

# Razvoj cementa s recikliranim građevnim materijalima

---

Jurjević, Josipa

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:807903>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josipa Jurjević

# RAZVOJ CEMENATA S RECIKLIRANIM GRAĐEVNIM MATERIJALIMA

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Nina Štirmer

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Josipa Jurjević

# **DEVELOPMENT OF CEMENTS WITH RECYCLED BUILDING MATERIALS**

Master thesis

Supervisor: prof.dr.sc. Nina Štirmer

Zagreb, 2024.

## ZAHVALE

Velike zahvale mentorici prof. dr. sc. Nini Štirmer na stručnom vodstvu i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada. Zvezdani Matuzić, ing. građ. zahvaljujem na asistenciji u laboratoriju i pomoći pri primjeni teorijski stečenog znanja.

Također bih zahvalila tvrtki Holcim Hrvatska, a osobito Klaudiji Jurišić Vukošić, mag. ing. aedif., na pruženoj mogućnosti rada na ovom ispitivanju i mogućnosti da provedena ispitivanja i stečena znanja na stručnoj praksi prenesem u ovaj rad.

Hvala svim prijateljima koji su bili tu da mi pruže podršku i vrate vjeru kada je to trebalo. I na kraju, najveće HVALA mojoj obitelji koja je bila uz mene u svim usponima i padovima mog školovanja. Bez njihove podrške i motivacije ne bi bilo ni ovog rada.

## SAŽETAK

Jedan od vodećih problema građevinske industrije je zbrinjavanje građevnog otpada. Istraživanja pokazuju da je građevni otpad moguće reciklirati i primijeniti u cementnim kompozitima.

U radu su ispitana svojstva u svježem stanju (gustoća, temperatura, sadržaj zraka i konzistencija slijeganjem) i svojstva u očvrnulom stanju (tlačna čvrstoća, vodonepropusnost, otpornost na prodor klorida i otpornost na smrzavanje i odmrzavanje) betonskih mješavina izrađenih s cementom s recikliranim betonom. Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima referentnih mješavina.

Ključne riječi: građevni otpad, cement, cement s recikliranim betonom

## SUMMARY

One of the leading issues of construction industry is disposal of construction waste. Researches have shown that it's possible to recycle construction waste and then apply it in cement composites.

In this thesis, the properties in fresh state (density, temperature, air content and slump consistency) as well as in hardened state (compressive strength, depth of penetration of water under pressure, chloride penetration resistance and freezing and thawing resistance) of the concrete mixtures made with recycled concrete cement have been tested. Obtained results were compared with those of reference mixtures.

Key words: construction waste, cement, cement with recycled concrete

## SADRŽAJ

ZAHVALE.....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY .....	iii
SADRŽAJ.....	iv
1 UVOD.....	1
2 CEMENTNA INDUSTRIJA.....	2
2.1 Proizvodnja cementa.....	2
2.2 Cementna industrija i aktualna pitanja zaštite okoliša .....	4
3 POSTOJEĆE VRSTE CEMENTA.....	6
3.1 Cementi opće namjene.....	6
3.2 Posebne vrste cemenata opće namjene.....	7
3.2.1 Cement opće namjene male topline hidratacije .....	8
3.2.2 Sulfatnootporni cement.....	8
3.2.3 Aluminatni cement.....	8
3.2.4 Bijeli cement.....	9
3.2.5 Metalurški cement male rane čvrstoće.....	9
3.2.6 Posebni cement vrlo male topline hidratacije.....	9
3.2.7 Miješani cementi.....	9
3.2.8 Cement s recikliranim građevnim materijalima.....	10
3.3 Alternativni cementi.....	10
3.3.1 Kalcijski sulfoaluminatni cement.....	10
3.3.2 Magnezijski cement .....	10
3.3.3 Alkalno aktivna veziva .....	11
3.3.4 Cementi s velikim udjelom vapnenca i kalcinirane gline.....	11
3.3.5 Supersulfatni cement .....	12

---

4	CEMENT S RECIKLIRANIM GRAĐEVNIM MATERIJALIMA .....	13
4.1	Cement s recikliranom opekom.....	16
4.2	Cement s recikliranim betonom .....	18
5	EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	20
5.1	Sastavne komponente.....	22
5.1.1	Cement.....	22
5.1.2	Agregat.....	23
5.1.3	Voda.....	23
5.1.4	Superplastifikator .....	23
5.1.5	Aerant .....	24
5.2	Sastavi betonskih mješavina .....	24
5.3	Ispitivanja u svježem stanju .....	25
5.3.1	Konzistencija slijeganjem.....	25
5.3.2	Sadržaj zraka.....	26
5.3.3	Gustoća u svježem stanju.....	27
5.3.4	Temperatura svježeg betona.....	27
5.3.5	Rezultati ispitivanja u svježem stanju .....	28
5.4	Svojstva u očvrslulom stanju.....	29
5.4.1	Tlačna čvrstoća.....	29
5.4.2	Difuzija klorida .....	30
5.4.3	Ispitivanje vodonepropusnosti.....	32
5.4.4	Ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje.....	33
5.4.5	Rezultati ispitivanja u očvrslulom stanju .....	34
6	ZAKLJUČAK .....	38
	POPIS LITERATURE .....	39
	POPIS SLIKA .....	44
	POPIS TABLICA.....	45
	PRILOG A.....	46
	PRILOG B.....	47



PRILOG C ..... 49

## 1 UVOD

Cementna industrija jedan je od glavnih emitera stakleničkih plinova, posebno CO<sub>2</sub>. Proizvodnja cementa energetski je invazivan proces, pri kojem se za svaku tonu proizvedenog portlanskog cementa emitira približno jedna tona CO<sub>2</sub>. Većina emisije CO<sub>2</sub> iz proizvodnje cementa potiče od izgaranja fosilnih goriva i dekarbonizacije vapnenca [1]. Cementna industrija odgovorna je za oko 7 % ukupnih emisija CO<sub>2</sub>, a između 1850. i 2006. godine emitirano je oko 330 x 10<sup>9</sup> t CO<sub>2</sub> [2]. Iako je portlandski cement i dalje najčešće korišten na svjetskoj razini, raste interes za alternativama koje bi pomogle u smanjenju emisije CO<sub>2</sub> [3].

Uz interes za pronalaženjem veziva s malom potrošnjom energije i smanjenom emisijom CO<sub>2</sub>, raste i interes za primjenom otpadnih materijala od drugih industrija. Portlandcementni beton već uključuje širok raspon otpadnih materijala koji se koriste kao zamjenski cementni materijali, poput letećeg pepela od izgaranja ugljena, mljevene granulirane zgure iz proizvodnje željeza i čelika i silicijske prašine iz proizvodnje ferosilicija. Međutim, ovi materijali zamjenjuju samo dio cementa u betonu, obično u rasponu od 10 – 15 %. Postoji interes za daljnje proširenje ovog pristupa kako bi se stvorila veziva koja bi se sastojala u potpunosti ili gotovo u potpunosti od otpadnih materijala [4].

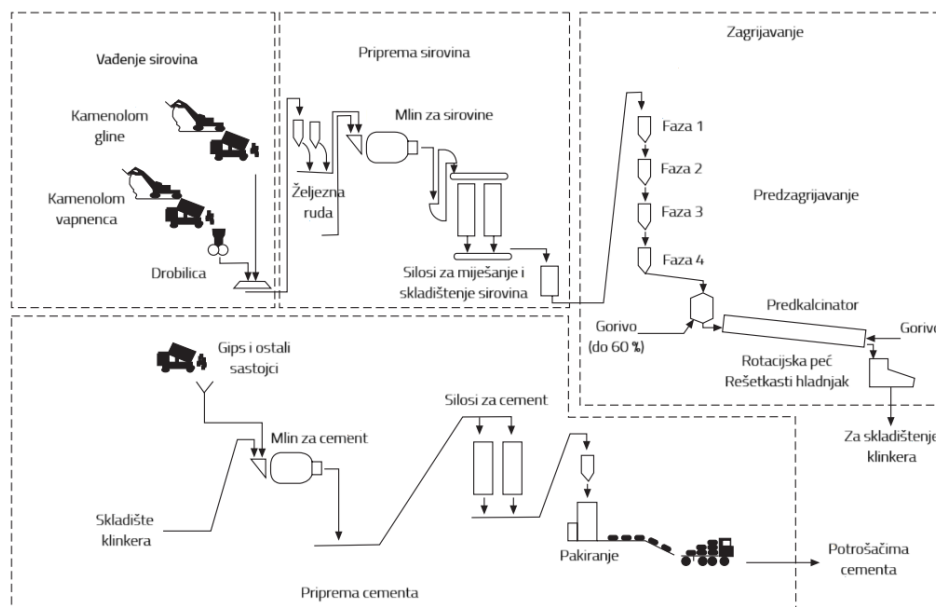
U svijetu se svake godine proizvede oko 3 milijarde tona građevinskog otpada od rušenja (engl. construction and demolition waste, CDW), od čega na Europsku uniju (EU) otpada otprilike 850 milijuna tona, što čini 31 % sveukupnog otpada generiranog u EU [5]. Dugo se otpad od betona i opeke koristio samo kao materijal za nasipavanje ili se odlagao na deponije, no krajem 20. stoljeća recikliranje CDW-a postaje sve važnije zbog sve veće pažnje prema zaštiti okoliša i postupnog smanjenja kapaciteta odlagališta [5-6]. Istraživači smatraju da recikliranje građevnog otpada, poput opeke i betona, kao djelomične zamjene za portlandski cement može biti rješenje za izazove održivosti građevinske industrije [7-8].

U ovom radu prikazan je utjecaj cementa s recikliranim betonom na svojstva betona u svježem i očvrslulom stanju.

## 2 CEMENTNA INDUSTRIJA

### 2.1 Proizvodnja cementa

Cement je hidrauličko građevinsko vezivo koje se stvrdnjava samostalno, bilo u zraku ili pod vodom. Današnji pojam portlandskog cementa odnosi se na hidraulički cement dobiven mljevenjem klinkera [2]. Portlandcementni klinker proizvodi se pečenjem, barem do sinteriranja, precizno određene smjese sirovina koje sadrže  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i male količine drugih materijala. Sirova smjesa, pasta ili suspenzija mora biti fino usitnjena, temeljito izmiješana i homogena [9]. Proces proizvodnje portlandskog cementa prikazan je na slici 1.



Slika 1. Pregled procesa proizvodnje cementa (Izvor:[10])

U nastavku je prikazan opis procesa proizvodnje cementa [10]:

i. Eksploatacija i drobljenje vapnenca:

Prirodna kalcijeva ležišta, poput vapnenca, lapora ili krede, sadrže kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) i vade se iz kamenoloma, koji su često smješteni u blizini tvornice cementa. Za radove u kamenolomima često se koristi otvoreni rudarski proces, koji uključuje bušenje, miniranje i korištenje teške opreme za transport materijala. Mogu biti potrebne vrlo male količine "korektivnih" materijala, poput željezne rude, boksita, škriljevca, gline ili pijeska, kako bi se dodao dodatni željezni oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), glinica

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) za prilagođavanje kemijskog sastava sirove smjese prema zahtjevima procesa i proizvoda.

ii. Mlin za sirovine:

Proces mljevenja utječe na proizvodnju cementa na najmanje dva načina. Prvo, povećanje finoće i homogenosti sirove smjese ubrzava reakcije klinkerizacije, što dovodi do manje varijabilnosti klinkera i stabilnijeg rada peći i bolje energetske učinkovitosti u proizvodnji klinkera ujednačene konzistencije. Drugi utjecaj odnosi se na finoću cementa koja poboljšava mehanička svojstva konačnog proizvoda.

Cilj mljevenja sirovina je proizvesti homogenu sirovu smjesu koja zadovoljava zahtjev za finoćom (manje od 10 – 15 % ostatka na situ od 90  $\mu\text{m}$ ).

iii. Silos za miješanje i skladištenje:

Kako bi se smanjile prirodne kemijske varijacije u raznim sirovinama, potrebno je učinkovito miješati i homogenizirati sirovine. To se postiže korištenjem silosa za miješanje.

iv. Izmjenjivač topline i peć:

Izmjenjivač topline je niz vertikalnih ciklona kroz koje prolazi sirova smjesa te nailazi na vruće ispušne plinove koji se kreću u suprotnom smjeru. U tim ciklonima dolazi do prijenosa toplinske energije iz vrućih plinova na sirovu smjesu, koja se predgrijava prije ulaska u peć.

Prije ulaska u peć smjesa se kalcinira, vapnenac se razgrađuje na vapno i ugljični dioksid što emitira 60 – 65 % cjelokupne emisije u proizvodnji cementa.

