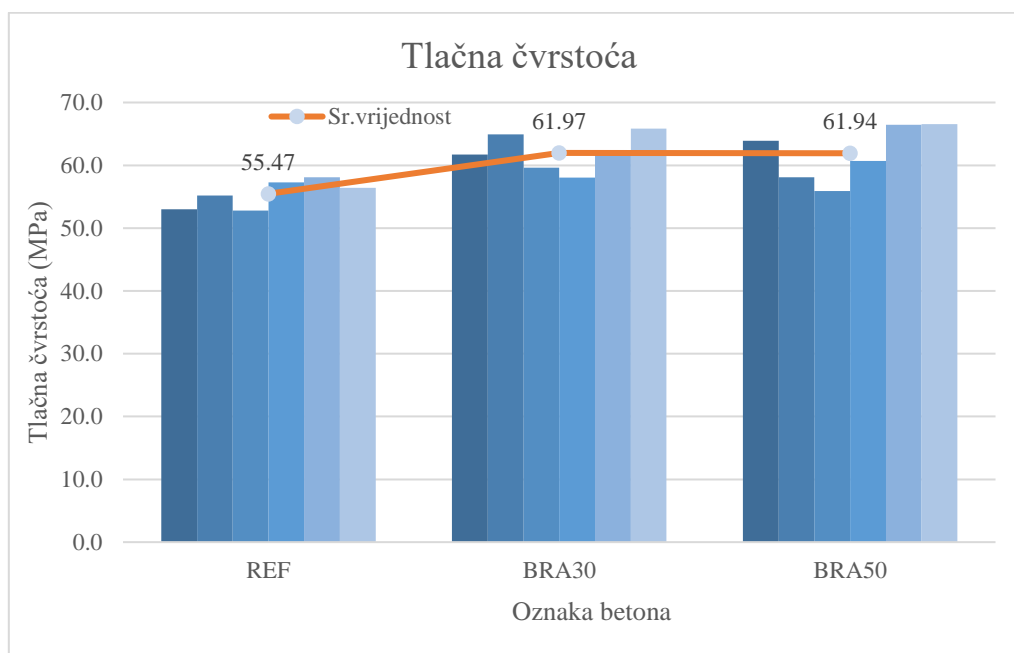
RBA koji u svom sastavu ima više cementnog morta, veće upijanje vode pa time i dulje vrijeme t_{500} .

7.6.3. *Otpornost zaobilaženja prepreka*

Razred otpornosti zaobilaženja prepreka za sve tri mješavine je PA2 s tim da betonske mješavine s RBA pokazuju malo bolje rezultate što se može pripisati boljoj sposobnosti tečenja.