Kalcinirana smjesa zatim ulazi u peć gdje gorivo izravno zagrijava unutrašnjost na temperaturu do 1450 °C. Peć se rotira 3 – 5 puta u minuti, omogućavajući da materijal prolazi kroz sve toplije zone prema plamenu, gdje intenzivna toplina izaziva kemijske i fizičke reakcije koje djelomično rastaljuju smjesu, stvarajući klinker. Klinker se potom, kao užareni materijal, izbacuje iz peći te prolazi kroz različite vrste hladnjaka čime se djelomično vraća toplinska energija i smanjuje temperatura za daljnju obradu.

v. Hladnjak:

Iz peći vrući klinker (1500 °C) pada na rešetkasti hladnjak gdje se hladi na 170 °C dolaznim zrakom za izgaranje.

vi. Mlin za cement:

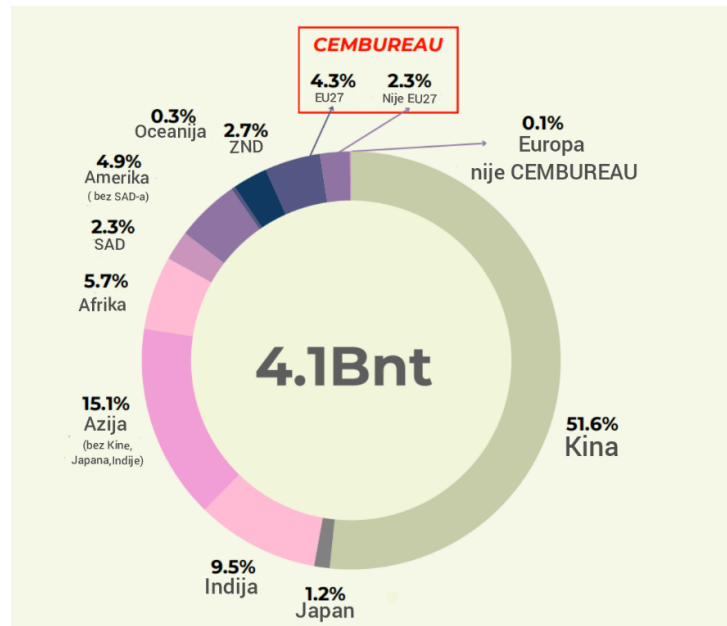
Ovo je završni korak u proizvodnji cementa. U ovom se koraku klinker melje zajedno s aditivima u cementnom mlinu.

vii. Skladištenje u silosima:

Konačni proizvod se homogenizira i pohranjuje u silose za cement, odakle se otprema na postaju za pakiranje (za cement u vrećama) ili u silos kamiona.

## 2.2 Cementna industrija i aktualna pitanja zaštite okoliša

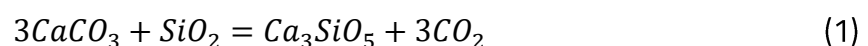
Cement, kao ključni sastojak betona, nezamjenjiv je u građevinarstvu, no njegova proizvodnja zahtijeva veliku količinu energije i dovodi do značajnih emisija CO<sub>2</sub>. Cementna industrija odgovorna je za oko 7 % ukupnih emisija CO<sub>2</sub> [11]. Emisije CO<sub>2</sub> iz proizvodnje cementa treći su najveći izvor emisija koje je teško eliminirati, nakon proizvodnje električne energije i industrije željeza i čelika. Osim emisije stakleničkih plinova, proizvodnja betona i morta uzrokuje više od 3 % globalne potrošnje energije, više od 5 % globalnih antropogenih čestica PM<sub>10</sub> i oko 2 % globalnog povlačenja vode. Proizvodnja cementa više se nego udvostručila u posljednja dva desetljeća, s 1,80 milijardi tona (Gt) u 2002. na 4,05 Gt u 2018. godini, uglavnom zbog socioekonomskog razvoja u Kini (0,64 Gt u 2002. na 2,2 Gt u 2018.). Ova stopa rasta bila je brža od rasta ukupne proizvodnje sekundarnih cementnih materijala, koja je pala s 97 % na 86 % udjela u proizvodnji cementa između 2002. i 2018. godine. Takav pad dogodio se uglavnom zbog smanjenja proizvodnje dvaju glavnih sekundarnih cementnih materijala (leteći pepeo iz ugljena i granulirana zgura iz visokih peći) s 25 % na 17 % udjela u ukupnoj proizvodnji cementa [12]. Globalna proizvodnja cementa 2022. godine procjenjuje se na oko 4,1 milijardu tona (Bnt) pri čemu je Kina zastupljena s više od 50 % svjetske proizvodnje cementa, s Indijom na drugom mjestu. EU27 zastupljena je s 4,3 % proizvodnje, a članice Europske udruge za cement (CEMBUREAU) predstavljale su 6,6 % svjetske proizvodnje (ovi su podaci još uvijek uključivali Tursku kao područje CEMBUREAU-a). Osim G20 zastupljenih zemalja, pet novih zemalja na euroazijskom kontinentu proizvelo je gotovo 7 % globalne proizvodnje cementa u 2022. godini, što je gotovo dva puta više od EU27 zemalja i više od CEMBUREAU članica. Na dalekom istoku s proizvodnjom prednjače Vijetnam (85 Mt) i Tajland (29 Mt) dok su na Bliskom istoku najveći proizvođači cementa bili Iran (63 Mt), Egipat (54 Mt) i Pakistan (46 Mt). Na slici 2 dan je grafički prikaz globalne proizvodnje cementa za 2022. godinu [13].



Slika 2. Svjetska proizvodnja cementa u 2022. godini po regijama i glavnim zemljama (Izvor: [13])

Globalno je postignut konsenzus da je prijetnja klimatskih promjena stvarna te su potrebne globalne akcije za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Cilj je smanjiti globalne emisije za 50 % ispod razine iz 1990. do 2050. godine, kako bi se ograničilo globalno zagrijavanje za 2 °C. Cementna industrija suočava se s izazovom prelaska na održivi model poslovanja i smanjenja emisije. Proizvodnja jedne tone cementa trenutno emitira između 0,65 i 0,92 tona CO<sub>2</sub> [14]. Zbog toga je vrlo vjerojatno da će emisije CO<sub>2</sub> iz globalne cementne industrije premašiti ukupne emisije Europske unije prije 2030. godine [15].

Jedna od glavnih komponenti koje su odgovorne za veliku emisiju ugljičnog dioksida cementa je kalcinacija vapnenca koji proizvodi CO<sub>2</sub> kao jedan od produkata reakcije kao što je prikazano u izrazu 1. Zamjena klinkera s alternativama može se značajno smanjiti ugljični dioksid koji nastaje ovim procesom. Moguće korištenje proizvodnih otpada koji u sebi sadrže veliku koncentraciju kalcijevog oksida za zamjenu običnog klinkera stvorit će put ne samo za smanjenje emisije nego učinkovito upravljanje tim otpadom. Primjer otpada koji se mogu koristiti kao zamjena za klinker su zgura, leteći pepeo, silicijska prašina i drugi. Glavni razlog zašto ovi otpadni materijali ne mogu potpuno zamijeniti vapnenac, koji se koristi za proizvodnju klinkera, je njihov niski sadržaj kalcija u usporedbi s vapnencem [16].



### 3 POSTOJEĆE VRSTE CEMENTA

#### 3.1 Cementi opće namjene

Uz klinker kao glavni sastojak za obični portlandski cement, za proizvodnju različitih vrsta cemenata koriste se i sljedeći mineralni dodaci [2]:

- granulirana zgura visokih peći (S)
- silicijska prašina –  $\text{SiO}_2$  (D)
- pucolanski materijali – prirodni (P) i kalcinirani (Q)
- leteći pepeo- silicijski (V) i kalcijski (W)
- pečeni škrljevac (T)
- vapnenac (L i LL).

Europska norma za cement HRN EN 197-1- "Cement – 1 dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene" [17] definira 27 vrsta cemenata opće namjene i uključuje zahtjeve za komponente te zahtjeve u smislu mehaničkih, fizikalnih i kemijskih svojstava svih 27 proizvoda [18]. Mehanički zahtjevi za cement su normirana čvrstoća i rana čvrstoća. Normirana čvrstoća predstavlja tlačnu čvrstoću nakon 28 dana, a koristi se za određivanje razreda čvrstoće cementa, koji mogu biti 22,5 (samo za posebni cement vrlo malih toplina hidratacije), 32,5, 42,5 ili 52,5. Svaki razred normirane tlačne čvrstoće cementa obuhvaća dva razreda rane čvrstoće: razred s običnom ranom čvrstoćom (N) i razred s velikom ranom čvrstoćom (R) [2].

Ovi proizvodi podijeljeni su u 5 glavnih vrsta cemenata [18]:

- CEM I – portlandski cement
- CEM II – portlandski cement s miješanim dodatkom
- CEM III – cement sa zgurom visokih peći (metalurški cement)
- CEM IV – pucolanski cement
- CEM V – miješani cement

Svaka od pet vrsta cemenata podijeljena je na nekoliko različitih podvrsta, koje se međusobno razlikuju ovisno o udjelu klinkera i dodavanju jednog ili više mineralnih dodataka. Cement CEM I ima samo jednu podvrstu, koja sadrži između 95 i 100 % portlandcementnog klinkera, uz dodatak od 0 do 5 % sporednih materijala. Kod ostalih vrsta cemenata (CEM II do CEM V), osim klinkera, koriste se i mineralni dodaci koji poboljšavaju

hidratacijska i pucolanska svojstva cementa, čime se unaprjeđuju njegova svojstva i/ili smanjuju troškovi proizvodnje [2].

### 3.2 Posebne vrste cemenata opće namjene

Osim glavnih vrsta cementa opće namjene, normama HRN EN 197-1, HRN EN 197-4 [19], HRN EN 197-5 [20], HRN EN 197-6 [21] i HRN EN 14216 [22], propisane su i posebne vrste cementa te su njihove oznake dane u tablici 1.

Tablica 1. Vrste posebnih cemenata (Izvori: [2,20,21])

Oznaka	Vrsta cementa
CEM I do CEM V-LH	Cement opće namjene male topline hidratacije
CEM I – SR CEM II/A ILI B – SR	Sulfatnootporni cement
CAC	Aluminatni cement
CEM I - bijeli	Bijeli cement
CEM III-L	Metalurški cement male rane čvrstoće
VLH	Posebni cement vrlo male topline hidratacije
CEM II/C CEM VI	Miješani cementi
CEM II/A-F ili CEM II/B-F CEM II/A-M, CEM II/B-M ili CEM II/C-M CEM VI	Cement s recikliranim građevnim materijalima



### 3.2.1 Cement opće namjene male topline hidratacije

Cementi opće namjene male topline hidratacije, oznake -LH uz naziv, definiran je prema normi HRN EN 197-1, uz dodatak kriterija za ograničenje topline hidratacije. Ova toplina ne smije prelaziti karakterističnu vrijednost od 270 J/g i maksimalnu vrijednost od 300 J/g prema normi HRN EN 196-8 nakon 7 dana ili HRN EN 196-9 nakon 41 sata. U Hrvatskoj se rijetko proizvodi cement male topline hidratacije prilagođavanjem klinkera, češće se koriste cementi s dodacima koji smanjuju toplinu hidratacije. Iako su početne tlačne čvrstoće ovih vrsta cemenata manje, kasnije se povećavaju, čime se smanjuje rizik od toplinskih pukotina u velikim betonskim elementima, kao što su temelji i masivni betoni u prometnim i hidrotehničkim građevinama [2].

### 3.2.2 Sulfatnootporni cement

Sulfati iz okoline, poput onih u podzemnim vodama, mogu izazvati reakciju s hidratiziranom cementnom pastom stvaranjem kalcijevog sulfoaluminata, odnosno etringita. Ova ekspanzivna reakcija može dovesti do pojave pukotina i smanjenja čvrstoće u krhkoj cementnoj pasti. Iako etringit nastaje već u ranoj fazi hidratacije, tada nema ekspanzivni učinak jer je pasta još u tekućem ili mekšem stanju.

Kako bi se spriječila šteta od sulfata, koriste se cementi s niskim sadržajem trikalcijevog aluminata ( $C_3A$ ), poput portlandskih cemenata s visokim udjelom zgure visokih peći. U Hrvatskoj se proizvodi sulfatnootporan cement male topline hidratacije sa 66 – 80 % zgure i 20 – 34 % klinkera, s oznakom CEM III/B 32,5N SR-LH [2].

### 3.2.3 Aluminatni cement

Aluminatni cement (CAC) proizvodi se mljevenjem aluminatnog klinkera, koji je bogat monokalcijevim aluminatom. Dobiva se pečenjem vapnenca i boksita na temperaturi 1500 – 1600 °C, što ga razlikuje od portlandskog cementa. Njegov uobičajeni sastav je:

- $Al_2O_3$  – 40 - 50 %
- CaO – 35 - 40 %
- $SiO_2$  – 4 - 10 %
- $Fe_2O_3$  – 5 - 15 %

Aluminatni cement brzo postiže veliku tlačnu čvrstoću, dostižući i do 80 % konačne vrijednosti unutar 12 – 24 sata. Međutim, njegova upotreba je ograničena zbog brzog oslobađanja topline hidratacije, što u masivnim betonskim elementima može izazvati velika temperaturna naprezanja i pojavu pukotina [2].

### 3.2.4 Bijeli cement

Siva boja portlandskog cementa dolazi od feritnog minerala  $C_4AF$ , prisutnog u glini korištenoj pri proizvodnji. Ako se koristi glina bez feritnih sastojaka, nastaje cement s minimalnom količinom  $C_4AF$ , što mu daje bijelu boju. Bijeli portlandski cement proizvodi se od posebnog klinkera, dobivenog pečenjem krede ili bijelog vapnenca s kaolinom i regulatorima za vezivanje. Razlikuju se tri razine bjeline označene slovima A, B i C. Ovaj cement može biti obojen dodavanjem pigmenta te se koristi u arhitektonskim betonskim elementima i fasadnim žbukama. Proizvodnja bijelog cementa je skuplja zbog većih troškova sirovina [2].

### 3.2.5 Metalurški cement male rane čvrstoće

Metalurški cement male rane čvrstoće spada u vrstu CEM II cementa s oznakom -L. Iako su hidratacijski procesi slični onima cementa opće namjene, rani razvoj čvrstoće je sporiji zbog posebnog sastava, finoće i reaktivnosti korištenih sastojaka [2].

### 3.2.6 Posebni cement vrlo male topline hidratacije

Posebni cement vrlo male topline hidratacije ima slične reakcije kao cementi opće namjene, no rani proces hidratacije je sporiji zbog sastava i reaktivnosti. Pogodan je za masivne građevine poput brana, gdje omjer ploštine i volumena ostaje mali. Toplina hidratacije ne smije prelaziti 220 J/g (karakteristična) i 250 J/g (maksimalna) prema normi HRN EN 196-8 nakon 7 dana ili HRN EN 196-9 nakon 41 sata [2].