7.6.4. *Tlačna čvrstoća*

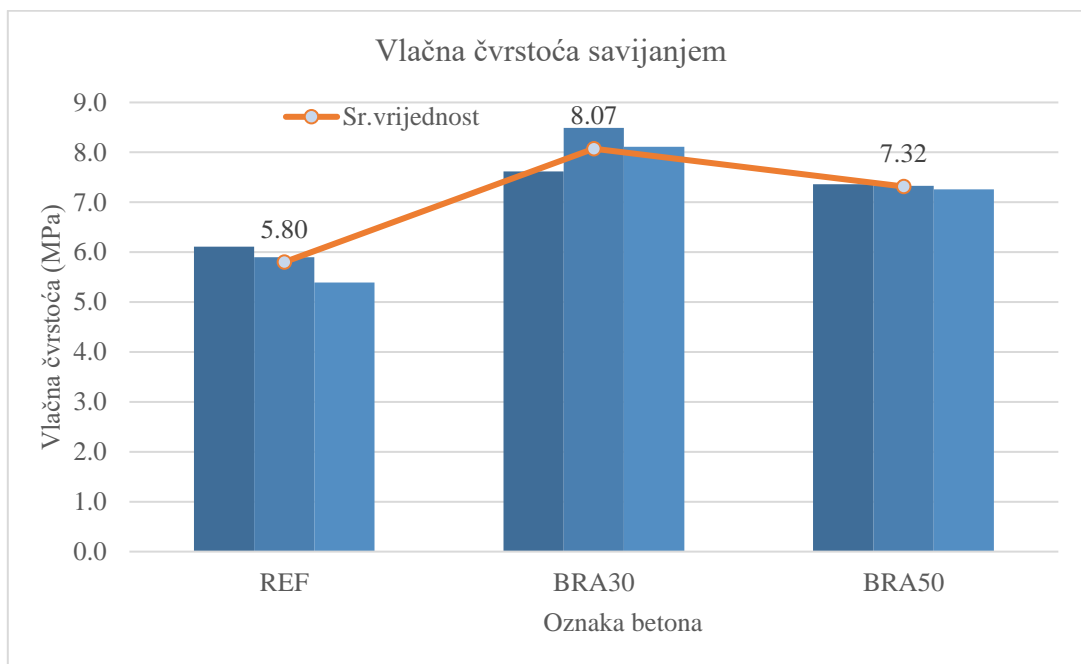
Sve tri mješavine zadovoljavaju propisani razred čvrstoće C40/50. Kod betona s 30% zamjene RBA uočeno je povećanje tlačne čvrstoće za 11,7% (slika 31), a kod betona s 50% zamjene vidljivo je povećanje tlačne čvrstoće za 11,6% (slika 31). Ovakav trend povećanja tlačne čvrstoće nije uobičajen. Anomalija koja se pojavila u rezultatima ispitivanja dogodila se i u ispitivanjima Žuže (2012.) i Macan (2016.). Ovakvi rezultati ispitivanja proizlaze iz metode dvostrukog miješanja (TSMA) ili iz načina pripreme mješavina. Metodom dvostrukog miješanja (TSMA) pripremljene su obje obje mješavine s RBA, dok se REF mješavina pripremala s normalnom metodom miješanja (NMA). Također, obje mješavine s RBA pripremale u laboratoriju dok se REF mješavina pripremala u betonari. Ovaj razlog se navodi jer pripremanje mješavine u laboratorijskim uvjetima bolje kontrolirano, s manjim odstupanjima. Najbolja tlačna čvrstoća postignuta je BRA30 mješavinom, iako mješavina BRA50 ne odstupa previše od dobivenih rezultata za BRA30 mješavinu. To se još može i povezati s većom gustoćom, manjom vodopropusnosti BRA30 mješavine.



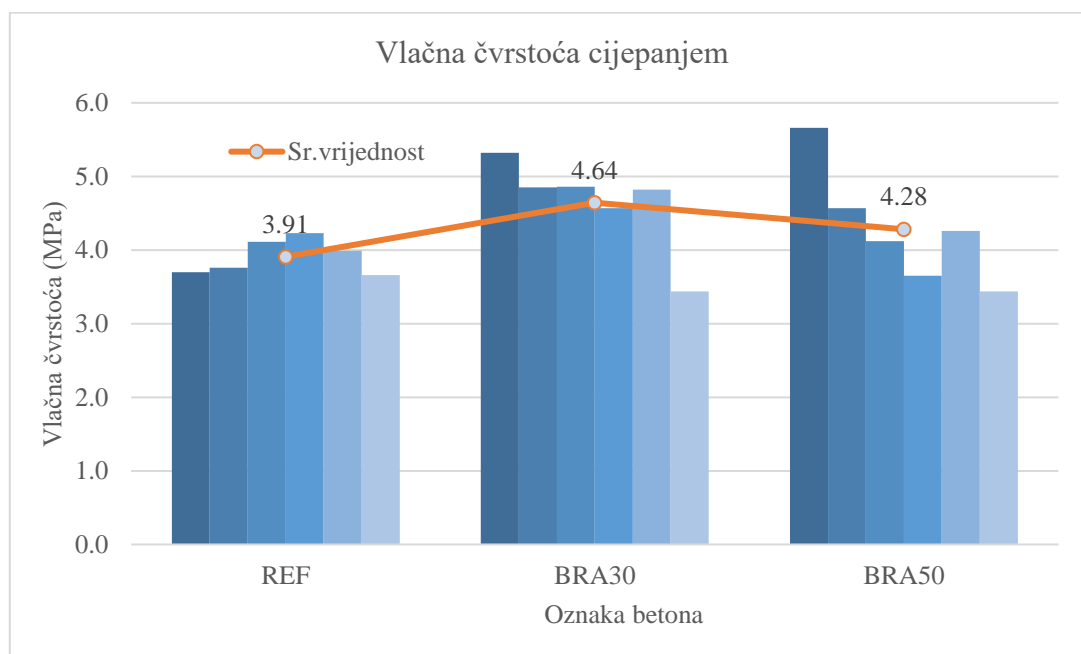
Slika 31: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

7.6.5. Vlačna čvrstoća

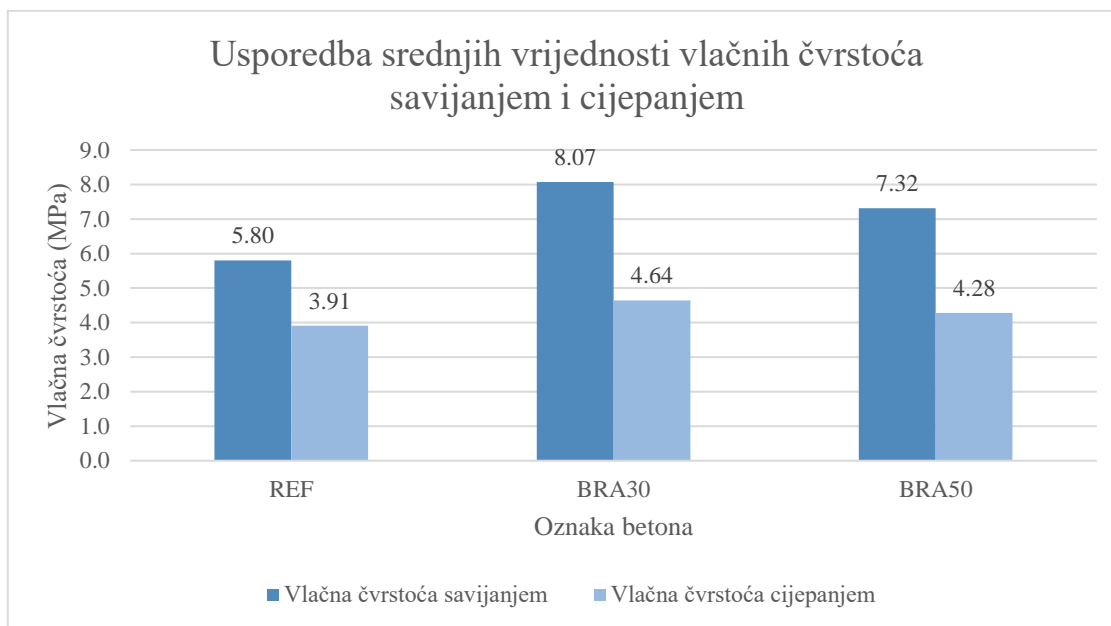
Mješavina BRA30 ima najveću vlačnu čvrstoću i savijanjem i cijepanjem. Ovim ispitivanjem dobiven je trend kretanja rezultata isti kao i kod ispitivanja tlačne čvrstoće. Navode se opet isti razlozi ove anomalije, a to su metoda dvostrukog miješanja i laboratorijska priprema mješavina. Usporedbom rezultata srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća savijanjem i cijepanjem dokazan je trend dobiven u ispitivanjima Liu-a i sur. (2014.). Također, omjer vlačne čvrstoće cijepanjem i tlačne čvrstoće varira između 0,07 do 0,08 što je pokazalo usporedne rezultate koje su objavili Alengaram i sur. (2014.).