### 3.2.7 Miješani cementi

Norma HRN EN 197-5 [20] definira okvirne uvjete za značajno smanjenje sadržaja klinkera u cementima. Proširuje raspon miješanih portlandskih cementa (mogućnost korištenja više glavnih komponenti u sastavu cementa) uvođenjem grupe portlandskog miješanog cementa CEM II/C-M s minimalnim sadržajem portland klinkera 50 %, kao i novu grupu miješanih cementa CEM VI, u kojima udio neklinkerskih komponenti može doseći do 65 %. [23]

### 3.2.8 Cement s recikliranim građevnim materijalima

Europska norma HRN EN 197-6 „Cement s recikliranim građevnim materijalima“ [21] koja je objavljena 2023. godine otvorila je mogućnost korištenja recikliranog betonskog praha kao pucolanskog zamjenskog sadržaja u udjelu do 30 % [24]. Norma stavlja naglasak na ispitivanje performansi, čime se omogućava uvođenje cemenata koji odgovaraju zahtjevima zasnovanim na razredima izloženosti važećim u mjestima primjene. Međutim, najveći izazov i dalje ostaje pitanje kako osmisliti univerzalne metode ispitivanja koje osiguravaju željene performanse kada se novi cementi primjenjuju u stvarnim uvjetima [25].

## 3.3 Alternativni cementi

Iako je portlandski cement i dalje najzastupljeniji u svijetu, sve se više razmatraju alternative radi smanjenja emisija CO<sub>2</sub>. Alternativni cementi koji sadrže manje udjele klinkera koriste minerale poput pucolana i taloženog vapna, što smanjuje energetske potrebe i emisije tijekom proizvodnje. Kod svih alternativa, ključni su dostupnost resursa i analiza životnog ciklusa kako bi se procijenila održivost tehnologija kao zamjene za portlandski cement [3].

### 3.3.1 Kalcijski sulfoaluminatni cement

Kalcijski sulfoaluminatni cement (CSA) sadrži kalcijev sulfoaluminat (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S) kao glavnu komponentu (30 – 70 %). Ovaj spoj je 1960-ih patentirao Alexander Klein kao dodatak za ekspanziju ili kompenzaciju skupljanja u cementnim vezivima. Iako se CSA cementi ne koriste široko u Europi i SAD-u, u Kini se proizvode već 30 godina, poznati kao "treća serija cementa". Postoje dvije glavne vrste klinkera za proizvodnju ovog cementa: sulfoaluminatni belitni klinker (sadrži uglavnom C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S i C<sub>2</sub>S) te ferijaluminatni klinker (sadrži C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S, C<sub>4</sub>AF i C<sub>2</sub>S). Ovi klinkeri se melju s različitim razinama kalcijevog sulfata kako bi se dobio cement koji brzo očvršćava i ima veliku čvrstoću. CSA cement postaje sve popularniji kao opcija s malim emisijama CO<sub>2</sub> jer proizvodi oko 0,216 g CO<sub>2</sub> po gramu vezivne faze, znatno manje od alita iz portlandskog cementa (0,578 g CO<sub>2</sub>/g). Temperatura pečenja klinkera za CSA cement je obično 1250 °C, što je 200 °C manje nego za portlandski klinker, uz lakše mljevenje [4].

### 3.3.2 Magnezijski cement

Magnezijev oksid (MgO) koristi se u specijaliziranim industrijskim primjenama, poput refraktora, a obično se proizvodi kalciniranjem prirodne magnezitne stijene (MgCO<sub>3</sub>). Taj proces ispušta znatne količine CO<sub>2</sub> jer magnezit sadrži oko 52 % CO<sub>2</sub> po masi. MgO se u vodi

hidrira u magnezijev hidroksid ( $Mg(OH)_2$ ), koji ima slabe vezivne osobine. Međutim, kombinacija  $MgO$  s magnezijevim solima može stvoriti čvrste i otpornije cementne materijale, poput magnezijevih oksikloridnih i oksisulfatnih cemenata, koji se koriste u proizvodnji čvrstih, negorivih građevinskih ploča [26].

Nedavno su razvijeni hidraulički cementi na bazi  $MgO$  i magnezijevog hidrokarbonata, koji imaju dobru otpornost na vodu i potencijal za sekvestraciju  $CO_2$  tijekom hidratacije. Ipak, da bi ovaj cement postao ekološki održiv,  $MgO$  bi se trebao proizvoditi iz prirodnih magnezijevih izvora bez  $CO_2$ , poput osnovnih magnezijevih silikatnih stijena, koje su ekološki prihvatljivije od magnezita. Uz dovoljna sredstva, ovaj pristup mogao bi potencijalno omogućiti negativnu emisiju  $CO_2$  [26].

### 3.3.3 Alkalno aktivna veziva

Alkalno aktivna veziva sve se više razmatraju kao održiva alternativa portlandskom cementu zbog svoje velike čvrstoće, dugotrajnosti i manjeg okolišnog otiska. Izrađuje se miješanjem aluminatno-silikatnih materijala poput letećeg pepela, zgure iz visokih peći ili metakaolina s alkalnim aktivatorima, pri čemu nastaje mrežasta struktura slična onoj organskih polimera, pa ih nazivaju i „anorganskim polimerima“ ili „geopolimerima“. Za razliku od portlandskog cementa, čvrsti sastojci ovih veziva mogu poticati iz otpadnih materijala, što smanjuje emisije  $CO_2$  i do 80 % [4].

### 3.3.4 Cementi s velikim udjelom vapnenca i kalcinirane gline

Primjena vapnenca kao zamjenskog materijala u cementnoj industriji afirmirala se ponajviše zbog male cijene, velike dostupnosti i male potrošnje energije tijekom mljevenja [27]. Dodavanje reaktivnog materijala s velikim udjelom aluminija, poput kalcinirane gline, jedna je od metoda aktivacije vapnenca [28]. Aluminij iz kalcinirane gline i karbonat iz vapnenca međusobno reagiraju, uz procese poput pucolanske reakcije kalcinirane gline i djelovanja vapnenca kao punila. Ovakva kombinacija omogućuje veću zamjenu klinkera, što doprinosi stvaranju finije i manje povezane mikrostrukture koja povećava čvrstoću i trajnost cementa [29]. Dok je zamjena klinkera vapnencem obično ograničena na 35 %, u kombinaciji s kalciniranom glinom može se zamijeniti i do 45 % klinkera zadržavajući svojstva običnog portlandskog cementa [30].

### 3.3.5 Supersulfatni cement

Super sulfatni cement (SSC) je vrsta cementa koja se priprema s granuliranom mljevenom zgurom visokih peći kao glavnom sirovinom, gipsom kao sulfatnim aktivatorom te klinkerom ili vapnom kao alkalnim aktivatorom. Sastav SSC-a obično uključuje:

- zguru visokih peći - 75 – 85 %
- sulfate (gips, fosfogips i slično) - 10 – 20 %
- alkalni aktivator (cementni klinker, kalcijev hidroksid, vapno i slično) - 1 – 5 %

U usporedbi s običnim portlandskim cementom, SSC ima značajne prednosti. Sirovine nije potrebno kalcinirati, već se samo melju do određene finoće i ravnomjerno miješaju za proizvodnju SSC-a. Priprema super sulfatnog cementa ne samo da omogućuje recikliranje industrijskog otpada, zgure visokih peći, već također štedi energiju i štiti okoliš [31].

## 4 CEMENT S RECIKLIRANIM GRAĐEVNIM MATERIJALIMA

Građevinski otpad i otpad od rušenja predstavlja najviše zastupljenu vrstu otpada u Europskoj uniji (EU), s 850 milijuna tona godišnje[5,32]. U Republici Hrvatskoj (RH) količina nastalog građevnog otpada u 2023. godini procijenjena je na 1.909.139,1 t, što je 10 % više nego u 2022. godini, no isto tako količina obrađenog otpada (oporaba i zbrinjavanje) u 2023. godini je iznosila 1.727.171,0 t, što je 14,4 % više nego u prethodnoj 2022. godini. Prema zakonu o gospodarenju otpadom, građevni otpad definiran je kao otpad nastao aktivnostima građenja i rušenja. Materijali koji se svrstavaju u građevni otpad prema Pravilniku o katalogu otpada dani su u tablici 2 dok su količine nastalog otpada u 2023., po vrsti otpada dane u tablici 3 [33].

Tablica 2. Vrste građevnog otpada (Izvor:[33])

Naziv otpada
Beton, cigle, crijep/pločice i keramika
Drvo, staklo i plastika
Mješavine bitumena, ugljeni katran i proizvodi koji sadrže katran
Metali ( uključujući njihove legure)
Zemlja (uključujući iskopanu zemlju s onečišćenih lokacija), kamenje i otpad od jaruženja
Izolacijski materijali i građevinski materijali koji sadrže azbest
Građevinski materijali na bazi gipsa
Ostali građevinski otpad i otpad od rušenja objekata

Tablica 3. Procijenjena količina nastalog građevnog otpada u 2023. godini, po vrsti otpada (Izvor:[33])

KB	Naziv otpada	Procijenjena količina nastalog otpada (t)	Udio (%)
17 01 01	Beton	76.002,4	3,98
17 01 02	Cigle	6.590,0	0,35
17 01 03	Crijep/pločice i keramika	2.425,3	0,13
17 01 06*	Mješavine ili odvojene frakcije betona, cigle, crijepa/pločica i keramike, koje sadrže opasne tvari	9,8	0,00
17 01 07	Mješavine betona, cigle, crijepa/pločica i keramike koje nisu navedene pod 17 01 06*	241.189,8	12,63
17 02 01	Drvo	14.946,1	0,78
17 02 02	Staklo	8.218,5	0,43
17 02 03	Plastika	1.390,4	0,07
17 02 04*	Staklo, plastika i drvo koji sadrže ili su onečišćeni opasnim tvarima	4.141,4	0,22
17 03 01*	Mješavine bitumena koje sadrže katran iz ugljena	41,5	0,00
17 03 02	Mješavine bitumena koje nisu navedene pod 17 03 01*	214.799,9	11,25
17 03 03*	Ugljeni katran i proizvodi koji sadrže katran	1,4	0,00
17 04 01	Bakar, bronca, mjed	5.511,6	0,29
17 04 02	Aluminij	11.374,0	0,60
17 04 03	Olovo	403,2	0,02
17 04 04	Cink	132,4	0,01
17 04 05	Željezo i čelik	235.653,2	12,34
17 04 06	Kositar	1,1	0,00
17 04 07	Miješani metali	3.449,0	0,18
17 04 09*	Metalni otpad onečišćen opasnim tvarima	516,9	0,03

KB	Naziv otpada	Procijenjena količina nastalog otpada (t)	Udio (%)
17 04 10*	Kabelski vodiči koji sadrže ulje, ugljeni katran i druge opasne tvari	15,5	0,00
17 04 11	Kabelski vodiči koji nisu navedeni u 17 04 10*	1.924,6	0,10
17 05 03*	Zemlja i kamenje koji sadrže opasne tvari	6.908,1	0,36
17 05 04	Zemlja i kamenje koji nisu navedeni pod 17 05 03*	853.745,1	44,72
17 05 05*	Iskopana zemlja od rada bagera koja sadrži opasne tvari	12,8	0,00
17 05 06	Otpad od jaruženja koji nije naveden u 17 05 05*	851,9	0,04
17 06 03*	Ostali izolacijski materijali koji se sastoje od ili sadrže opasne tvari	89,9	0,00
17 06 04	Izolacijski materijali koji nisu navedeni pod 17 06 03*	2.241,2	0,12
17 06 05*	Građevinski materijal koji sadrži azbest	4.472,6	0,23
17 08 01*	Građevinski materijali na bazi gipsa onečišćeni opasnim tvarima	1,2	0,00
17 08 02	Građevinski materijali na bazi gipsa koji nisu navedeni pod 17 08 01*	2.553,3	0,13
17 09 03*	Ostali građevinski otpad i otpad od rušenja (uključujući miješani otpad) koji sadrži opasne tvari	1,0	0,00
17 09 04	Miješani građevinski otpad i otpad od rušenja objekata, koji nije naveden pod 17 09 03*	209.524,2	10,97
	<b>Ukupno</b>	<b>1.909.139,1</b>	<b>100,00</b>

CDW se dijeli u tri vrste na nastanka: građevni otpad (engl. construction waste, CW), otpad od rekonstrukcije (engl. renovation waste, RW) i otpad od rušenja (engl. demolition waste, DW). Građevinski otpad i otpad od rušenja ima veliki potencijal za recikliranje, jer je oko 80