Slika 32: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem



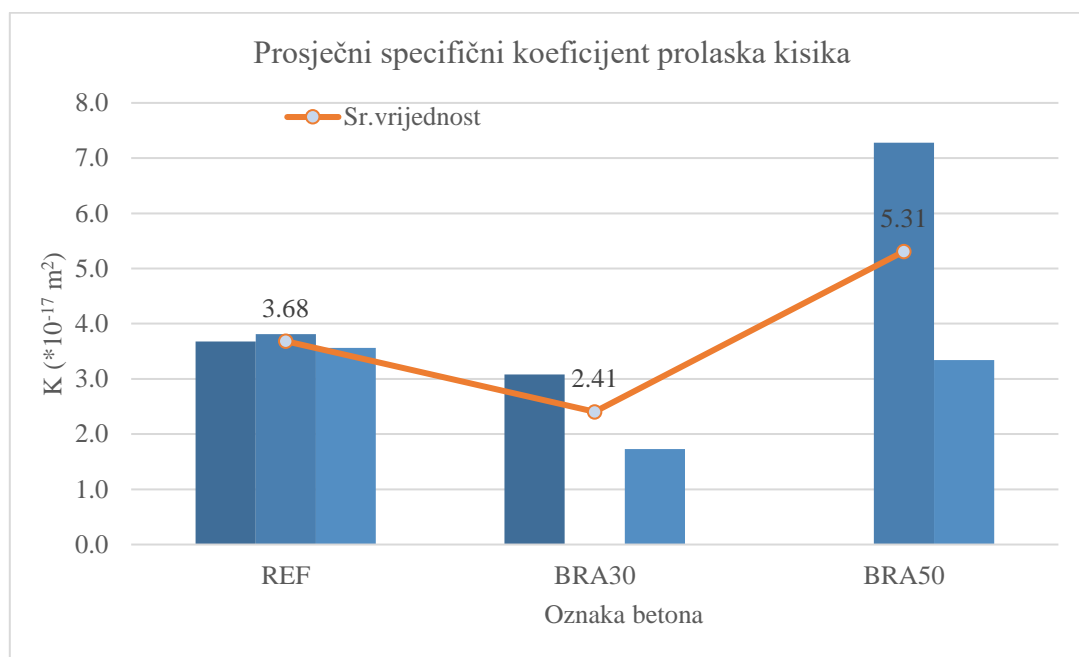
Slika 33: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem



Slika 34: Usporedba srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća savijanjem i cijepanjem

7.6.6. Plinopropusnost

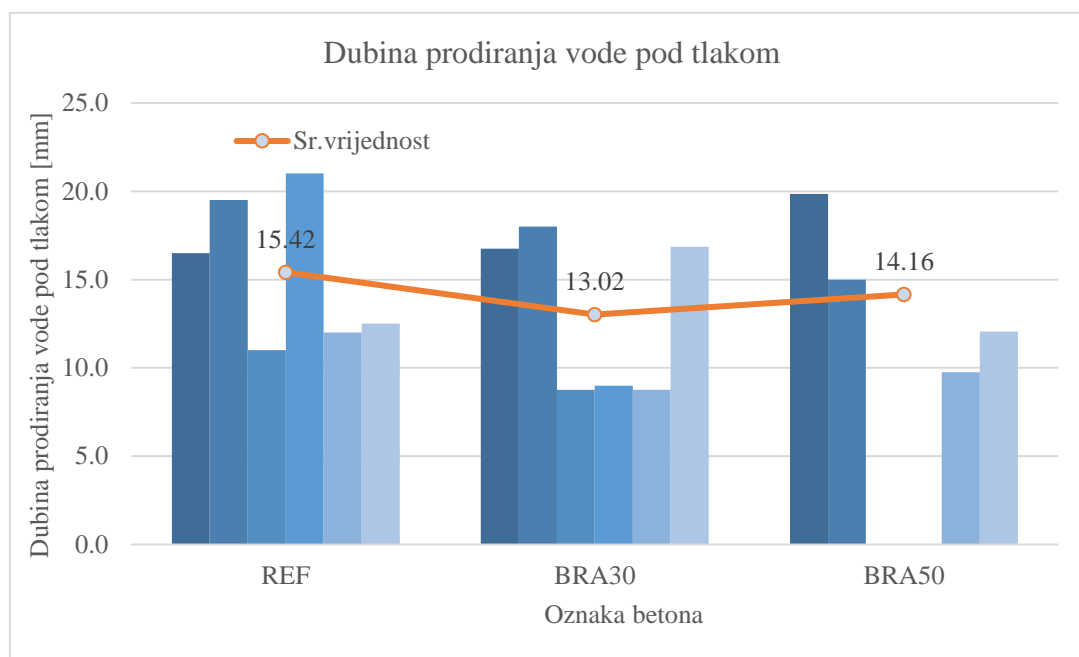
Pregledom rezultata ispitivanja plinopropusnosti vidljivo je smanjenje plinopropusnosti mješavine BRA30 i povećanje plinopropusnosti mješavine BRA50. Mješavina BRA30 je za 34,51% manje plinopropusna u odnosu na referentnu mješavinu, dok je mješavina BRA50 za 44,29% više plinopropusna u odnosu na referentnu mješavinu. Svi ovi rezultati vidljivi su na slici 35. Trend između BRA30 i BRA50 mješavine je logičan zbog većeg udjela RBA, no nelogičan slijed se javlja između REF mješavine i mješavina RBA. Ovaj nelogičan slijed je možda rezultat korištenja reciklirane vode u mješavinama s RBA, jer reciklirana voda u svom sastavu sadrži sitne čestice koje zapunjuju pore. Ostali mogući razlozi trenda ovih rezultata su isti kao i razlozi trenda kretanja čvrstoća, metoda miješanja i laboratorijska priprema mješavina.



Slika 35: Rezultati ispitivanja plinopropusnosti

7.6.7. Dubina prodiranja vode pod tlakom

Kada govorimo o dubini prodiranja vode pod tlakom ili vodopropusnosti iz rezultata ispitivanja vidljivo je smanjenje vodopropusnosti BRA30 mješavine za 15,6% i BRA50 za 8,17% u odnosu na REF mješavinu što je vidljivo na slici 36. Ovim rezultatima dobiven je sličan trend kao i kod ispitivanja plinopropusnosti. Kao što je navedeno i u prethodnom ispitivanju, REF mješavina bi trebala imati manju dubinu prodiranja vode pod tlakom u odnosu na mješavine sa RBA. Nameću se isti razlozi ovakvih rezultata, a to su: korištenje reciklirane vode u mješavina s RBA, metoda dvostrukog miješanja (TSMA) i laboratorijska priprema mješavina. Također, kao što je i gore spomenuto reciklirana voda sadrži čestice koje zapunjuju pore pa se time smanjuje vodopropusnost.

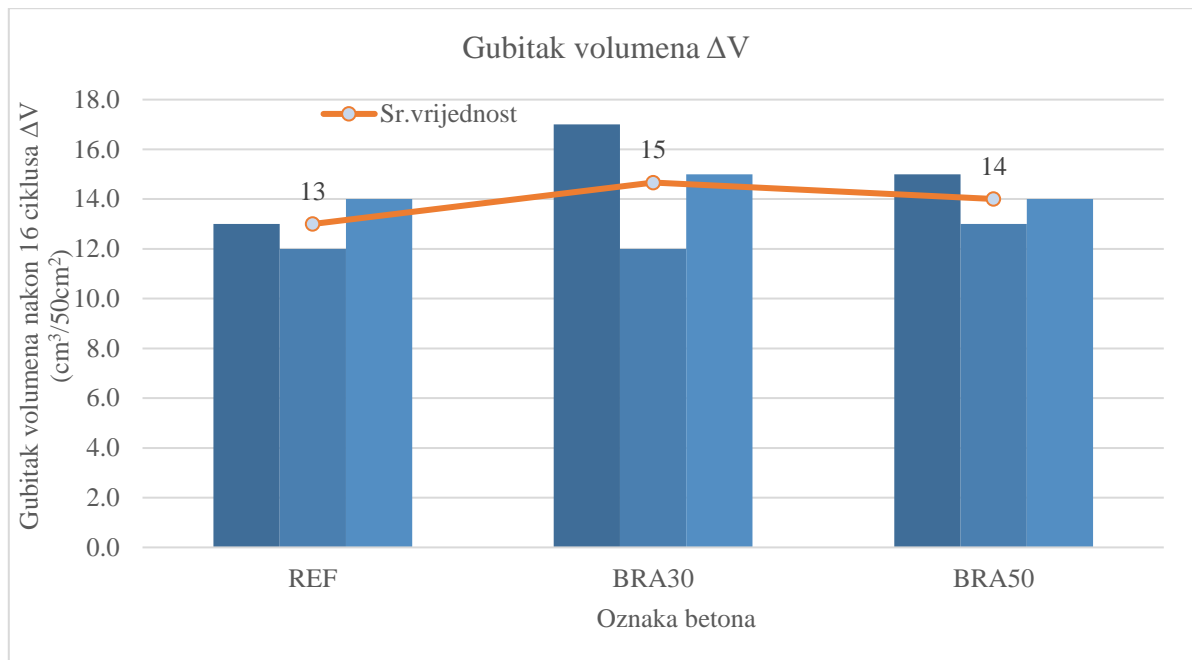


Slika 36: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode pod tlakom

7.6.8. Otpornost na habanje

Pregledom rezultata otpornosti na habanje vidljiva je nelogičnost u kretanju rezultata. Nelogičnost se ogleda u tome što mješavina BRA50 ima manji gubitak volumena u odnosu na BRA30. Ovakav rezultat zahtijeva detaljniju analizu zrna RBA kako bi se odredio postotak starog morta koji se nalazi u njima. Jednostavnije rečeno, iz ovih rezultata moglo bi se reći da su zrna agregata koja su ušla u sastav mješavine BRA30 imale više morta koji je slabiji od prirodnog agregata, što je dakako nelogično i zahtijeva dodatnu detaljniju analizu. Kada govorimo o odnosu rezultata između REF i BRA30 mješavine može se reći da je takav rezultat logičan zbog razlika svojstava RBA i prirodnog agregata. Osnovna razlika između prirodnog i RBA agregata jeste izgled zrna i sastav zrna, gdje se zrno RBA sastoji od zrna prirodnog agregata i starog cementnog morta. Ta količina starog morta se prema Damdelen-u (2018.), Butler-u i sur. (2013.), Rashid-u i sur. (2020.) i Ngo-u i sur. (2017.) utječe na gustoću i apsorpciju RBA. Također, trendove koji su spomenuti u prijašnjim ispitivanjima prate i svojstva trajnosti. Podaci Sironić-a (2010.) upućuju na povećanu poroznost RBA koja utječe

na smanjenje kvalitete veze između cementne paste agregata u zoni sučeljka te postojanje starog sučeljka.



Slika 37: Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje

8. ZAKLJUČAK