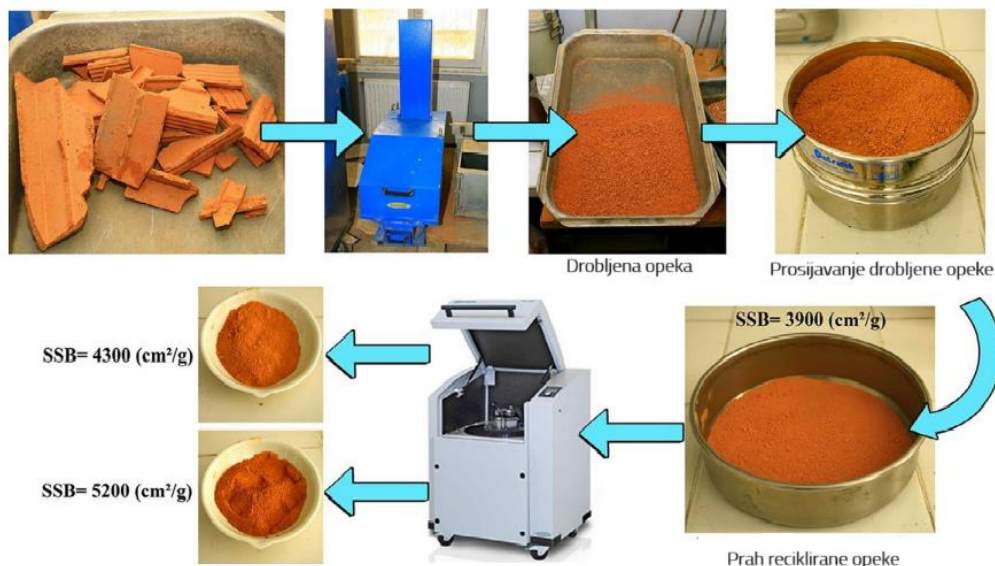


% ukupnog otpada moguće reciklirati. No usprkos tome, većina zemalja ima problem s učinkovitim upravljanjem ovim otpadom, što dovodi do zagađenja okoliša i problema s odlaganjem. Odlaganje na deponije trenutno je dominantna opcija zbrinjavanja CDW-a u mnogim regijama svijeta, globalno se više od 35 % CDW-a odlaže na deponije. Ekološke posljedice neuređenih deponija uključuju zagađenje tla i vode te oštećenje krajolika. Velike količine građevnog otpada dovode do nedostatka zemljišta za deponije i degradacije kvalitete tla za ekstrakciju sirovina za nove građevinske aktivnosti [34]. Stoga je pitanje kako tretirati i cjelovito iskoristiti CDW kako bi se postiglo smanjenje, reciklaža i neutralizacija CDW-a postalo globalno pitanje koje treba hitno riješiti [35]. Recikliranje CDW-a kao djelomične zamjene za portlandski cement smatrano je od strane istraživača kao potencijalni održivi pristup za ublažavanje izazova održivosti s kojim se suočava građevinska industrija. Zbog svoje finoće i potencijalne reaktivnosti, posebna pažnja posvećena je mogućnosti korištenja otpadnog praha (engl. waste powder, WP) kao djelomične zamjene portlandskog cementa u betonu. Kako bi se dobio reciklirani prah (RP) kojim se u konačnici zamjenjuje dio cementa, koriste se jedna od dvije metode. Prvom metodom, RP se proizvodi obradom otpadnog praha (WP) nastalog tijekom proizvodnje recikliranog agregata (RA), uključujući višekratno mehaničko lomljenje i mljevenje u kugličnom mlinu. Drugom metodom, RP se proizvodi obradom mješavine izvornog otpada betona i opeke, i to kroz dvostupanjski proces. U prvom stupnju koristi se drobilica za smanjenje veličine otpadnog betona i opeke na fine čestice manje od 5 mm. Zatim se materijal drobljen u procesu 1, u procesu 2 unosi u kuglični mlin s konusnom šupljinom za proizvodnju finog praha maksimalne veličine 45  $\mu\text{m}$ , što se može klasificirati kao RP. Glavna karakteristika RP-a je njegova finoća i reaktivnost u odnosu na WP čija je veličina čestica obično iznad 75  $\mu\text{m}$ . Ukupno je vrijeme obrade, uključujući drobljenje, prosijavanje i mljevenje oko 3 – 5 minuta [7].

#### 4.1 Cement s recikliranom opekom

Otpad od opeke već se drobi i koristi kao djelomična zamjena za sitni i krupni agregat u niskogradnji, no zbog velike apsorpcije vode i male čvrstoće, stupanj iskorištenja u betonskim mješavinama je vrlo mali. Istraživanja su pokazala da reciklirani prah opeke (engl. recycled brick powder, RBP) nastao drobljenjem i mljevenjem sintetiranih glinenih opeka ima širi raspon upotrebe i veći stupanj korištenja od recikliranih opečnih agregata. Najčešća i najperspektivnija primjena RBP-a je kao dodatni cementni materijal, jer fini RBP ima određenu pucolansku aktivnost i učinak punila [35].

Priprema RBP-a uglavnom uključuje prikupljanje, drobljenje, mljevenje i prosijavanje kao što je prikazano na slici 3 [36].



Slika 3. Priprema recikliranog praha od opeke (Izvor:[36])

RBP je po sirovinama sličan kalciniranoj glini, no pokazuje različite aktivnosti zbog različitih temperatura kalciniranja. Kalcinirane gline obično se termički obrađuju na temperaturama između 500 i 900 °C kako bi se proizveli aktivniji amorfniji oblici. Najčešće temperature pečenja glinenih opeka kreću se između 850 i 1150 °C, a obično se pečenje odvija na temperaturama blizu 1000 °C kako bi se postigli proizvodi visokih performansi. Pri temperaturama blizu 1000 °C, većina glinenih minerala djelomično se rekristalizira, što smanjuje udio amornog materijala. Kao rezultat toga, glinene opeke pokazuju manju aktivnost u usporedbi s kalciniranom glinom, ali ipak imaju određenu pucolansku aktivnost [37].

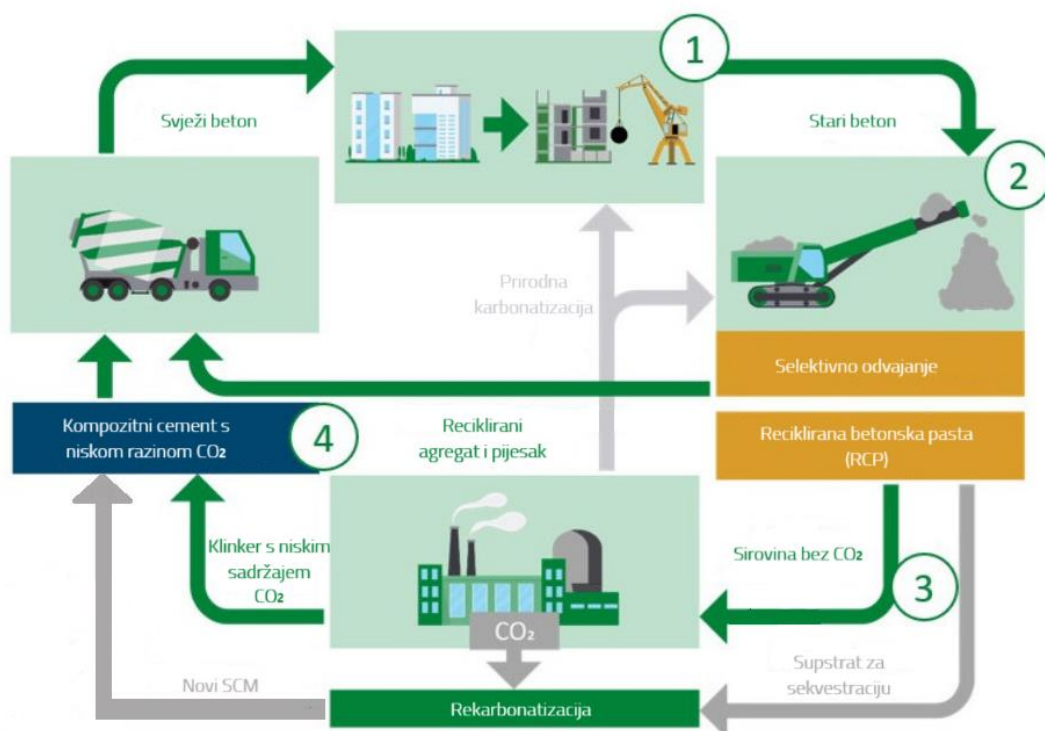
Posljednjih godina, mnogi istraživači proveli su studije o izvedivosti upotrebe praha reciklirane opeke, pokrivajući gotovo sva makroskopska svojstva betona i morta s dodatkom RBP-a. Ova istraživanja pokazuju da se dodavanjem cementu do 25 % RBP-a može poboljšati otpornost betona na prodor kloridnih iona i sulfatnu koroziju, te značajno povećati mehanička svojstva u kasnijim fazama zahvaljujući pucolanskoj aktivnosti RBP-a. Ta aktivnost također ubrzava karbonatizaciju pri većem postotku zamjene RBP-a, što je česta karakteristika pucolanskih dodataka. Sveukupno, RBP ima velik potencijal za praktičnu primjenu s obzirom na zapažena svojstva [37].

## 4.2 Cement s recikliranim betonom

Tijekom posljednjeg desetljeća sve je veći interes za recikliranjem betona kako bi se postigao istinski održivi razvoj i samim time zatvorio krug materijala i CO<sub>2</sub> u životnom ciklusu betona (slika 4)[38]. Otpadni beton se uglavnom koristi za proizvodnju recikliranih agregata kroz postupak višestupanjskog drobljenja i prosijavanja, što se smatra optimalnim načinom iskorištavanja otpadnog betona. Tijekom primarnog drobljenja, oblikovanja ili mljevenja nastaje reciklirani betonski prah (engl. recycled concrete powder, RCP) veličine < 75 µm, koji čini 20 – 30 % otpada od betona. Primjena udarnih, konusnih i rotacijskih drobilica dodatno povećava proizvodnju RCP-a, jer navedene metode poboljšavaju morfologiju recikliranih agregata i uklanjaju ostatke morta ili cementne paste s njihove površine [39].

Zbog niske hidraulične aktivnosti i visoke apsorpcije vode, RCP se uglavnom koristi za pripremu materijala za nasipavanje i podložne slojeve ceste. U posljednjim desetljećima RCP se koristi mineralni dodatak (engl. supplementary cementitious materials, SCM) u cementnim materijalima zbog potencijalne hidratacije nehidratiziranog klinkera i ostalih SCM-ova [39].

Ovisno o sastavu recikliranog betonskog praha, mijenjaju se i njegovi utjecaji na svojstva betona. RCP s velikim udjelima amorfnog silicija i reaktivnog aluminija poboljšava tlačnu čvrstoću i trajnost betona. No, RCP s većim sadržajem kristalnog silicija smanjuje obradljivost i povećava skupljanje prilikom sušenja. Općenito, mineralni sastav RCP-a iz recikliranog betona varira, ovisno o specifičnim svojstvima korištenog veziva [40].



Slika 4. Zatvaranje kruga materijala i CO<sub>2</sub> u životnom ciklusu betona (Izvor:[41])

## 5 EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U eksperimentalnom dijelu rada proučavat će se utjecaj građevnog otpada, u ovom slučaju recikliranog betona, kao dodatka cementu na svojstva betona. Ispitivana su svojstva betona u svježem (konzistencija, sadržaj zraka, gustoća te temperatura) i očvrnulom stanju (tlačna čvrstoća, vodonepropusnost, otpornost na djelovanje ciklusa smrzavanja-odmrzavanja te otpornost na prodor klorida). Za potrebe ispitivanja izrađeno je 6 mješavina. Dvije mješavine, M1 s cementom CEM II/B-M(S-V-LL) i M2 s cementom CEM II/B-M(S-F), projektirane su tlačne čvrstoće betona C25/30 te su zahtijevana svojstva projektirana prema normi HRN EN 206 [42]. Beton je projektiran s obzirom na razred izloženosti: XC1 i XC2. Maksimalno zrno agregata je 16 mm. Zahtjev obradljivosti je razred S3, odnosno slijeganje betonske mješavine u svježem stanju mora biti u rasponu od 100 do 150 mm. Na tim mješavinama, s obzirom na razred izloženosti i dane zahtjeve, ispitana su svojstva u svježem stanju i tlačna čvrstoća. Također su izrađene i četiri mješavine (M3 i M5 s cementom CEM II/B-M(S-V-LL) i M4 i M6 s cementom CEM II/B-M(S-F) projektirane tlačne čvrstoće C30/37 te su zahtijevana svojstva projektirana prema normi HRN EN 206. Beton je projektiran s obzirom na razrede izloženosti XF4, XF2, XF3, XF1, XC4, XC3, XC2, XC1, XS1, XD2, XD1, XA1. Maksimalno zrno agregata je 16 mm, dok je zahtjev obradljivosti razred S4, odnosno slijeganje betonske mješavine u svježem stanju mora biti u rasponu od 160 do 210 mm. Maksimalni udio klorida je 0,2 % te je zahtjev za vodonepropusnost razred VDP3, odnosno prodor vode kroz betonski uzorak mora biti manji ili jednak 15 mm. Na mješavinama M3-M6 ispitana su svojstva u svježem stanju, tlačna čvrstoća, vodonepropusnost, otpornost na prodor klorida i otpornost na djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Radi ograničenog kapaciteta miješalice, mješavine M3 i M4 izrađene su u dva navrata kako bi se mogla provesti sva planirana ispitivanja. Mješavine M3 i M5 čine jedan par s istim sastavom, a mješavine M4 i M6 drugi. Program ispitivanja dan je u tablici 4.

Tablica 4. Program ispitivanja

	Ispitivanje	Norma	Oznake mješavina
Ispitivanje u svježem stanju	Temperatura	HRN U.M1.032:1981	M1, M2, M3, M4, M5 i M6
	Konzistencija slijeganjem	HRN EN 12350-2:2019	
	Gustoća	HRN EN 12350-6:2019	
	Udio zraka	HRN EN 12350-7:2019	
Ispitivanja u očvrstnutom stanju	Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3:2019	M1, M2, M3 i M4
	Vodonepropusnost	HRN EN 12390-8:2019	M5 i M6
	Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje	HRN EN 12390-9:2016	
	Otpornost na prodor klorida	NT BUILD 492	

## 5.1 Sastavne komponente

### 5.1.1 Cement

U mješavinama su korištene dvije vrste cementa proizvođača Holcim Hrvatska d.o.o.: CEM II/B-M (S-V-LL) 42,5 N za referentne mješavine M1, M3 i M5, i CEM II/B-M (S-F) 42,5 N, izrađen s recikliranim betonom, korišten na mješavinama M2, M4 i M6. Svojstva korištenih cementa prikazana su u tablici 5.

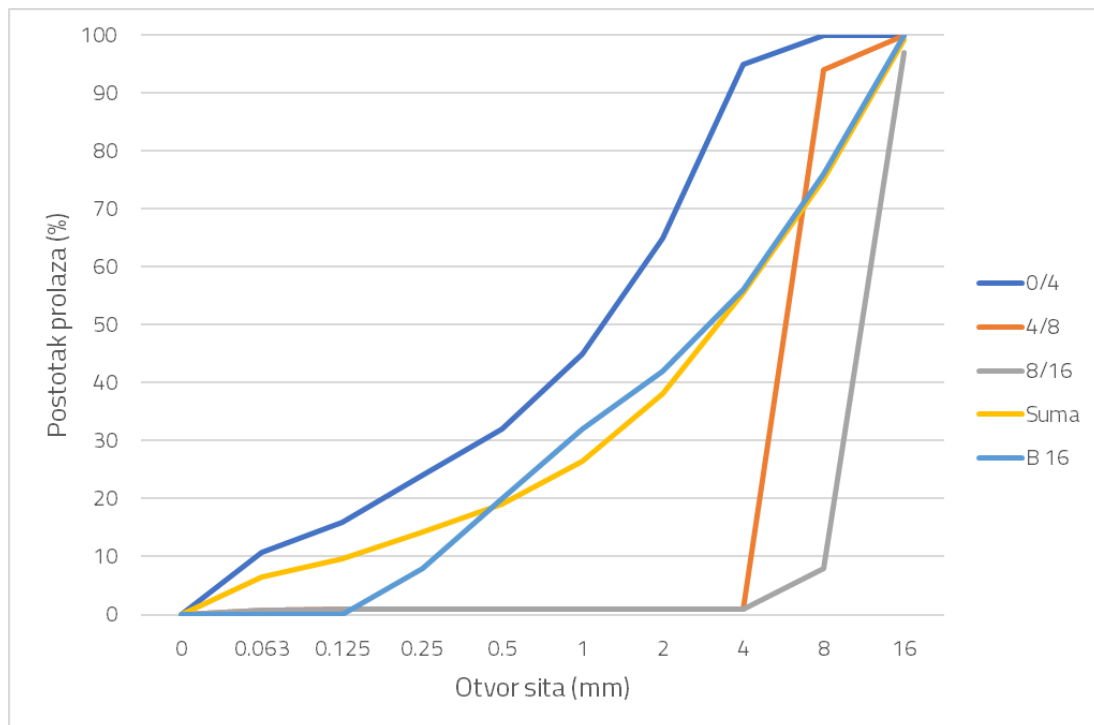
Tablica 5. Sastav i svojstva cementa CEM II/B-M(S-V-LL) i CEM II/B-M (S-F)

Sastav cementa					
		CEM II/B-M (S-V-LL) 42,5 N		CEM II/B-M (S-F) 42,5 N	
Klinker	%	65 - 79		65 - 79	
CDW	%	-		6 - 29	
Miješani dodatak	%	21 - 35		6 - 29	
Filtarska prašina	%	≤5		≤5	
<b>Fizikalna svojstva</b>	JM		Uvjet normi		Uvjeti norme
Postojanost volumena	mm	0,3	≤ 10	0,2	≤ 10
Početak vezivanja	min	218	≥ 60	151	≥ 60
Tlačna čvrstoća nakon 2 dana	MPa	29,0	≥ 10	31,1	≥ 10
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana	MPa	56,0	≥ 42,5 ≤ 62,5	53,5	≥ 42,5 ≤ 62,5
Specifična težina cementa	g/cm <sup>3</sup>	3,00	-	2,98	-
<b>Kemijska svojstva</b>					
SO <sub>3</sub>	%	3,00	≤ 3,5	2,40	≤ 3,5
Cl	%	0,057	≤ 0,1	0,044	≤ 0,1

### 5.1.2 Agregat

Korišten je drobljeni agregat proizvođača Holcim Hrvatska d.o.o. iz nalazišta Očura. Numerički i kumulativni granulometrijski sastavi agregata s frakcijama 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm, dani su u tablicama 14 i 15 u prilogu A.

Granulometrijski sastav agregata prikazan je na slici 5.



Slika 5. Granulometrijski sastav agregata

### 5.1.3 Voda

Za spravljanje mješavina betona, ispitivanih u ovom radu, korištena je voda iz vodovoda.

### 5.1.4 Superplastifikator

Za izradu mješavina korišten je superplastifikator Mapei Dynamon SF 16. U mješavinama M1, M2 dodano je 0,33 %, dok je u mješavine M3, M4, M5 i M6 dodano 0,38 % superplastifikatora na masu cementa.



### 5.1.5 Aerant

U mješavinama betona M3, M4, M5 i M6 korišten je aerant Mapeair LP X9. Kod svih mješavina dodano je 0,45 % aeranta na masu cementa.

## 5.2 Sastavi betonskih mješavina

Sastavi mješavina korištenih u ispitivanima prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Sastavi betonskih mješavina

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Komponenta	Masa (kg/m <sup>3</sup> )					
Cement – CEM II/B-M(S-V-LL)	285	-	400	-	400	-
Cement CEM II/B-M(S-F)	-	285	-	400		400
Agregat 0/4 mm	1078,83	1078,83	1042,43	1042,43	1042,43	1042,43
Agregat 4/8 mm	240,59	240,59	168,13	168,13	168,13	168,13
Agregat 8/16 mm	663,89	663,89	656,15	656,15	656,15	656,15
Voda	168,15	168,15	176,0	176,0	176,0	176,0
Superplastifikator	0,94	0,94	1,52	1,52	1,52	1,52
Aerant	-	-	0,45	0,45	0,45	0,45
Vodocementni omjer	0,6	0,6	0,44	0,44	0,44	0,44

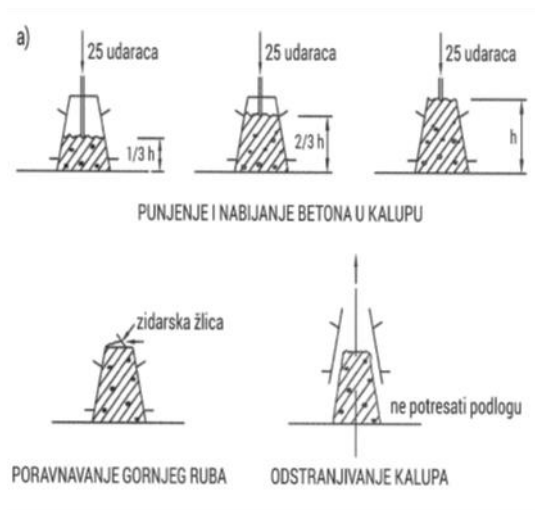
### 5.3 Ispitivanja u svježem stanju

Neovisno o vrsti betona, beton u svježem stanju mora zadovoljiti osnovna svojstva kao što su fluidnost, zbijenost te kohezivnost. Svježi beton ima određenu konzistenciju koja mu osigurava obradljivost te ne smije doći do izdvajanja vode ili segregacije. Zbog trajnosti je bitan udio pora koji se može korigirati sastavom mješavine ili tehnologijom miješanja.

Velika prednost većine ispitivanja svježeg betona je njihova jednostavnost. Male promjene u sastavu betona mogu utjecati na značajne promjene konzistencije. Dok je beton u svježem stanju, može se intervenirati u slučaju da neko svojstvo ili parametar ne zadovoljava. Četiri parametra koja se ispituju u svježem stanju kao dio redovnih kontrolnih ispitivanja betona, neovisno o njihovoj vrsti su gustoća betona, konzistencija, temperatura betona te sadržaj zraka. Ta su ispitivanja karakteristična za obični beton i provode se za sve vrste betona.

#### 5.3.1 Konzistencija slijeganjem

Konzistencija slijeganjem, prema normi HRN EN 12350-2:2019 [43], ispituje se tako da se u kalup oblika krnjeg stošca ugradi beton do jedne trećine visine, te se zbija metalnom šipkom koja slobodno pada 25 puta (slika 6). Isti se postupak ponavlja za drugu i treću trećinu. Nakon ugradnje betona do vrha stošca, kalup se odiže te se mjeri slijeganje u mm (slika 7).



Slika 6. Postupak ispitivanja konzistencije slijeganjem (Izvor:[31])



Slika 7. Ispitivanje konzistencije slijeganjem

### 5.3.2 Sadržaj zraka

Ispitivanje sadržaja zraka provodi se s pomoću porometra (slika 8) prema normi HRN EN 12350-7:2019 [44]. Uzorak betona ugrađuje se u posudu prema propisanoj zbijenosti te se nakon ugradnje posuda zatvara, a međuprostor između uzorka betona i komore na poklopcu ispunjava se vodom iz vodovoda. Na poklopcu se nalazi tlačna komora te se s pomoću pumpe povećava tlak u posudi. Nakon toga se otvaraju ventili na posudi, što omogućuje izjednačavanje pritiska u komori i u posudi, u kojem su jedini stlačivi dio pore zraka u betonu. Sadržaj zraka očitava se na manometru porometra.

Faktori koji utječu na sadržaj zraka su količina finih čestica, način i trajanje miješanja, konzistencija te temperatura.



Slika 8. Porometar za određivanje sadržaja zraka

### 5.3.3 Gustoća u svježem stanju

Gustoća betona ispituje se u svježem stanju kada se ispituje i sadržaj pora. Ispitivanje je odrađeno u skladu s normom HRN EN 12350-6:2019 [45]. Izvaži se posuda poznatog volumena  $V$  i tako se određuje masa  $m_1$ . Zatim se ugradi uzorak i zbiju u istu posudu pa se ponovno izvaži i odredi masa  $m_2$ . Gustoća svježeg betona računa se prema formuli:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1)}{V} [kg/m^3]$$

### 5.3.4 Temperatura svježeg betona

Temperatura svježeg betonske mješavine prema HRN U.M1.032:1981 [46] mjeri se standardnim digitalnim termometrom (slika 9). Idealna temperatura je između 15 °C i 20 °C. Prihvatljivom se smatra temperatura između 10 °C i 25 °C. Temperatura ispod i iznad graničnih vrijednosti usporava, odnosno ubrzava hidrataciju.



Slika 9. Mjerenje temperature svježeg betona termometrom

### 5.3.5 Rezultati ispitivanja u svježem stanju

Rezultati ispitivanja svježeg betona prikazani su u tablici 7.

Temperature svježeg betona nalazile su se u zadanim granicama raspona te nisu uočena značajna odstupanja između vrijednosti za običan beton i beton s cementom s građevnim otpadom.

Udio pora u mješavinama M1 i M2 iznosio je 2,5 % što odgovara zahtjevu za količinu zahvaćenog zraka betona maksimalnog zrna agregata  $D_{\max}$  16 mm. Kod uzoraka M3, M4, M5 i M6 došlo je do značajnijih razlika u rezultatima. S obzirom na to da se radi o aeriranim betonima, količina uvučenog zraka za aerirane betone maksimalnog zrna agregata  $D_{\max}$  16 mm trebala bi iznositi 5 – 7 %. U tablici 6 vidljivo je kako je mješavina M4 jedina zadovoljila traženi zahtjev dok su mješavine M3, M5 i M6 imale količinu uvučenog zraka manju od 5 %.

Mješavine M1 i M2 projektirane su za razred konzistencije slijeganjem S3 (100-150 mm) te se oba uzorka nalaze u granicama razreda. Mješavine M3, M4, M5 i M6 također zadovoljavaju projektirani razred konzistencije slijeganjem S4 (160-210 mm).

Gustoća svih mješavina nalazi se u granicama gustoće za obični beton.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

SVOJSTVO	M1	M2	M3	M4	M5	M6
	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
	XC2	XC2	XF4	XF4	XF4	XF4
Temperatura (°C)	24,2	22,5	25,5	24,0	23,0	23,6
Sadržaj pora (%)	2,5	2,5	4,5	7,0	4,2	4,9
Konzistencija slijeganjem (mm)	140	150	170	190	170	180
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	2248,8	2398,8	2377,5	2241,3	2423,8	2355,6

## 5.4 Svojstva u očvrnulom stanju

### 5.4.1 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća, prema normi HRN EN 12390-3:2019 [47], ispitana je na uzorcima oblika kocke brida 150 mm nakon 1, 7 i 28 dana za mješavine M1 i M2 te nakon 2,7 i 28 dana za mješavine M3 i M4. Ispitne je uzorke prije ispitivanja potrebno zagladiti na rubovima kako bi se mogle izmjeriti dimenzije kako je zadano prema normi.

Također, mogući su problemi prilikom opterećivanja uzorka u preši ako se uzorci ne pripreme na prikladan način. Nakon mjerenja dimenzija i mase uzoraka, uzorak se postavlja u prešu za ispitivanje tlačne čvrstoće koja može podnijeti sile do 3000 kN (slika 10).

Opterećenje na uzorak prenosi se preko gornje ploče, čiji se položaj prilagođava eventualnim nepravilnostima uzoraka. Tako se postiže homogeno stanje naprezanja u uzorku. Uzorak se tlačno opterećuje centričnom silom s brzinom prirasta opterećenja od 0,5 MPa/s do njihove čvrstoće.



Slika 10. Ispitivanje tlačne čvrstoće

#### 5.4.2 Difuzija klorida

Ispitivanje, prema NT BUILD 492 [48], provodi se na seriji od tri uzorka, a uzorci su oblika valjka promjera  $d = 100 \text{ mm}$  i visine  $h = 50 \text{ mm}$ . Pripremljeni uzorci vakuumiraju se u eksikatoru tri sata, nakon čega se uranjaju u vodu zasićenu otopinom  $\text{Ca(OH)}_2$  u kojoj budu 18 sati.