Samoslijegajući beton je beton kojeg karakterizira dobra sposobnost tečenja pod utjecajem vlastite težine, popunjavanje teško dostupnih mjesta u oplati i prolazak kroz gusto složene armaturne šipke, a da pritom zadržava svoju homogenost bez pojave segregacije za vrijeme i nakon ugradnje. S obzirom na rečeno, njegovo korištenje je opravdano jer se smanjuje vrijeme građenja, potreba za radnom snagom i opremom na gradilištu, lakše je izvođenje gusto armiranih konstrukcija i teško dostupnih mjesta, a ujedno se smanjuju buka i ozljede tokom vibriranja. Samoslijegajući beton karakterizira poboljšana fluidnost, dobra otpornost segregaciji, visoka čvrstoća, lakša ugradnja i povećana trajnost.

U novije vrijeme potiče se korištenje građevinskog otpada jer se u svijetu akumuliraju ogromne količine građevinskog otpada za čije zbrinjavanje nedostaje prikladnih odlagališta. Iz navedenih razloga proizlazi činjenica da se sve više proučavaju i razvijaju tehnike korištenja građevinskog otpada. Mnoga laboratorijska istraživanja, od kojih su neka spomenuta u ovom radu, ukazuju na mogućnost kreiranja kvalitetnog betona u čijem se sastavu nalazi udio RBA.

Betonske mješavine s RBA su projektirane na način da je zadržana ista količina cementa, agregata 0 – 4 mm, filera, superplastifikatora, vode, te konstantan vodocementni omjerom 0,3. Svi dobiveni rezultati provedenih ispitivanja ukazuju na različit stupanj postignute kvalitete samoslijegajućeg betona s RBA u odnosu na REF beton. Razlika je vidljiva u rezultatima tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem i cijepanjem, dubine prodiranja vode pod tlakom, plinopropusnosti i otpornosti na habanje, ali i u obradivosti samoslijegajućeg betona s RBA.

Na osnovu provedenih ispitivanja svježeg i očvrslog samoslijegajućeg betona, prema preporučenim metodama za samoslijegajuće betone (The Self-Compacting European Project Group, 2005.), došlo se do sljedećih zaključaka:

- Moguća je i opravdana upotreba RBA u betonskoj mješavini samoslijegajućeg betona.
- Pravilnim odabirom postotka RBA u betonskoj mješavini mogu se postići poboljšana svojstva kako svježeg tako i očvrslog betona.

- Zamjenom prirodnog agregata za određeni postotak RBA poboljšana je viskoznost i rasprostiranje betona.
- Sve betonske mješavine odgovaraju projektiranom razredu čvrstoće C40/50.
- Korištenjem dvostruke metode miješanja (TSMA) mogu se dobiti veće čvrstoće betona u odnosu na one spravljenije normalnom metodom miješanja(NMA).
- Korištenjem reciklirane vode smanjuju se plinopropusnost i vodopropusnost betonske mješavine s RBA u odnosu na mješavinu s prirodnim agregatom.
- Betonska mješavina s prirodnim agregatom otpornija je na habanje u odnosu na druge dvije mješavine s RBA.