Kada prođe 18 sati, uzorci se izvade iz otopine i osuše krpom od površinske vlage. Uzorci se ugrađuju u ćelije koje s obje strane imaju rezervoar volumena  $240 \text{ cm}^3$ . Jedan rezervoar je napunjen 10 %-tnom otopinom  $\text{NaCl}$ , a drugi otopinom  $\text{NaOH}$ .

Ćelije se spajaju na potenciostat kao na slici 11 i uključuju se na napon od 30 V. Nakon 10 minuta očita se struja u mA za sva tri uzorka pa se prema tablici iz norme odredi koliki se napon dalje treba uključiti i koliko će ispitivanje trajati. S obzirom na dobivene rezultate u ovom ispitivanju, uzorci mješavine M3 su se dalje izložili naponu od 40 V u trajanju od 24 sata dok su uzorci mješavine M4 dalje izloženi naponu od 30 V u trajanju od 24 sata. Tijekom ispitivanja je potrebno temperaturu održavati u rasponu od 20 do 25 °C.

Nakon što završi ispitivanje, uzorci se izvade iz ćelija, operu pod vodom i obrišu krpom. Uzorci se osovinski rascijepu na dvije polovice, odabere se ona koja je ravnija i pošprica otopinom srebrova nitrata te se ostavi da djeluje 15 minuta. Na dijelu gdje su prodrli kloridi uzorak će pobijeliti kao na slici 12.

S pomoću ravnala s točnošću od 0.1 mm od sredine na lijevu i desnu stranu u razmaku od 10 mm izmjeri se koliko su duboko prodrili kloridi. Izračuna se srednja vrijednost dubine prodora klorida, s pomoću koje se koeficijent difuzije klorida  $D_{nssm}$  računa prema sljedećoj formuli:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left[ X_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot X_d}{U - 2}} \right] [m^2/s]$$

- U - apsolutna vrijednost napona [V]
- T - prosječna temperatura u stupnjevima [°C]
- L - debljina uzorka [mm]
- $X_d$  - prosječna vrijednost dubine prodiranja klorida [mm]
- t - vrijeme trajanja ispitivanja [h].



Slika 11. Čelije s uzorcima spojene na potencijostat



U tablici 8 prikazani su razredi otpornosti betona na prodor klorida

Tablica 8. Kriteriji za kvalitetu betona s obzirom na prodor klorida (Izvor:[49])

Nordtest Method BUILD 492, koef.migracije [ $m^2/s$ ]	Propusnost na kloride
$< 2 \times 10^{-12}$	vrlo dobar
$2 - 8 \times 10^{-12}$	dobar
$8 - 16 \times 10^{-12}$	srednji
$> 16 \times 10^{-12}$	loš

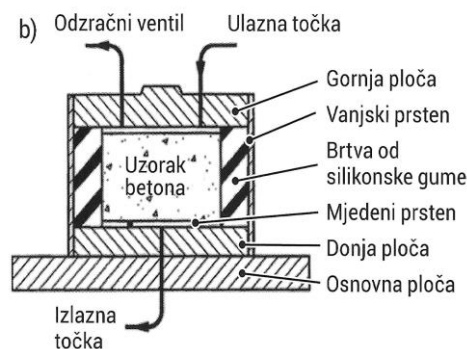


Slika 12. Polovice uzoraka nakon nanošenja srebrovog nitrata

#### 5.4.3 Ispitivanje vodonepropusnosti

Ispitivanje vodonepropusnosti, odnosno dubine prodora vode pod tlakom, provedeno je prema normi HRN EN 12390-8 [50] na uzorcima oblika kocke brida 150 mm njegovanim pod vodom u skladu s normom HRN EN 12390-2 [51]. Ispitivanje se vršilo na uzorcima starim najmanje 28 dana. Korišten je stroj za utiskivanje vode pod tlakom od  $500 \pm 50$  kPa na  $72 \pm 2$  sata.

Ispitivanjem se određuje dubina prodora vode pod tlakom. Voda se utiskuje s donje strane, a nepropusnost se osigurava gumenim brtvilom. Stroj osigurava ispitnu površinu približno jednaku polovici dijagonale uzorka. Tijekom ispitivanja vodilo se računa da ne dođe do popuštanja brtvila i curenja vode (slika 13). Nakon pomicanja uzorka, obrisan je višak vode s površine uzorka na koju se djelovalo. Zatim se uzorak cijepao na pola u preši okomito na površinu na koju se djelovalo. Nakon cijepanja uzorka, markerom se bilježio trag vode i mjerio maksimalan prodor vode u milimetrima. Od tri ispitana uzorka iz svake mješavine, mjerodavna je najveća vrijednost prodora vode. Za svaku mješavinu betona propisuje se razred vodonepropusnosti prema tablici 9.



Slika 13. Priprema uzorka za ispitivanje vodonepropusnosti (Izvor:[49])

Tablica 9. Razredi vodonepropusnosti prema HRN 1128 (Izvor:[52])

Razred vodonepropusnosti	Dopušteni najveći prodor vode [mm]
VDP 1	50
VDP 2	30
VDP 3	15

#### 5.4.4 Ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje

Za ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje betona korištena je metoda ploče (HRN EN 12390-9:2016 [53]). Ova metoda koristi se za određivanje otpornosti betona prema djelovanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u kontaktu s vodom ili 3 % otopinom soli (NaCl). Ispituju se četiri ispitna tijela, ispiljena iz četiri različita uzorka betonskih kocaka, debljine 50 mm i površine 150 x 150 mm.

Za ispitivanja je piljena ploština okrenuta prema gore. Na sve površine osim ispitne, zalijepljena je gumena folija s nadvišenjem od 20 mm iznad ispitne površine, kako bi se mogao zadržati agresivni medij na ispitnoj površini. Sve plohe osim ispitne obavijene su izolacijskim materijalom. Najlonska folija sprječava hlapljenje tekućine koja je ulivena do dubine 3 mm.

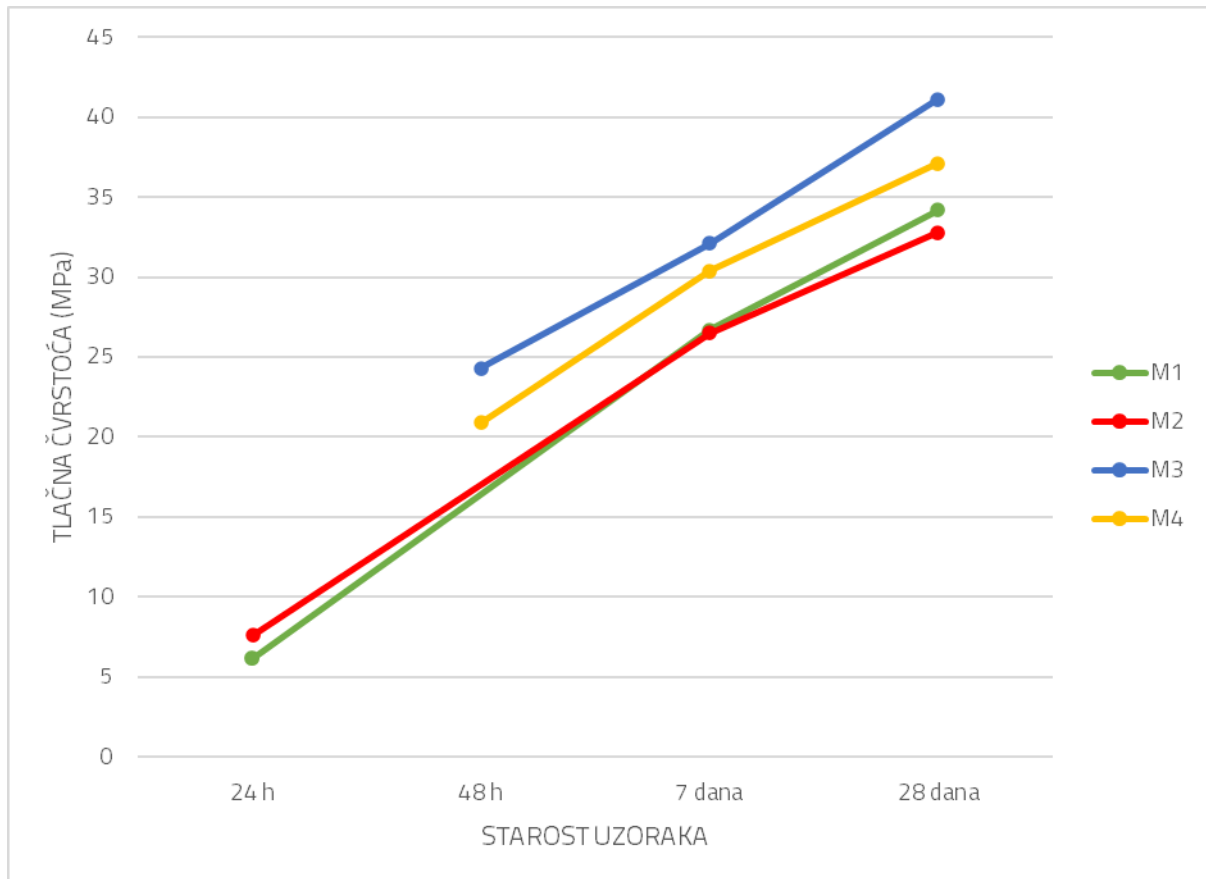
Uzorak se izlaže naizmjeničnom djelovanju smrzavanja i odmrzavanja. Jedan ciklus zahtijeva 24 sata. U svakom ciklusu temperatura je iznad 0 °C u trajanju od najmanje 7 sati, ali ne više od 9 sati. Temperatura zraka u hladnjaku nikad ne smije pasti ispod -27 °C. Nakon svakog (7±1), (14±1), (28±1) i (42±1) ciklusa treba izvaditi ispitna tijela iz hladnjaka (tijekom perioda kada je smrzavajući medij otopljen) te s površine ispitnih tijela zasebno skupiti oljušteni materijal, osušiti do konstantne mase na (110±10)°C i izmjeriti masu oljuštenog materijala [g] na najbližih 0,1 g, doliti novu 3 % NaCl otopinu i vratiti ispitna tijela natrag u hladnjak. Nakon završetka 56. ciklusa, ispitna tijela treba izvaditi iz hladnjaka te svakom ispitnom tijelu zasebno prikupiti oljušteni materijal, osušiti do konstantne mase na (110±10)°C i izmjeriti masu oljuštenog materijala (g).

#### 5.4.5 Rezultati ispitivanja u očvrslom stanju

U tablici 10 i na slici 14 prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće. Iz priloženog može se zaključiti kako beton spravljen s cementom s građevnim otpadom ima neznatno manju tlačnu čvrstoću od referentnog betona. Takvi rezultati pokazatelj su kako se i s betonima u kojima se nalaze cementi s recikliranim građevnim materijalima mogu postići projektirane tlačne čvrstoće.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće [MPa]

Oznaka uzorka	Starost uzorka			
	24 h	48 h	7 dana	28 dana
M1	6,1		26,7	34,2
M2	7,6		26,5	32,8
M3		24,3	32,1	41,1
M4		20,9	30,4	37,1



Slika 14. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

U tablici 11 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti betona na prodor klorida.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja otpornosti na prodor klorida

Parametri (srednje vrijednosti 3 uzorka)	Oznaka uzorka	
	M5	M6
L(mm)	50.34	50.4
T srednje (°C)	21.7	21.3
U (V)	40	30
Vrijeme trajanja testa (h)	24	24
Srednja vrijednost dubine prodora klorida (mm)	17.94	17.90
Dnssm, srednja vrijednost ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	6.20	8.21
Ocjena otpornosti betona na prodor klorida	Dobra	Srednja

Iz rezultata se može vidjeti kako beton s cementom s građevnim otpadom ima slabiju otpornost na prodor klorida od referentnog betona. Ovakav rezultat može biti uzrokovan većim postotkom uvučenog zraka u uzorku M6 što je moglo pospješiti prodor klorida.

U tablici 12 nalaze se rezultati ispitivanja vodonepropusnosti betona.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti

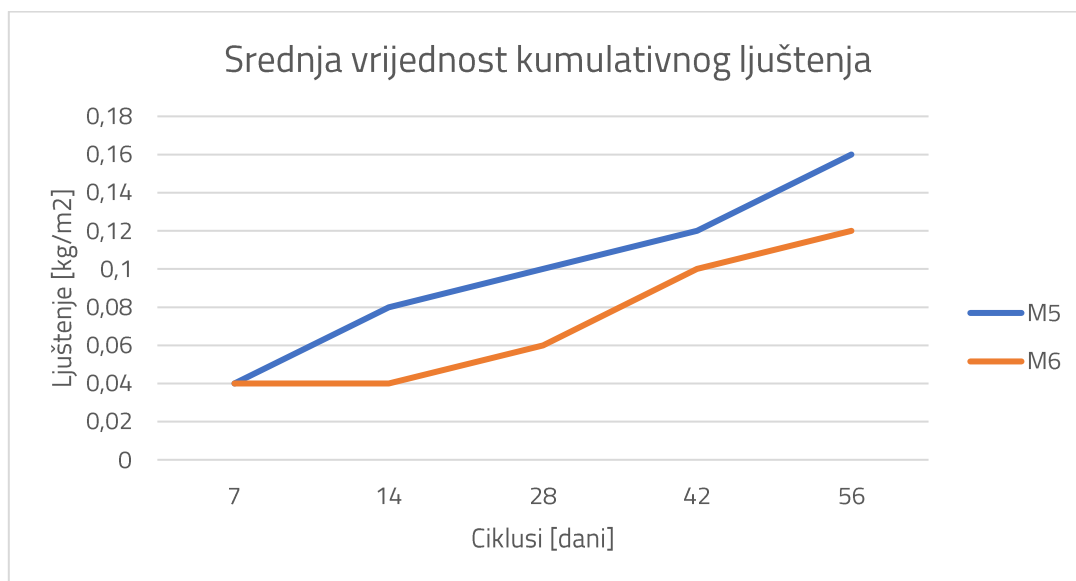
Oznaka uzorka	VDP (mm)	Srednja vrijednost prodora vode	Razred vodonepropusnosti
M5-1	0	8	VDP3
M5-2	19		
M5-3	6		
M6-1	0	6	VDP3
M6-2	17		
M6-3	0		

Iz rezultata se može zaključiti kako cement s građevnim otpadom ne utječe na vodonepropusnost betona s obzirom na to da su obje mješavine svrstane u razred vodonepropusnosti VDP3.