Svakako u radu je ispitana samo jedna od mogućnosti upotrebe RBA u sastavu betonske mješavine samoslijegajućeg betona. Potrebno je daljnje istraživanje, projektiranje i analiziranje poboljšanih betonskih mješavina samoslijegajućeg betona s RBA. Rezultati ovog rada i analize su poticaj na daljnje istraživanje jer je primjena i ideja mnogo, a isto tako korištenjem ovakvih materijala, kao što je RBA, činimo male korake za čovječanstvo na kojima ćemo biti vrlo zahvalni u budućnosti.

LITERATURA

Alengaram, U. J., Mahmud, H., & Jumaat, M. Z. (2011). Enhancement and prediction of modulus of elasticity of palm kernel shell concrete. *Materials & Design*, 32(4), 2143-2148.

Algušić, M., & Lavriv, F. (2010). Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Bjegović, D., & Štirmer, N. (2015). Teorija i tehnologija betona. Sveučilišta u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb.

Butler, L., West, J. S., & Tighe, S. L. (2013). Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. *Construction and Building Materials*, 47, 1292-1301.

Concrete, S. C. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete. *BIBM*, et al, 22, 563.

Damdelen, O. (2018). Investigation of 30% recycled coarse aggregate content in sustainable concrete mixes. *Construction and Building Materials*, 184, 408-418.

De Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*, 23(2), 872-877.

EFNARC, S. (2002). Guidelines for self-compacting concrete. London, UK: Association House, 32, 34.

Etxeberria Larrañaga, M. (2004). Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete. Universitat Politècnica de Catalunya.

Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.

Glibo, N. (2017). Samozbijajući beton s dodatkom punila od mljevenih ispitnih betonskih kocaka (Diplomski rad, Sveučilište u Splitu. Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije).

Hansen TC (1992). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Third State-of-the-art Report, pp. 157.

Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and structures*, 19(3), 201-246.

Hansen, T. C., & Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete international*, 5(1), 79-83.

Ignjatović, I., & Marinković, S. (2009). Mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Materijali i konstrukcije*, 52(1), 40-51.

Janković, K., Nikolić, D., Bojović, D., & Lončar, L. (2010). Some properties of ultra-high strength concrete. *Materijali i konstrukcije*, 53(1), 43-51.

Jevtić, D. (1996). Svojstva svežeg i očvrstlog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine. Monografija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.

Jevtić, D., Zakić, D., & Savić, A. (2009). Specifičnosti tehnologije spravljanja betona na bazi recikliranog agregata. *Materijali i konstrukcije*, 1, 52-62.

Kikuchi, M., Mukai, T., & Koizumi, H. (1988, November). Properties of concrete products containing recycled aggregate. In *Second International Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry* (Vol. 2, pp. 595-604).

Klobučar, M. (2016). Analiza svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom karbidnog mulja (Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet).

Kreativni odjel. Reference. GP-Krk Montažni objekti.
www.kreativni.hr/reference.php?year=2018&cat=8&pid=1106. pristup 11.9.2021.

Kufrin, J. (2021.). Izvješće o gospodarenju građevnim otpadom u 2020. godini. Zagreb. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja.

Larbi, J. A., Heijnen, W. M. M., Brouwer, J. P., & Mulder, E. (2000). Preliminary laboratory investigation of thermally treated recycled concrete aggregate for general use in concrete. In Waste management series (Vol. 1, pp. 129-139). Elsevier.

Liu, M. Y. J., Chua, C. P., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2014). Utilization of palm oil fuel ash as binder in lightweight oil palm shell geopolymer concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.

Lovrić, M. (2016). Utjecaj punila od betonskog otpada na svojstva samozbijajućeg betona (Diplomski rad, Sveučilište u Splitu. Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije).

Macan, K. (2016.). Betoni s recikliranim agregatom. (Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet).

Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja (2022.). Gospodarenje otpadom. Privremeni podaci o gospodarenju građevnim otpadom u 2021. godini. www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjescia/ostalo/Privremeno%202021_05%20final_0.pdf. pristup 8.9.2022.

Mitrović, A., Đuričić, R., Ilić, B., & Živanović, B. (2005). Metakaolin-nova generacija dopunskih cementnih materijala. *Materijali i konstrukcije*, 48(3), 48-54.