Kumulativne vrijednosti oljuštenog materijala nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje za obje su mješavine prikazane u tablici 13 dok su na slici 15 grafički prikazane srednje vrijednosti oljuštenog materijala za sve cikluse obje mješavine. Pojedinačni rezultati ispitivanja dani su u prilogima B i C na slikama 15 i 16 i u tablicama 16-21. Dobiveni rezultati pokazuju kako dodatak građevnog otpada u cement ne utječe na otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje sa solima za odmrzavanje s obzirom da su obje mješavine zadovoljile kriteriji za otpornost na smrzavanje i odmrzavanje.

Tablica 13. Srednja vrijednost oljuštenog materijala

Oznaka ispitnog tijela	Srednje vrijednosti kumulativnog ljuštenja nakon ciklusa [kg/m <sup>2</sup> ]				
	7	14	28	42	56
M5	0,04	0,08	0,10	0,12	0,16
M6	0,04	0,04	0,06	0,10	0,12



Slika 15. Srednja vrijednost oljuštenog materijala

## 6 ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovog diplomskog rada bio je provesti analizu utjecaja dodatka recikliranog građevnog otpada cementu na svojstva betona. Istraživanje je obuhvatilo izradu i ispitivanje šest betonskih mješavina s različitim sastavima i vrstama cementa, od kojih su dvije bile projektirane tlačne čvrstoće C25/30, jedna s običnim cementom, a druga s cementom s građevnim otpadom, dok su četiri mješavine imale projektiranu tlačnu čvrstoću C30/37 od kojih su dvije bile s običnim cementom, a dvije s cementom s građevnim otpadom. Mješavine su ispitane u svježem i očvrslulom stanju, analizirajući tlačnu čvrstoću, vodonepropusnost, otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te otpornost na prodor klorida.

Analizom rezultata ispitivanja doneseni su sljedeći zaključci:

- Svojstva betona s građevnim otpadom kao zamjenom dijela cementa u svježem stanju neznatno se razlikuju od svojstava običnog betona. Temperatura, gustoća i konzistencija betona s građevnim otpadom odstupaju u malom postotku od vrijednosti običnog betona dok je kod udjela pora ta razlika veća. Mješavine u kojima nije korišten aerant imale su istu vrijednost pora, dok su rezultati mješavina kod kojih je korišten aerant pokazali značajnije razlike.
- Tlačne čvrstoće mješavina M1 i M2 zadovoljile su projektiranu tlačnu čvrstoću C25/30 te se čvrstoće ispitane nakon 28 dana neznatno razlikuje. Mješavine M3 i M4 također su zadovoljile svoju projektiranu tlačnu čvrstoću C30/37 i u njihovom slučaju razlike u čvrstoći nakon 28 dana iznosi 4 MPa.
- Na osnovi ispitivanja vodonepropusnosti, beton s cementom s građevnim otpadom svrstan je u isti razred kao i referentni beton, VDP 3.
- Ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje pokazalo je gotovo identične rezultate za obje mješavine.
- Kod ispitivanja otpornosti na prodor klorida, beton s cementom s građevnim otpadom svrstan je u niži razred (srednja otpornost) od običnog betona (dobra otpornost). To je mogao biti rezultat većeg postotka zahvaćenog zraka u betonu s cementom s građevnim otpadom

Ovi rezultati potvrđuju da cementi s građevnim otpadom, u ovom slučaju recikliranim betonom, mogu uspješno zamijeniti dio cementa u udjelu do 29 %, čime se smanjuje ekološki otisak građevinskog sektora, a održivost materijala podiže na višu razinu.

## POPIS LITERATURE

- [1] Rehan R., Nehdi M. *Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry*. Environmental Science & Policy. travanj 2005;8(2):105–14.
- [2] Bjegović, D., Štirmer, N. *Teorija i tehnologija betona*. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [3] Miller, S.A., Juenger, M., Kurtis, K.E., Weiss, J. *Cement and Alternatives in the Anthropocene*. Annual Review of Environment and Resources. 18. listopada 2024.;49(1):309–35.
- [4] Juenger, M.C.G., Winnefeld, F., Provis, J.L., Ideker, J.H., *Advances in alternative cementitious binders*. Cement and Concrete Research. Prosinac 2011;41(12):1232–43
- [5] Kaptan, K., Cunha, S., Aguiar, J. A Review: Construction and Demolition Waste as a Novel Source for CO2 Reduction in Portland Cement Production for Concrete. Sustainability [Internet]. 9.1.2024.;16(2):585. Dostupno na: [https://mdpi-res.com/sustainability/sustainability-16-00585/article\\_deploy/sustainability-16-00585.pdf?version=1704815207](https://mdpi-res.com/sustainability/sustainability-16-00585/article_deploy/sustainability-16-00585.pdf?version=1704815207)
- [6] Gastaldi, D., Canonico, F., Capelli, L., Buzzi, L., Boccaleri, E., Irico, S. *An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste*. Cement and Concrete Composites. kolovoz 2015;61:29–35.
- [7] Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A., Duan, Z. *Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste*. Journal of Cleaner Production. Srpanj 2018;188:720–31.
- [8] Özçelikci, E., Oskay, A., Bayer, İ.R., Şahmaran, M. Eco-hybrid cement-based building insulation materials as a circular economy solution to construction and demolition waste. Cement and Concrete Composites [Internet]. 1.8.2023.;141. Dostupno na: <https://eds.s.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=2&sid=b7e30c74-3bbd-4478-aed8-ae1f6e0e1023%40redis&bdata=JkF1dGhUeXBIPWlwLHNzbyZzaXRIPWVkcyc1saXZlJnNjb3BIPXNpd>
- [9] Hewlett, P.C., "Lea's Chemistry of Cement and Concrete;" 4th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1998.
- [10] Habert, G. *Environmental impact of Portland cement production*. Eco-Efficient Concrete. 2013;3–25.



- [11]Štirmer, N.: *Utjecaj građevinskog materijala na okoliš*, Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi, 1 (2012), 293-311.
- [12]Shah, I.H., Miller, S.A., Jiang, D., Myers, R.J.. *Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO2 emissions by up to 1.3 gigatons*. Nature Communications [Internet]. 30.9.2022.;13(1):5758. Dostupno na: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-33289-7>
- [13]European Cement Association. *2023 Activity Report 2023*. Dostupno na: <https://cembureau.eu/media/dnbf4xzc/activity-report-2023-for-web.pdf> (pristupljeno 19.10.2024.).
- [14]Muller, N., Harnisch, J. *How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World* [Internet]. Nurnberg, Germany: WWF International ; 2007 [pristupljeno 20.10.2024.] p. 1–17. Dostupno na: [https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/englishsummary\\_lr\\_pdf.pdf](https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/englishsummary_lr_pdf.pdf)
- [15]Cements for a low-carbon Europe A review of the diverse solutions applied by the European cement industry through clinker substitution to reducing the carbon footprint of cement and concrete in Europe [Internet]. Dostupno na: [https://cembureau.eu/media/iffd23bq/cembureau\\_cementslowcarboneyurope.pdf](https://cembureau.eu/media/iffd23bq/cembureau_cementslowcarboneyurope.pdf)
- [16]Adesina A. *Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions*. Environmental Challenges. 2020 Dec;1:100004.
- [17]HRN EN 197-1- "Cement – 1 dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene"
- [18] Cements for a low-carbon Europe A review of the diverse solutions applied by the European cement industry through clinker substitution to reducing the carbon footprint of cement and concrete in Europe [Internet]. Dostupno na: [https://cembureau.eu/media/iffd23bq/cembureau\\_cementslowcarboneyurope.pdf](https://cembureau.eu/media/iffd23bq/cembureau_cementslowcarboneyurope.pdf)
- [19] HRN EN 197-4 – „Cement - 4. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti metalurškog cementa niske rane čvrstoće“
- [20]HRN EN 197-5 – „Cement - 5. dio: Miješani portlandski cement CEM II/C-M i miješani cement CEM VI“
- [21]HRN EN 197-6 – „Cement - 6. dio: Cement s recikliranim građevnim materijalima“
- [22]HRN RN 14216 – „Cement - Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti za posebne vrste cemenata vrlo niske topline hidratacije“
- [23]Tkaczewska, E., Malata, G. *Properties of the Cement, Slag and Fly Ash Mixture Composition Corresponding to CEM II/C-M and CEM VI*. Materials Proceedings. 2023; 13(1):11. <https://doi.org/10.3390/materproc2023013011>

- [24] Moisés Frías, Guerrero A, Monasterio M, Insignares Á, Sánchez I. *Viability of using limestone concrete waste from CDW to produce ternary cements type LC3*. Construction and Building Materials. 2.12.2023;411:134362–2.
- [25] Armistead, S.J., Babaahmadi, A., *Navigating regulatory challenges, technical performance and circular economy integration of mineral-based waste materials for sustainable construction: A mini review in the European context*. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 5.9.2024.
- [26] Gartner, E., Sui, T. *Alternative cement clinkers*. Cement and Concrete Research [Internet]. Prosinac 2018;114:27–39. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461630775X>.
- [27] Scrivener, K., Avet, F., Maraghechi, H., Zunino, F., Ston, J., Hanpongpan, W., et al. *Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3)*. Green Materials. Ožujak 2019;7(1):3–14.
- [28] Serdar, M., Bjegović, D., Štirmer, N. i Banjad Pečur, I. (2019). *Istraživački izazovi za širu primjenu alternativnih veziva u betonu*. Građevinar, 71. (10), 877-888. doi: 10.14256/JCE.2729.2019
- [29] Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., Scrivener, K.. *Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review*. Cement and Concrete Research. Studeni 2021;149:106564.
- [30] Sabino, T. D. de M. M., et al. "Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Coating Mortars as an Energy-Efficient Option for Construction." Construction & Building Materials, vol. 437, 2024, pp. 136954–, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136954>.
- [31] Wu, Q., Xue, Q., Yu, Z. Research status of super sulfate cement. Journal of Cleaner Production [Internet]. 20 travnja 2021;294:126228. Dostupno na: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621004480?casa\\_token=vmxxaW2N2DwAAAAA:Fp2Ze00iQ5l-fWPigw9IGGUR\\_jsVU0BI1ZJFiLraW38jURRwvtab-k62s00saOC96J57\\_Q360k\\_u](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621004480?casa_token=vmxxaW2N2DwAAAAA:Fp2Ze00iQ5l-fWPigw9IGGUR_jsVU0BI1ZJFiLraW38jURRwvtab-k62s00saOC96J57_Q360k_u)
- [32] Whittaker, M.J., Grigoriadis, K., Soutsos, M., Sha, W., Klinge, A., Paganoni, S., et al. *Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling*. Advances in Building Energy Research. 17. prosinca 2019;15(2):253–69.
- [33] Izvješće o gospodarenju građevnim otpadom u 2023. godini, Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije, Zavod za zaštitu okoliša, Zagreb, listopad 2024.
- [34] Tanash, O.A., Muthusamy, K., Yahaya, F.M., Ismail M.A. *Potential of recycled powder from clay Brick, sanitary Ware, and concrete waste as a cement substitute for Concrete: An overview*. Construction and Building Materials. 1.10.2023;401:132760–0.

- [35] He, Z., Shen, A., Wu, H., Wang, W., Wang, L., Yao, C., et al. *Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials*. Construction and Building Materials. Ožujak 2021;274:122113.
- [36] Irki, I., Debieb, F., Ouzadid, S., Dilmi, H., Settari, C., Boukhelkhel, Dj. *Effect of Blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar*. Journal of Adhesion Science and Technology. 6.11.2017;32(9):963–75.
- [37] Li, S., Chen, G., Zhao, Y., Xu, Z., Luo, X., Liu, C., et al. *Investigation on the reactivity of recycled brick powder*. Cement and Concrete Composites. 24.3.2023;139:105042–2.
- [38] Kim, J., Nciri, N., Sicakova, A., Kim, N. *Characteristics of waste concrete powders from multi-recycled coarse aggregate concrete and their effects as cement replacements*. Construction and Building Materials [Internet]. 22.9.2023;398:132525. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823022419>
- [39] Du, J., Zhang, T., Chen, P., Guo, Y., Zhan, B., Wei, J., et al. *Phase separation of recycled concrete powder during grinding and consequent influences on its hydration behaviors in cement paste*. Cement and Concrete Composites. 1.9.2023;142:105203–3.
- [40] Jagadesh, P., Oyebisi, S., Hareesh Muthu, A., Sarulatha, A., Supikshaa, K., Vhishva laxmy, V.P. et al. *Recycled concrete powder on cement mortar: Physico-mechanical effects and lifecycle assessments*. Journal of Building Engineering. 1.2.2024;108507–7.
- [41] Dienemann, W. HEIDELBERG MATERIALS' CO<sub>2</sub> roadmap On the way to carbon neutrality. ce/papers. 1.12.2023;6(6):110–3.
- [42] HRN EN 206 - „Beton - Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost“
- [43] HRN EN 12350-2 – „Ispitivanje svježega betona -- 2. dio: Ispitivanje slijeganjem“
- [44] HRN EN 12350-7 – „Ispitivanje svježega betona -- 7. dio: Sadržaj pora -- Tlačne metode“
- [45] HRN EN 12350-6 – „Ispitivanje svježega betona -- 6. dio: Gustoća“
- [46] HRN U.M1.032:1981 – „Mjerenje temperature svježeg betona“
- [47] HRN EN 12390-3 – „Ispitivanje očvrnuloga betona -- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka“
- [48] Nordtest Method BUILD 492
- [49] Bjegović, D; Štirmer, N; Baričević, A; Gabrijel, I; Jelčić Rukavina, M; Milovanović, B; Serdar, M; Škreb, K A; Bijelić, N *Teorija i tehnologija betona Mjerne metode*. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Bjegović, Dubravka; Štirmer, Nina (ur.), 2022
- [50] HRN EN 12390-8 – „Ispitivanje očvrnuloga betona - 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom“
- [51] HRN RN 12390-2 – „Ispitivanje očvrnuloga betona - 2. dio: Izrada i njega ispitnih uzoraka za ispitivanja čvrstoće“

[52]HRN 1128:2023 - „Beton - Nacionalni zahtjevi uz normu HRN EN 206:2021“

[53]HRN EN 12390-9 – „Ispitivanje očvrsloga betona - 9. dio: Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje – Ljuštenje“

## POPIS SLIKA

Slika 1. Pregled procesa proizvodnje cementa (Izvor:[10]).....	2
Slika 2. Svjetska proizvodnja cementa u 2022. godini po regijama i glavnim zemljama (Izvor: [13]) .....	5
Slika 3. Priprema recikliranog praha od opeke (Izvor:[36]) .....	17
Slika 4. Zatvaranje kruga materijala i CO <sub>2</sub> u životnom ciklusu betona (Izvor:[41]) .....	19
Slika 5. Granulometrijski sastav agregata .....	23
Slika 6. Postupak ispitivanja konzistencije slijeganjem (Izvor:[31]).....	25
Slika 7. Ispitivanje konzistencije slijeganjem .....	26
Slika 8. Porometar za određivanje sadržaja zraka.....	27
Slika 9. Mjerenje temperature svježeg betona termometrom.....	28
Slika 10. Ispitivanje tlačne čvrstoće.....	30
Slika 11. Čelije s uzorcima spojene na potenciostat .....	31
Slika 12. Polovice uzoraka nakon nanošenja srebrovog nitrata .....	32
Slika 13. Priprema uzoraka za ispitivanje vodonepropusnosti (Izvor:[49]).....	33
Slika 14. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće.....	35
Slika 15. Srednja vrijednost oljuštenog materijala.....	37
Slika 16. Grafički prikaz kumulativnog ljuštenja.....	48
Slika 17. Grafički prikaz kumulativnog ljuštenja.....	50

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste posebnih cemenata (Izvori: [2,20,21]) .....	7
Tablica 2. Vrste građevnog otpada (Izvor:[33]).....	13
Tablica 3. Procijenjena količina nastalog građevnog otpada u 2023. godini, po vrsti otpada (Izvor:[33]).....	14
Tablica 4. Program ispitivanja .....	21
Tablica 5. Sastav i svojstva cementa CEM II/B-M(S-V-LL) i CEM II/B-M (S-F).....	22
Tablica 6. Sastavi betonskih mješavina.....	24
Tablica 7. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju.....	29
Tablica 8. Kriteriji za kvalitetu betona s obzirom na prodor klorida (Izvor:[49]).....	32
Tablica 9. Razredi vodonepropusnosti prema HRN 1128 (Izvor:[52]).....	33
Tablica 10. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće [MPa].....	34
Tablica 11. Rezultati ispitivanja otpornosti na prodor klorida.....	36
Tablica 12. Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti .....	36
Tablica 13. Srednja vrijednost oljuštenog materijala.....	37
Tablica 14. Numerički granulometrijski sastav agregata.....	46
Tablica 15. Kumulativni granulometrijski sastav agregata .....	46
Tablica 16. Dimenzije uzoraka.....	47
Tablica 17. Vrijednost oljuštenog materijala nakon svakog ciklusa.....	47
Tablica 18. Vrijednost kumulativnog ljuštenja i srednja vrijednost ljuštenja.....	47
Tablica 19. Dimenzije uzoraka.....	49
Tablica 20. Vrijednosti oljuštenog materijala nakon svakog ciklusa.....	49
Tablica 21. Vrijednosti kumulativnog ljuštenja i srednja vrijednost ljuštenja.....	49

## PRILOG A

Tablica 14. Numerički granulometrijski sastav agregata

Frakcija (mm)	Prolaz kroz sita (%)									
	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0/4	0	10,7	16	24	32	45	65	95	100	100
4/8	0	0,7	1	1	1	1	1	1	94	100
8/16	0	0,8	1	1	1	1	1	1	8	97
B 16	0	0	0	8	20	32	42	56	76	100

Tablica 15. Kumulativni granulometrijski sastav agregata

Frakcija (mm)	%	Otvor sita (mm)									
		0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0/4	58	0	6,21	9,28	13,92	18,56	26,10	37,70	55,10	58	58
4/8	16	0	0,11	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	15,04	16
8/16	26	0	0,21	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	2,08	25,22
Suma	100	0	6,53	9,70	14,34	18,98	26,52	38,12	55,52	75,12	99,22

## PRILOG B

## Rezultati ispitivanja

## 1. Mješavina M5

Tablica 16. Dimenzije uzoraka

Oznaka ispitnog tijela	Dimenzije (mm)			Površina (mm <sup>2</sup> )	Površina (m <sup>2</sup> )
	Duljina a	Širina b	Visina h		
M5-1	150,1	150,3	51,5	22560,03	0,0226
M5-2	149,9	149,8	51,5	22455,02	0,0225
M5-3	149,8	150,1	51,1	22484,98	0,0225
M5-4	150,4	150	51,3	22560,00	0,0226

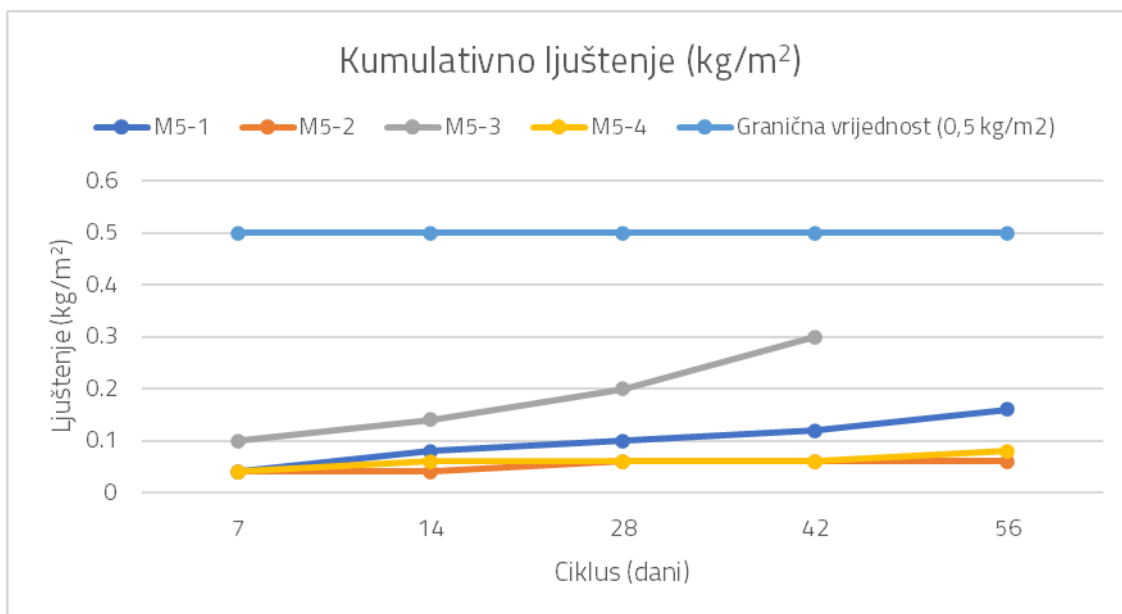
Tablica 17. Vrijednost oljuštenog materijala nakon svakog ciklusa

Oznaka ispitnog tijela	(7± 1). Ciklus		(14± 1). Ciklus		(28± 1). Ciklus		(42± 1). Ciklus		(56± 1). Ciklus	
	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena
M5-1	0,74	slabo	0,70	slabo	0,24	slabo	0,50	slabo	0,69	slabo
M5-2	0,72	slabo	0,12	slabo	0,08	slabo	0,23	slabo	0,02	slabo
M5-3	0,63	slabo	1,01	slabo	0,97	slabo	1,21	slabo	1,77	slabo
M5-4	0,80	slabo	0,10	slabo	0,12	slabo	0,20	slabo	0,14	slabo

Tablica 18. Vrijednost kumulativnog ljuštenja i srednja vrijednost ljuštenja

Oznaka ispitnog tijela	Kumulativno ljuštenje [g]					Kumulativno ljuštenje [kg/m <sup>2</sup> ]				
	7	14	28	42	56	7	14	28	42	56
M5-1	0,74	1,44	1,68	2,18	2,87	0,04	0,08	0,1	0,12	0,16
M5-2	0,72	0,84	0,92	1,15	1,17	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06
M5-3	0,63	1,64	2,61	3,82	5,59	0,04	0,1	0,14	0,2	0,3
M5-4	0,80	0,90	1,02	1,22	1,36	0,04	0,06	0,06	0,06	0,08
Srednja vrijednost:						0,04	0,07	0,09	0,11	0,15





Slika 16. Grafički prikaz kumulativnog ljuštenja

## PRILOG C

## Rezultati ispitivanja

## 2. Mješavina M6

Tablica 19. Dimenzije uzoraka

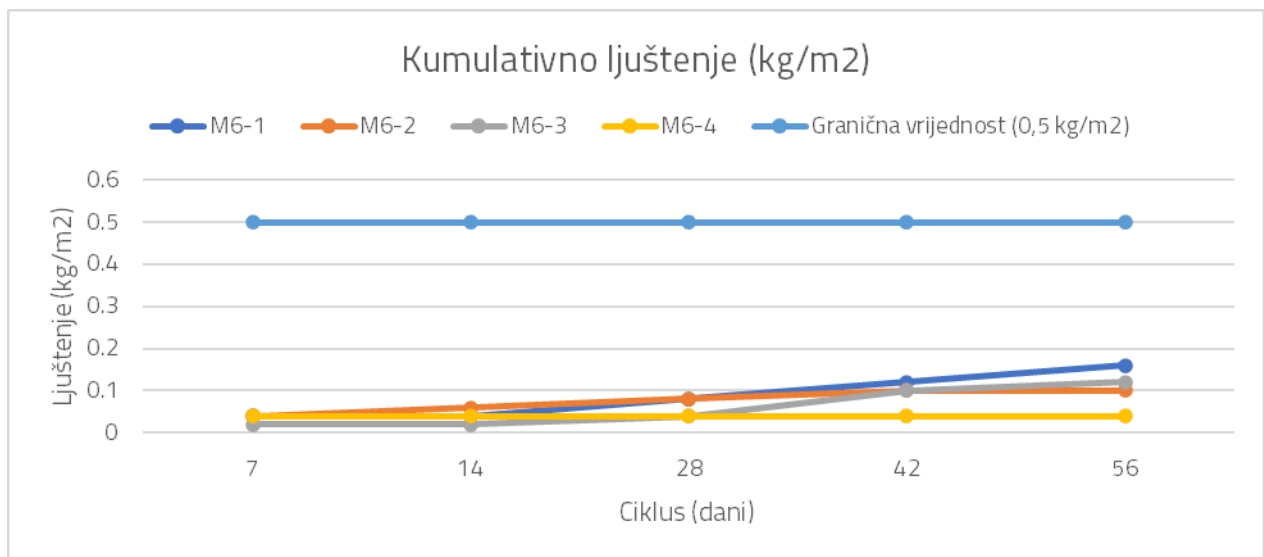
Oznaka ispitnog tijela	Dimenzije (mm)			Površina (mm <sup>2</sup> )	Površina (m <sup>2</sup> )
	Duljina a	Širina b	Visina h		
M6-1	150,2	149,8	51,5	22499,96	0,0225
M6-2	149,9	150,1	51,5	22499,99	0,0225
M6-3	149,8	150,3	51,1	22514,94	0,0225
M6-4	150,3	149,7	51,3	22499,91	0,0225

Tablica 20. Vrijednosti oljuštenog materijala nakon svakog ciklusa

Oznaka ispitnog tijela	(7± 1). Ciklus		(14± 1). Ciklus		(28± 1). Ciklus		(42± 1). Ciklus		(56± 1). Ciklus	
	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena	Masa [g]	Vizualna ocjena
M6-1	0,49	slabo	0,24	slabo	0,48	slabo	0,67	slabo	0,69	slabo
M6-2	0,47	slabo	0,37	slabo	0,55	slabo	0,45	slabo	0,02	slabo
M6-3	0,22	slabo	0,08	slabo	0,37	slabo	1,07	slabo	0,4	slabo
M6-4	0,54	slabo	0,08	slabo	0,05	slabo	0,05	slabo	0,01	slabo

Tablica 21. Vrijednosti kumulativnog ljuštenja i srednja vrijednost ljuštenja

Oznaka ispitnog tijela	Kumulativno ljuštenje [g]					Kumulativno ljuštenje [kg/m <sup>2</sup> ]				
	7	14	28	42	56	7	14	28	42	56
M6-1	0,49	0,73	1,21	1,88	2,57	0,04	0,04	0,08	0,12	0,16
M6-2	0,47	0,84	1,39	1,84	1,86	0,04	0,06	0,08	0,10	0,10
M6-3	0,22	0,30	0,67	1,74	2,14	0,02	0,02	0,04	0,10	0,12
M6-4	0,54	0,62	0,67	0,72	0,73	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Srednja vrijednost:						0,04	0,04	0,06	0,09	0,11



Slika 17. Grafički prikaz kumulativnog ljuštenja