Mrakovčić, S., (2019./2020.). Teorija i tehnologija betona, predavanja

Nagataki, S. (2009). Guideline for design and construction of concrete structures using recycled aggregates in Japan. In *Proceedings of the first ACI/VCA international seminar on recent advances in concrete technology and sustainability issues*, Hanoi, Vietnam (pp. 133-47).

Nagataki, S., Iida, K., Saeki, T., & Hisada, M. (2000). Properties of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. In *International Workshop on Recycled Concrete*.

Narodne novine 139/2009 Tehnički propis za betonske konstrukcije

Narodne novine 69/2016 Pravilnik o građevnom otpadu i otpadu koji sadrži azbest

Narodne novine 81/2020 Pravilnik o gospodarenju otpadom

Narodne novine 84/2021 Zakon o gospodarenju otpadom

Narodne novine 90/2015 Pravilnik o katalogu otpada

Narodne novine 94/2013 Zakon o održivom gospodarenju otpadom

Ngo, T. T., Bouvet, A., Debieb, F., & Aggoun, S. (2017). Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 91-102.

NL Scientific, Concrete testing equipments - J-Ring Apparatus, nl-test.com/products/concrete-testing-equipments/product/361-j-ring-apparatus-nl-4028-x-001, pristup 5.8.2022.

Poon, C. S., & Lam, C. S. (2008). The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 283-289.

Poon, C. S., & Lam, C. S. (2008). The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 283-289.

Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2007). Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures*, 40(9), 981-988.

Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and concrete research*, 34(1), 31-36.

Puntarić, E., Požgaj, Đ., Kušević–Vukšić, M., & Kufrin, J. (2021). Izvješće o komunalnom otpadu za 2020. godinu. Zagreb. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja.

Radonjanin, V., Malešev, M., & Marinković, S. (2010). Mogućnosti primene starog betona kao nove vrste agregata u savremenom građevinarstvu. *Zaštita materijala*, 51(3), 178-187.

Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment*, 42(1), 407-415.

Rashid, K., Rehman, M. U., de Brito, J., & Ghafoor, H. (2020). Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124316.

Rukavina, B. (2021). Svojstva samozbijajućeg betona armiranog sintetičkim vlaknima (Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet).

Sanchez de Juan M., Gutierrez P.A.: Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, 2004., str. 9.,

Savić, A. R. (2015). Istraživanje svojstva svežeg i očvrslog samozbijajućeg betona sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata. (Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet).

Scribd, Sastojci betona, www.scribd.com/doc/7253820/Sastojci-betona, pristup 1.8.2022.

Seminarski-diplomski, Pumpani beton, www.seminarski-diplomski.co.rs/TEHNOLOSKI%20SISTEMI/Pumpani-beton.html, pristup 5.8.2022.

Shimanovskadm, Burj Khalifa je najviši neboder. Projekt Burj Khalifa i izgradnja najviše zgrade na svijetu, www.shimanovskadm.ru/hr/anapa/burdzh-halifa---samyi-vysokii-neboskreb-burdzh-halifa-proekt-i-stroitelstvo.html, pristup 22.8.2022.

Sironić, H. (2010). Primjena recikliranih agregata u proizvodnji betona. (Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet).

Štirmer, N., & Pečur, I. B. (2009). Projektiranje sastava samozbijajućeg betona. *Građevinar*, 61(4), 321-329.

Tam, V. W., & Tam, C. M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Construction and building Materials*, 22(10), 2068-2077.

Tam, V. W., & Tam, C. M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Construction and building Materials*, 22(10), 2068-2077.

Tam, V. W., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and concrete research*, 35(6), 1195-1203.

Tam, V. W., Tam, C. M., & Le, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 82-101.

Tam, Vivian WY, Chi Ming Tam, and Khoa N. Le. "Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches." *Resources, Conservation and Recycling* 50.1 (2007): 82-101.

The constructor, Fill Box Test for Self Compacting Concrete for Workability, theconstructor.org/concrete/fill-box-test-for-self-compacting-concrete/6043/, pristup 5.8.2022.

Wikipedia, Södra länken, www.sv.wikipedia.org/wiki/S%C3%B6dra_1%C3%A4nken, pristup 22.8.2022.

Wurth, D. (2011). Ovisnost sastava i svojstva samozbijajućeg betona. Građevinski fakultet, Zagreb.

Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., & Wirquin, E. (2003). Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 223-232.

Žuža, T.,(2012.). *Betoni s recikliranim betonskim agregatom*. (Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet)