

Određivanje čvrstoće portland cementa uz dodatak otpadne građevinske opeke

Samodol, Lora

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:464857>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE PORTLAND CEMENTA UZ DODATAK
OTPADNE GRAĐEVINSKE OPEKE

ZAVRŠNI RAD

LORA SAMODOL

Matični broj: 1370

Split, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: KEMIJSKO INŽENJERSTVO

ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE PORTLAND CEMENTA UZ
DODATAK OTPADNE GRAĐEVINSKE OPEKE

ZAVRŠNI RAD

LORA SAMODOL

Matični broj: 1370

Split, rujan 2024.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
STUDY ORIENTATION: CHEMICAL ENGINEERING

**DETERMINATION OF THE STRENGTH OF PORTLAND
CEMENT WITH THE ADDITION OF WASTE BUILDING BRICKS**

BACHELOR THESIS

LORA SAMODOL

Parent number: 1370

Split, September 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet
Prijediplomski studij Kemijske tehnologije, smjer: Kemijsko inženjerstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo
Mentor: izv. prof. dr. sc. Damir Barbir

ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE PORTLAND CEMENTA UZ DODATAK OTPADNE GRAĐEVINSKE OPEKE

Lora Samodol, 1370

Sažetak: U ovom radu provedeno je određivanje čvrstoće portland cementa bez i uz dodatak otpadne građevinske opeke. Određivanje čvrstoće provedeno je nakon 24 h, 48 h, 7 dana i 28 dana njegovanja u vodi pri temperaturi od 20 °C, bez i uz dodatka 20 mas. % otpadne opeke te omjeru voda/cement = 0,5. Pomoću uređaja za određivanje čvrstoća prvo je određena savojna čvrstoća cementnih kompozita bez i s dodatkom otpadne građevinske opeke, a potom i tlačna čvrstoća. Iz dobivenih rezultata određeno je maksimalno opterećenje koje je primijenjeno na uzorak kako bi došlo do njegovog loma, a na temelju čega se vidi jesu li prema normi HRN EN 196-1 zadovoljeni uvjeti rane i normirane čvrstoće. Dodatkom otpadne građevinske opeke utječe se na čvrstoću cementnog morta. Dodatkom 20 mas. % otpadne opeke ne zadovoljava se uvjet rane čvrstoće, međutim zadovoljen je uvjet normirane čvrstoće.

Ključne riječi: portland cement, savojna čvrstoća, tlačna čvrstoća, otpadna građevinska opeka

Rad sadrži: 36 stranica, 18 slika, 8 tablica i 17 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

- | | |
|------------------------------------|-------------|
| 1. prof. dr. sc. Pero Dabić | predsjednik |
| 2. izv. prof. dr. sc. Miće Jakić | član |
| 3. izv. prof. dr. sc. Damir Barbir | mentor |

Datum obrane:

Rad je u tiskanom i elektroničkom (PDF) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35, u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Splitu te u javnoj internetskoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology
Undergraduate Study of Chemical Technology, Study orientation: Chemical Engineering

Scientific area: Technical Sciences
Scientific field: Chemical Engineering
Supervisor: Damir Barbir, PhD, Assoc. Prof.

DETERMINATION OF THE STRENGTH OF PORTLAND CEMENT WITH THE ADDITION OF WASTE BUILDING BRICKS

Lora Samodol, 1370

Abstract: In this work, the strength of Portland cement was determined without and with the addition of waste building bricks. Determination of strength was carried out after 24 h, 48 h, 7 days and 28 days of curing in water at a temperature of 20 °C, without or with the addition of 20 wt. % waste bricks and water/cement ratio = 0.5. The strength determination device is used to first determine the flexural strength of cement composites without and with the addition of waste building bricks, and then the compressive strength. From the obtained results, the maximum load that was applied to the sample in order to cause its breakage was determined, based on which it can be seen whether the early and standardized strength conditions are met according to the standard HRN EN 196-1. The addition of waste building bricks affects the strength of the cement mortar. With the addition of 20 wt. % waste bricks doesn't meet the condition of early strength, however the condition of standardized strength is met.

Keywords: Portland cement, flexural strength, compressive strength, waste building bricks

Thesis contains: 36 pages, 18 figures, 8 tables, 17 references

Original in: Croatian

Defence committee for evaluation and defense of bachelor thesis:

- | | |
|------------------------------------|--------------|
| 1. Pero Dabić, PhD, Full Prof. | chair person |
| 2. Miće Jakić, PhD, Assoc. Prof. | member |
| 3. Damir Barbir, PhD, Assoc. Prof. | supervisor |

Defence date:

Printed and electronic (PDF) form of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology in Split, Ruđera Boškovića 35, in the public library database of the University of Split Library and in the digital academic archives and repositories of the National and University Library.

Završni rad je izrađen u Zavodu za anorgansku tehnologiju Kemijsko-tehnološkog fakulteta pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Barbir Damira u razdoblju od svibnja do rujna 2024. godine.

Zahvale

Duboko se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Barbir Damiru na razumijevanju, uloženom trudu i stručnim savjetima prilikom izrade završnog rada.

Također veliko hvala profesorima koji su sudjelovali i pomogli u izradi eksperimentalnog dijela rada.

Posebnu i najveću zahvalu zaslužuje moja obitelj i prijatelji na bezuvjetnoj ljubavi, potpori i razumijevanju tijekom cijelog studija, bez njih ovaj put ne bi bio isti.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

- Osušiti portland cement CEM I 42,5 R do konstantne mase, samljeti osušiti i prosijati otpadnu građevinsku opeku te pripremiti cementne mortove uz dodatak 20 mas. % otpadne građevinske opeke.
- Uzorke njegovati 1, 2, 7 i 28 dana pri temperaturi od 20 °C.
- Odrediti savojne i tlačne čvrstoće uzoraka portland cementa bez i uz dodatak otpadne građevinske opeke.
- Dobivene rezultate potrebno je proučiti, prikazati tabelarno i grafički te iznijeti zaključke.

SAŽETAK

U ovom radu provedeno je određivanje čvrstoće portland cementa bez i uz dodatak otpadne građevinske opeke.

Određivanje čvrstoće provedeno je nakon 24 h, 48 h, 7 dana i 28 dana njegovanja u vodi pri temperaturi od 20 °C, bez i uz dodatka 20 mas. % otpadne opeke te omjeru voda/cement = 0,5.

Pomoću uređaja za određivanje čvrstoća prvo je određena savojna čvrstoća cementnih kompozita bez i s dodatkom otpadne građevinske opeke, a potom i tlačna čvrstoća.

Iz dobivenih rezultata određeno je maksimalno opterećenje koje je primijenjeno na uzorak kako bi došlo do njegovog loma, a na temelju čega se vidi jesu li prema normi HRN EN 196-1 zadovoljeni uvjeti rane i normirane čvrstoće.

Dodatkom otpadne građevinske opeke utječe se na čvrstoću cementnog morta.

Dodatkom 20 mas. % otpadne opeke ne zadovoljava se uvjet rane čvrstoće, međutim zadovoljen je uvjet normirane čvrstoće.

Ključne riječi: portland cement, savojna čvrstoća, tlačna čvrstoća, otpadna građevinska opeka

ABSTRACT

In this work, the strength of Portland cement was determined without and with the addition of waste building bricks.

Determination of strength was carried out after 1, 2, 7 and 28 days of curing in water at a temperature of 20 °C, without or with the addition of 20 wt. % waste bricks and water/cement ratio = 0.5.

The strength determination device is used to first determine the flexural strength of cement composites without and with the addition of waste building bricks, and then the compressive strength.

From the obtained results, the maximum load that was applied to the sample in order to cause its breakage was determined, based on which it can be seen whether the early and standardized strength conditions are met according to the standard HRN EN 196-1.

The addition of waste building bricks affects the strength of the cement mortar.

With the addition of 20 wt. % waste bricks doesn't meet the condition of early strength, however the condition of standardized strength is met.

Keywords: Portland cement, flexural strength, compressive strength, waste building bricks

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| UVOD..... | 1 |
| 1. OPĆI DIO | 2 |
| 1.1. Cement | 3 |
| 1.2. Povijest cementa..... | 3 |
| 1.3. Podjela cementa | 4 |
| 1.4. Proizvodnja portland cementa..... | 5 |
| 1.4.1. Kemijski sastav portland cementnog klinkera..... | 7 |
| 1.4.2. Cementni moduli | 10 |
| 1.5. Hidratacija cementa..... | 11 |
| 1.5.1. Hidratacija C_3S | 11 |
| 1.5.2. Hidratacija C_2S | 11 |
| 1.5.3. Hidratacija C_3A | 12 |
| 1.5.4. Hidratacija C_4AF | 13 |
| 1.5.5. Hidratacija portland cementa..... | 13 |
| 1.6. Parametri koji utječu na hidrataciju i čvrstoću..... | 15 |
| 1.6.1. Vrsta cementa | 16 |
| 1.6.2. Temperatura odvijanja reakcije | 16 |
| 1.6.3. Prisutnost mineralnih i kemijskih dodataka | 16 |
| 1.6.4. Vodocementni omjer | 16 |
| 1.7. Čvrstoća cementa | 17 |
| 1.7.1. Određivanje savojne čvrstoće..... | 17 |
| 1.7.2. Određivanje tlačne čvrstoće | 18 |
| 2. EKSPERIMENTALNI DIO | 19 |
| 2.1. Materijali | 20 |
| 2.1.1. Portland cement | 20 |
| 2.1.2. Pijesak..... | 20 |
| 2.1.3. Voda | 21 |
| 2.1.4. Otpadna građevinska opeka..... | 21 |
| 2.2. Priprema morta..... | 22 |
| 2.2.1. Sastav morta | 22 |
| 2.2.2. Miješanje morta | 23 |
| 2.2.2.1. Miješalica | 23 |
| 2.3. Priprema ispitnih uzoraka | 24 |
| 2.3.1. Kalupi | 25 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.4. Vađenje i stvrđivanje..... | 25 |
| 2.5. Testiranje čvrstoće | 26 |
| 2.5.1. Savojna čvrstoća | 26 |
| 2.5.2. Tlačna čvrstoća | 27 |
| 3. REZULTATI I RASPRAVA..... | 28 |
| 5. ZAKLJUČCI..... | 32 |
| 6. POPIS KRATICA I SIMBOLA | 33 |
| 7. LITERATURA | 35 |

UVOD

Cement je opći naziv za različite vrste veziva koja imaju hidraulična svojstva, a potječe od latinske riječi *caedere* što znači uništiti tj. lomiti. Posjeduje korisna i poželjna svojstva, poput tlačne čvrstoće, trajnosti i estetskog izgleda, zbog čega ima veliku primjenu u građevini. Hidraulična svojstva daju mu mogućnost vezivanja pod vodom u čvrstu kompaktnu masu. Posljedica su reakcija hidratacije njegovih konstituenata. Proces tijekom kojeg reakcijom cementa i vode dolazi do vezivanja i stvrdnjavanja pri čemu nastaju produkti s vezivnim svojstvima naziva se hidratacija.¹

U današnje vrijeme cement je najrašireniji građevinski materijal u svijetu čija se potrošnja smatra važnim pokazateljem razvijenosti pojedine zemlje. Iznimne količine troše za izradu kompozitnih materijala, odnosno betona i mortova, koji se koriste za izgradnju temelja, zidova, ploča, mostova, puteva i mnogih drugih struktura neophodnih za život današnjeg čovječanstva.

Zadatak ovog rada je ispitivanje utjecaja dodatka otpadnih materijala tj. otpadne građevinske opeke na čvrstoće cementnih kompozita nakon 1, 2, 7 i 28 dana hidratacije. Uspoređivanjem dobivenih rezultata tlačne i savojne čvrstoće bez i s dodatkom otpadne građevinske opeke može se odrediti koliki je utjecaj opeke na proces hidratacije te odrediti maksimalnu količinu otpadne građevinske opeke koja se može dodati portland cementu, a da on zadovoljava čvrstoću propisanu standardom.

1. OPĆI DIO

1.1. Cement

Cement je fini prah dobiven termičkom obradom mješavine vapnenca i gline, pomiješan s vodom, veže i otvrdnjava procesom hidratacije i prelazi u tvrdnu masu tj. cementni kamen. Dobiva se usitnjavanjem pečenog klinkera, glavnog sastojka cementa dobivenog pečenjem sirovine koja sadrži okside željeza, aluminijska, kalcija i silicija u određenim omjerima, te gipsa. Najvažnije je hidraulično mineralno vezivo netopljivo u vodi, a s vodom i agregatom daje beton.²

1.2. Povijest cementa

Vjeruje se da se prva upotreba cementa započela u starom Egiptu pri izgradnji Velike piramide u Gizi prikazanoj na slici 1(a), a dobivao se miješanjem gipsa i vapna.

Kasnije su stari Rimljani i Grci unaprijedili upotrebu cementa tako što od vulkanskog pepela i vapna uz prisustvo vode dobili hidraulički cement. Nazvan je „pozzolana“ po malenom gradiću Pozzuoliu u blizini Vezuva, a korišten za izgradnju Colosseuma (slika 1,b) , Pantheona (slika 1,c) , akvadukta i luka.



a)

b)

c)

Slika 1. Prikaz Velike piramide u Gizi (a) , Colosseuma (b) i Pantheona (c) u Rimu^{3,4}

1756. godine obnovom uništenog svjetionika Eddystonea u Engleskoj John Smeaton dobio je tzv. „portland cement“. Najučinkovitije je bilo upotrijebiti najotporniji mort, pripremljen od vapna i trasa čiju je kakvoću Smeaton usporedio s tada najboljim građevinskim kamenom iz okolice Portlanda (Engleska).

Joseph Aspdin 1824. godine je patentirao postupak proizvodnje sivog umjetnog kamena koristeći naziv „portland cement“. Pečenjem smjese vapnenca s glinom i vodom dobivala se homogenizirana masa iz koje se procesima sušenja, drobljenja, pečenja

dobio sitni prah. Proizvodnja se odvijala na nedovoljno visokoj temperaturi što je spriječilo da sam proces postane preteča moderne proizvodnje „portland cementa“.^{2,5}

Aspidinovu metodu unaprijedio je oko 1850. godine Isaac Charles Johnson tako što je spaljivanjem krede i gline pri višoj temperaturi od 1400-1500 °C dobio moderni cement, sličan onom koji se koristi danas.⁶

Danas cement je jedan od najvažnijih građevinskih materijala na svijetu čija upotreba neprestano raste. Osim što ima veliki značaj u građevinarstvu i infrastrukturi, isto tako ima velik utjecaj na današnju ekonomiju osiguravajući veliki broj radnih mjesta, urbanizaciju svijeta i potrebu za novim građevinama te naprednu tehnologiju koja je danas sve više popularna.

1.3. Podjela cementa

Postoje različite vrste cementa od kojih svaka ima svoja jedinstvena svojstva, namjenu i prednosti na temelju kojih su podijeljeni u različite skupine, a prema tome prikladni za specifične primjene.

1) Prema **mineralnom sastavu**:

- aluminatne cemente
 - dobiveni pečenjem boksita i vapnenca, a glavni minerali klinkera su kalcijevi aluminati
- silikatne cemente
 - dobiveni pečenjem lapora i vapnenca, a glavni minerali klinkera su silikati
 - prema sastavu mogu se podijeliti na:
 - bijeli cement,
 - čisti portland cement,
 - portland cement s dodacima,
 - metalurški cement,
 - pucolanski cement i
 - miješani cement

2) Prema **namjeni**:

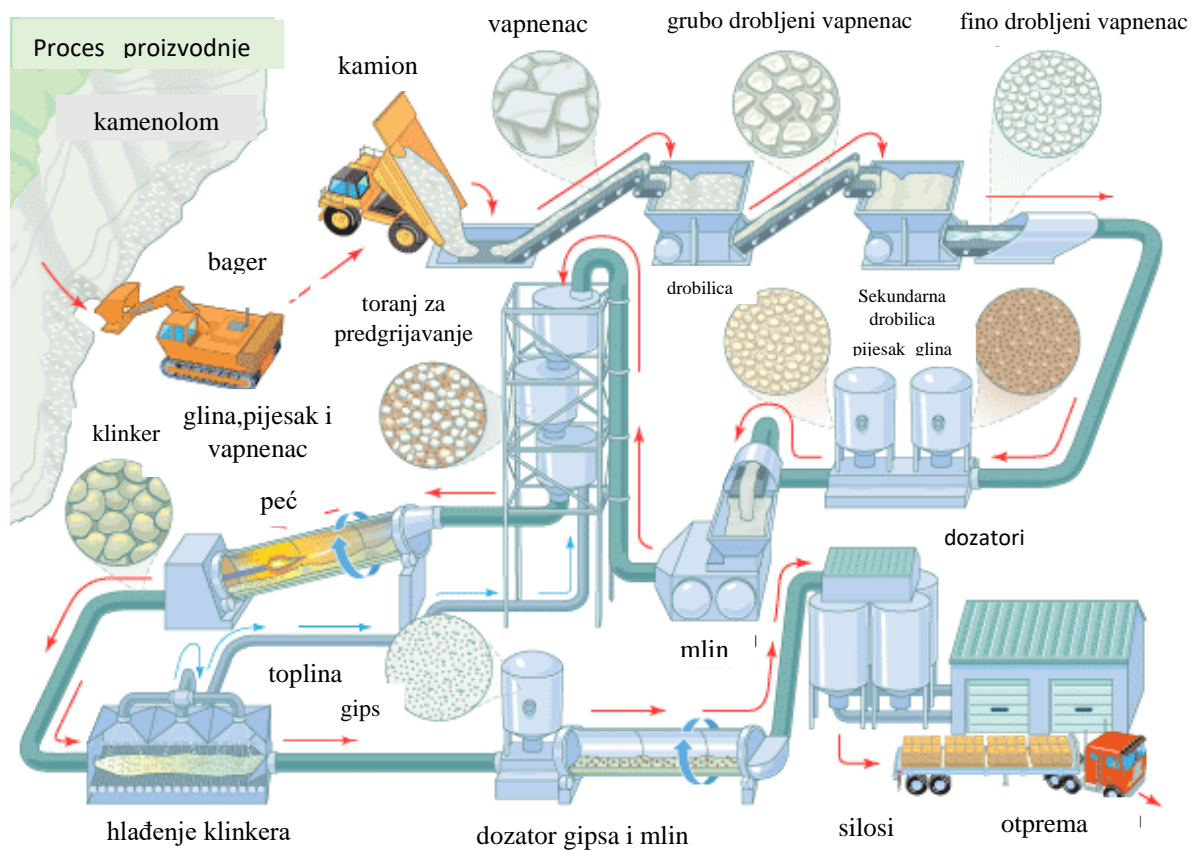
- cementi opće namjene
 - prema normi HRN EN 197-1 dijele se na:
 - CEM I – čisti portland cement
 - CEM II – portland cement s miješanim dodatkom
 - CEM III – metalurški cement
 - CEM IV – pucolanski cement
 - CEM V – miješani cement

- cementi posebne namjene
 - prema normi HRN B. C1. 011 dijele se na:
 - bijeli cement
 - cementi niske topline hidratacije
 - aluminatni cement
 - sulfatno otporni cementi⁷

1.4. Proizvodnja portland cementa

Proizvodnja portland cementa je složen tehnološki proces u kojem dolazi do izmjene sastava i svojstava. Iz sirovine se dobije portland cementi klinker, od kojeg se meljavom uz dodatak gipsa i vode dobije cement.

Cijeli proces dijeli se na četiri osnovne faze (slika 2): eksploatacije sirovine, pripreme sirovine, proizvodnje klinkera i meljave klinkera.²



Slika 2. Shema proizvodnje portland cementa⁸

1. Eksploatacija sirovine:

Proces započinje eksploatacijom kamena iz kamenoloma kako bi se dobio vapnenac. Eksploatirana sirovina vapnenca prolazi kroz više faza meljave i drobilica dok se iz grubo usitnjenog vapnenca ne dobije fino usitnjeni vapnenac veličine čestica od 10 do 80 mm.^{2,8}

2. Priprema sirovine:

Fino usitnjeni vapnenac miješa se s pijeskom i glinom u točno određenim omjerima te zajedno ulaze u mlin za meljavu, a potom u toranj za predgrijavanje gdje se zagrijava na oko 1000 °C. Svrha samog predgrijavanja je uklanjanje vlage (vode) iz sirovina kako bi se smanjila potrebna količina energije za zagrijavanje i pokretanje kemijskih reakcija za stvaranje klinkera.^{2,8}

3. Proizvodnja klinkera:

Pripremljena sirovina ulazi u blago nagnutu rotacijsku peć gdje pečenjem pri oko 1450 °C minerali prisutni u sirovini tvore portland cementi klinker.^{2,8}

4. Meljava klinkera:

Nastali vrući portland-cementi klinker (slika 3.a) odvodi se iz rotacijske peći na hlađenje te potom odlazi na završno mljevenje s određenom količinom gipsa (slika 3.b). Gotov cement se prenosi u silose za skladištenje te skladišti.^{2,8}



a)



b)

Slika 3. Prikaz cementnog klinkera (a)⁹, samljeveni cement (b)¹⁰

1.4.1. Kemijski sastav portland cementnog klinkera

Kemijski sastav portland cementa iskazuje se u obliku oksida koji su prisutni u mineralima klinkera, a zajedno sa svojim udjelima su prikazani u tablici 1. Glavni oksidi prisutni u većim količinama su SiO_2 , Al_2O_3 , CaO i Fe_2O_3 , dok oni sporedni prisutni u manjim količinama SO_3 , MgO , P_2O_5 , TiO_2 , Mn_2O_3 i $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$.²

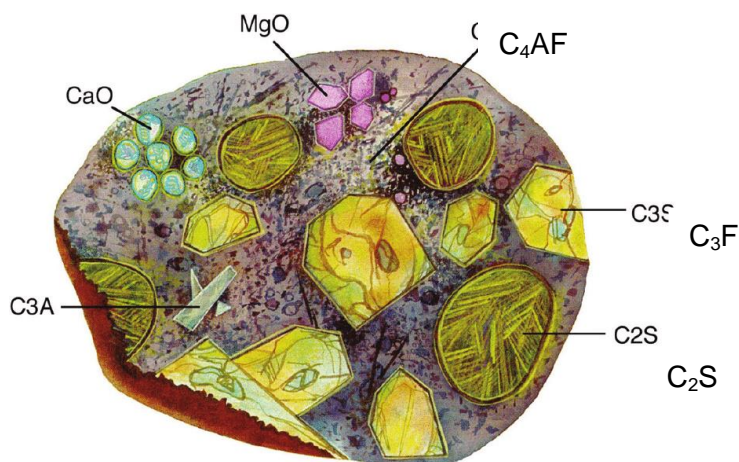
Tablica 1. Kemijski sastav portland cementnog klinkera²

| Empirijska formula | Oznaka | Maseni udio (%) |
|--|-----------|-----------------|
| Al_2O_3 | A | 4-8 |
| CaO | C | 58-67 |
| Fe_2O_3 | F | 2-5 |
| MgO | M | 1-5 |
| $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ | N+K | 0-1 |
| Mn_2O_3 | \bar{M} | 0-3 |
| P_2O_5 | P | 0-1,5 |
| SO_3 | \bar{S} | 0,1-2,5 |
| SiO_2 | S | 16-26 |
| TiO_2 | T | 0-0,5 |
| Gubitak žarenjem | | 0-0,5 |

Uz kemijski sastav od iznimne važnosti je i mineralni sastav klinkera prikazan u tablici 2. Procesom sinteriranja oksidi silicija, aluminija, kalcija i željeza tvore onečišćene minerale klinkera i tako formiraju četiri osnovne mineralne faze: trikalcijev silikat (C_3S), dikalcijev silikat (C_2S), trikalcijev aluminat (C_3A) i tetrakalcijev aluminat ferit (C_4AF). Svaki pojedini mineral daje klinkeru karakteristična svojstva te utječe na osnovna svojstva portland cementa.¹¹ Na slici 4. prikazan je poprečni presjek zrna cementa.

Tablica 2. Mineralni sastav portland cementa²

| Oznaka | Naziv | Empirijska formula |
|-----------------------|---|---|
| C_3S | Trikalcijev silikat (Alit) | $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ |
| C_3A | Trikalcijev aluminat (Aluminatna faza) | $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ |
| C_2S | Dikalcijev silikat (Belit) | $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ |
| C_4AF | Tetrakalcijev aluminat ferit (Aluminat-feritna faza) | $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ |



Slika 4. Poprečni presjek zrna cementa¹²

Alit – glavni mineral portland cementnog klinkera koji se formira pri temperaturama višim od 1250 °C reakcijom C_2S i CaO , dok pri nižim dolazi do njegovog raspada. Čvrstoća portland cementa njemu najviše ovisi o masenom udjelu koji je viši od 50 %. S vodom brzo reagira i doprinosi ranoj čvrstoći, te viskom razvijanju topline. Odnosno što je veća količina alita ujedno je i brže očvršćivanje.

Belit – β – modifikacija C_2S -a masenog udjela oko 15 % koja nastaje pečenjem klinkera pri temperaturi sinteriranja iznad 1420 °C. U odnosu na alit sporije hidratizira i očvršćava ali ima utjecaj na dugotrajnu čvrstoću portland cementa te manje razvijanje topline.

Aluminatna faza – najreaktivnija mineralna faza koja nema polimorfnih modifikacija. Masenog udjela oko 7% u ukupnom mineralnom sastavu klinkera. Samo kubična forma je stabilna u velikome temperaturnom intervalu. Koristi se za postizanje ranih čvrstoća cementa zbog svoje brze reakcije s vodom, koja ponekad može biti i previše brza pa se često dodaje gips kako bi se reakcija usporila. Loša strana trikalcijsva aluminata jest što u reakciji sa sulfatima stvara etringit, što je nepoželjno.

Aluminat feritna faza – čvrsta otopina sastava $C_2A_xF_{1-x}$ čija vrijednost x-a varira od 0 do 0.7. Neovisno o sastavu uvijek kristalizira rompski. Masenog udjela oko 8% u sastavu klinkera. Nema značajan utjecaj na čvrstoću cementa, ali utječe na boju cementa. Ukoliko u cementu ima više C_4AF dobit će se cement sive boje, a ako ima manje C_4AF dobit će se cement svjetlije boje.^{11,13}

1.4.2. Cementni moduli

U procesu proizvodnje potrebno je zadovoljiti određenu kvalitetu klinkera zadovoljavanjem cementnih modula koji izražavaju omjere glavnih oksida u sirovini.

Hidraulički modul (HM) koji predstavlja omjer kalcijeva oksida naspram željezovog silicijeva, aluminijskoga oksida.

$$HM = \frac{CaO}{Fe_2O_3 + SiO_2 + Al_2O_3} \quad (1)$$

Portland cement dobre kakvoće ima vrijednost HM-a oko 2. Ukoliko je vrijednost HM-a manja od 1,7 cementi su preniske čvrstoće, a oni s vrijednosti većom od 2,4 su nepostojana volumena.

Silikatni modul (SM) jednak je omjeru silicijeva oksida naspram aluminijskog i željezovog oksida.

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

Vrijednosti silikatnog modula između 2,2 i 2,6 su najpovoljnije, a prihvatljive su i one između 1,9 i 2,7.

Aluminatni modul (AM) predstavlja omjer aluminijskog i željezovog oksida te je odlučujući za fazu taline u klinkeru.

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

Prihvatljive vrijednosti kreću se između 1,5 i 2,5.

Stupanj zasićenosti vapnom ili vapneni standard (SZ) koji pokazuje maksimalan udio kalcijeva oksida koji se sa silicijevim, aluminijskim i željezovim oksidom može kemijski vezati.

$$SZ = \frac{100 \cdot CaO}{2,8 \cdot Fe_2O_3 + 1,18 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3} \quad (4)$$

Potpuna zasićenost vapnom postignuta je kada je sav SiO₂ vezan kao C₃S, sav Fe₂O₃ s ekvivalentnom količinom Al₂O₃ vezan kao C₄AF, a Al₂O₃ koji ostaje u suvišku bude vezan kao C₃A.²

1.5. Hidratacija cementa

1.5.1. Hidratacija C₃S

U kontaktu s vodom započinje proces hidratacije C₃S-a (alita) koja se može opisati jednadžbom:



Proces je egzoterman, a dolazi do oslobađanja kalcijeva hidroksida (CH), poznatog kao portlandit, te se formira slabo kristalinični odnosno za rendgensku difrakciju gotovo amorfni produkt molekulske formule C₃S₂H₄ koji se naziva se C-S-H fazom. Ima velik utjecaj na razvoj mehaničkih svojstava u cementnom vezivu.¹²

1.5.2. Hidratacija C₂S

Hidratacija C₂S-a (belita) opisana je jednadžbom:



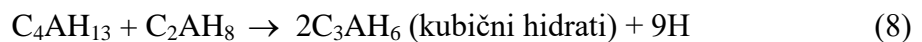
Proces je egzoterman, ali u manjoj u odnosu na hidrataciju C₃S. Produkti su identični onima koji se dobivaju hidratacijom alita, no reakcija belita s vodom odvija se od 10 do 30 puta sporije dok ne postane kontrolirana difuzijom. Uspoređivanjem hidratacija alita i belita može se uočiti da hidratacija alita daje znatno veću količinu CH, dok hidratacija belita rezultira relativno višim udjelom C-S-H produkta. Na temelju toga, može se očekivati da će konačna čvrstoća kompozita na bazi belita biti veća od onih s alitom.¹²

1.5.3. Hidratacija C₃A

Trikalcijev aluminat (C₃A) najaktivniji je mineral klinkera koji u kontaktu s vodom u ukupnom procesu hidratacije cementa ima veliku važnost. Ovaj mineral utječe na svojstvo vezanja cementa, reologiju svježega cementnog kompozita i njegovo rano očvršćivanje. Hidratacija C₃A može se odvijati bez ili uz prisutnosti gipsa ili sulfata, ali u normalnom portland cementu hidratacija se događa uvijek u prisutnosti gipsa.

1) Hidratacija C₃A bez prisutnosti gipsa

Hidratacija čiste faze C₃A i vode u početku je vrlo brz proces nakon kojeg slijedi usporeni period, a prikazuje se ovim jednadžbama:

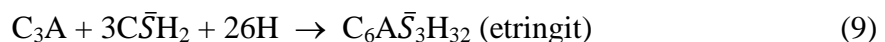


Ovisno o uvjetima reakcije, transformacija heksagonskih u kubične hidrate može se ubrzati dodavanjem nukleacijskih jezgara C₃AH₆ i povećanjem temperature. Ova transformacija također dovodi do povećane poroznosti i narušene mikrostrukture hidratiziranog uzorka, što rezultira smanjenjem njegove čvrstoće.

2) Hidratacija C₃A uz dodatak gipsa

Velika brzina reakcije C₃A i vode nepovoljna je za većinu namjena cementa pa se reakcija nastoji usporiti. Dodatkom gipsa postiže se usporavanje tijekom meljave klinkera pa je hidratacija C₃A uz prisutnost gipsa od velike važnosti.

Proces se prikazuje jednadžbama:

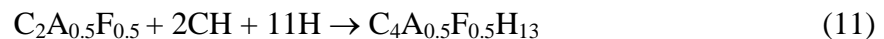


Nakon 10-15 minuta završen je prvi maksimum razvijene topline, koji je rezultat formiranja etringita. Pojava drugog maksimuma ovisi o konverziji etringita u

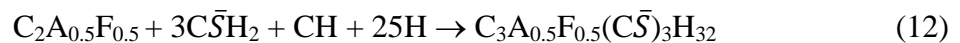
monosulfo-aluminat hidrat (monosulfat) i o količini dostupnog Ca-sulfata. Veća količina dodanog gipsa dovodi do formiranja većih količina etringita, koji također ostaje stabilan duže vrijeme.¹²

1.5.4. Hidratacija C₄AF

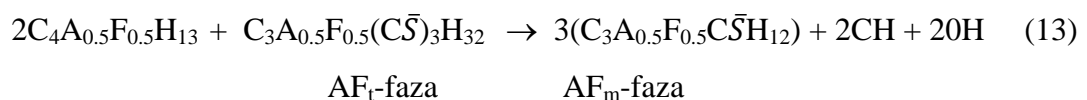
Hidratacija C₄AF analogna je hidrataciji C₃A, ali brzina hidratacije je sporija, a u produktima koji nastaju dio Al(III) je zamijenjen s Fe(III). Ovaj proces podjednako utječe na čvrstoću tijekom svih faza, a njegov utjecaj na brzinu razvoja čvrstoće nije značajan. Kada se C₄AF hidratizira bez gipsa, formira se faza C₃AH₁₃ sa supstituiranim Fe(III) prema jednadžbi:



Hidratacijom feritne faze uz prisutnosti Ca(OH)₂, CH i gipsa prvo nastaje etringitna faza ili AF_t faza prema jednadžbi:



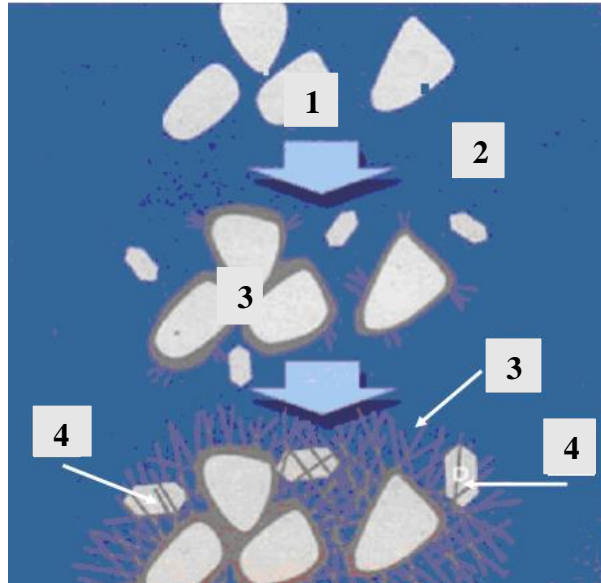
Kada se sav gips utroši, C₄A_{0.5}F_{0.5}H₁₃ reagira s etringitnom fazom AF_t i prelazi u monosulfatni hidrat ili AF_m fazu.¹²



1.5.5. Hidratacija portland cementa

Proces hidratacije složeni je niz kemijskih reakcija različitih brzina koje se međusobno preklapaju i mogu utjecati jedna na drugu. Proces se odvija između komponenti portland cementnog klinkera, vode i kalcijeva sulfata što vodi do vezanja i stvrdnjavanja (slika 5). Miješanjem anhidritnog portland cementa i vode dolazi do ugušćivanja, smanjenja poroznosti, a zatim do konačnog skrućivanja, odnosno prijelaza iz tekućeg sustava u čvrstu viskozno-elastičnu strukturu, sposobnu kratkotrajno izdržati tlačna opterećenja. Očvršćivanje dovodi do konačnog razvoja mehaničkih svojstava. Reakcije

hidratacije odvijaju se ili do iscrpljenja cementne komponente i vode ili slobodnog prostora za nastajanje tj. odlaganje produkata hidratacije, a čime dolazi do zaustavljanja reakcija.^{2,12}



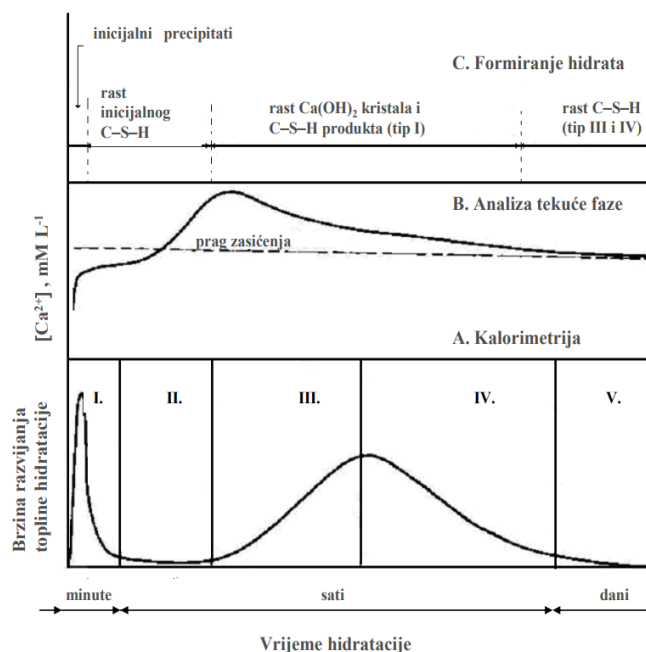
Slika 5. Shematski prikaz procesa hidratacije cementa¹²

Oznake na slici 5: 1 – zrno cementa, 2 – voda, 3 – C-S-H faze, 4 – kalcijev hidroksid (portlandit)

Proces hidratacije odvija se u pet ključnih faza (slika 6) : faza inicijacije, faza indukcije, faza akceleracije, faza usporavanja i faza difuzije.

Prva faza inicijacije ili rane hidratacije započinje odmah kada cement dođe u kontakt s vodom što uzrokuje nagli razvoj topline hidratacije odnosno brzi prijelaz Ca^{2+} iona u otopinu. Reakcije u ovoj fazi vrlo brzo dosegnu maksimalnu brzinu, a nagli razvoj topline pripisuje se brzom reakciji C_3A i gipsa. Reakcijom C_3A i gipsa nastaje etringit koji usporava proces hidratacije C_3A pa brzina naglo pada i započinje faza indukcije. Vremenski ova faza traje najkraće, 15-30 min. **Druga faza je faza indukcije** u trajanju od 1-3 sata u kojoj brzina oslobađanja topline naglo pada i ostaje konstantna zbog nepostojanja kemijske reakcije. U ovoj fazi koncentracija Ca^{2+} iona u otopini polako raste, sve dok se ne dostigne zasićenje kalcijevim hidroksidom ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) što dovodi do početka nukleacije i rasta C-S-H produkta i $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Završetkom nukleacije hidratacijskog produkta završava indukcijska faza i započinje sljedeća faza. **Treća faza, faza akceleracije** obilježena je formiranjem tankih slojeva C-S-H produkta na hidratizirajućim česticama cementa, kao i nekoliko štapićastih AFt produkata.

Istovremeno dolazi do smanjenja koncentracije Ca^{2+} iona u tekućoj fazi, uz oslobađanje velike količine topline. U ovoj fazi se također formiraju tanke pločice $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dok C-S-H uspostavlja vezu između zrna i kostura novo nastalih produkata hidratacije. Trajanje ove faze je od 3 do 12 sati, ovisno o kemijskom sastavu cementa i temperaturi. Zatim se uspostavlja **četvrta faza** ili **faza usporavanja** tijekom koje se smanjuje brzina hidratacije i razvija se mala količina topline. Ova faza može trajati od 4 do 150 sati, a reakcije se odvijaju sporije te su potpuno kontrolirane difuzijom iona i odlaganjem produkata hidratacije u sustav čija je poroznost znatno smanjena. Proces hidratacije portland cementa završava **petom fazom** ili **fazom difuzije** u kojoj sve reakcije su završene, a beton postiže konačnu čvrstoću.^{2,12,14}



Slika 6. Shematski prikaz po fazama hidratacije¹

1.6. Parametri koji utječu na hidrataciju i čvrstoću

Parametri koji utječu na brzinu hidratacije su:

- vrsta cementa,
- temperatura pri kojoj se odvija reakcija,
- prisutnost mineralnih i kemijskih dodataka i
- vodocementni omjer.

Prilagođavanje ovih faktora može utjecati na brzinu, trajanje i kvalitetu procesa hidratacije.¹⁵

1.6.1. Vrsta cementa

Kemijski sastav i finoća cementa utječu na njegov proces hidratacije. Različite brzine hidratacije pojedinih minerala koji se nalaze u sastavu klinkera, kao i ukupna količina razvijene topline hidratacije, utječu na kemijski sastav cementa. Što su čestice cementa finije, to je njegova površina veća i više izložena reakcijama s vodom. Fino mljeveni cement pokazuje tendenciju brže hidratacije, što rezultira bržim početnim oslobađanjem topline.¹⁶

1.6.2. Temperatura odvijanja reakcije

Povećanje temperature ubrzava većinu kemijskih reakcija, no prebrza hidratacija može uzrokovati pojavu unutarnjih napetosti i nastanak pukotina. S druge strane niže temperature usporavaju odvijanje kemijskih reakcija tj. hidratacije čime se produžuje vrijeme očvršćivanja.

1.6.3. Prisutnost mineralnih i kemijskih dodataka

Mineralni dodaci poput letećeg pepela, silikatne prašine (silica fume) ili troske koriste se kako bi se smanjila energija potrebna za pečenje portland cementnog klinkera. Dodaci poput usporivača, ubrzivača, plastifikatora i superplastifikatora spadaju u kemijske dodatke, a kako bi se olakšalo mljevenje ili modificirala svojstva cementa dodaju se u vrlo malim količinama.

1.6.4. Vodocementni omjer

Odnos mase cementa i mase vode u mješavini predstavlja vodocementni omjer. Viši vodocementni omjer može ubrzati početnu hidrataciju, ali u isto vrijeme rezultira većom poroznošću i manjom čvrstoćom betona. U praksi se teži postizanju što nižeg omjera jer je time kvaliteta bolja po gotovo svim svojstvima.

1.7. Čvrstoća cementa

Čvrstoća cementa predstavlja jedan od najznačajnijih podataka prema čijim se vrijednostima cementi razvrstavaju u klase, a mogu se odrediti tri tipa: tlačna, vlačna i savojna čvrstoća. Vremenom cement dobiva na čvrstoći pa se ispitivanja čvrstoće provode u različitim vremenskim intervalima tj. nakon 1, 2, 7 i 28 dana hidratacije. Nakon same pripreme uzoraka za ispitivanje čvrstoće tj. prizmi prvo se provodi određivanje savojne čvrstoće, a potom tlačne čvrstoće.

1.7.1. Određivanje savojne čvrstoće

Savojna čvrstoća predstavlja sposobnost cementnog morta da se odupre lomu tijekom primjene sile tj. opterećenja. Proces se provodi na način da se prvo miješanjem cementa, pijeska i vode bez ili uz dodatka otpadne građevinske opeke dobije cementna smjesa. Cementa smjesa se potom stavlja u kalupe prizmičnih oblika dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm tako što se kalup pričvrsti za vibracijski stol i podesi vrijeme vibriranja. Pripremljeni uzorci stavljaju se na temperaturu 20 ± 2 °C u uređaj relativne vlažnosti najmanje 90 %, najmanje na 20 sati. Nakon određenog vremena hidratacije određuje se savojna čvrstoća u uređaju za određivanja savojne čvrstoće gdje se primjenjuje opterećenje do 10 kN s točnošću $\pm 1,0$ %, brzinom opterećenja do (50 ± 10) N/s. Nakon primjene određene količine opterećenja dolazi do loma prizme na dva dijela koja se potom podvrgavaju određivanju tlačne čvrstoće.

Savojna čvrstoća računa se iz formule:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times I}{b^3} \quad (14)$$

Gdje je:

R_f – savojna čvrstoća [MPa]

F_f – primijenjeno opterećenje na sredinu prizme pri lomu [N]

b – stranica kvadratnog presjeka prizme [mm]

I – udaljenost između nosača [mm]

1.7.2. Određivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća predstavlja naprezanje pri lomu, sposobnost cementnog morta da izdrži opterećenje ili silu čija je tendencija da stisne ili zgnječi materijal. Tijekom određivanja savojne čvrstoće dolazi do loma prizme na dva dijela koji se potom podvrgavaju određivanju tlačne čvrstoće. Svaka polovica postavlja se između dvije ploče izrađene od volfram karbida i čelika s minimalnom Vickersovom tvrdoćom HV 600, minimalne debljine 10 mm, dužine i širine $40 \pm 0,1$ mm tako da površina jedne strane iznosi 1600 mm^2 . Ploče su postavljene centrično te se s prizmom postavljaju u prešu. Uređaj za provođenje tlačne čvrstoće mora osigurati brzinu povećanja opterećenja od $(2400 \pm 200) \text{ N/s}$ te se pritisak povećava sve do loma.

Tlačna čvrstoća računa se iz formule:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (15)$$

Gdje je:

R_c – tlačna čvrstoća [MPa]

F_c – maksimalno opterećenje pri lomu [N]

1600 – površina ploča (40 mm x 40 mm) [mm^2]

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Materijali

2.1.1. Portland cement

Portland cement, CEM I 42,5 R, komercijalni je proizvod cementare „Cemex Croatia“ iz Kaštel Sućurca, Hrvatska. Prednosti ovog portland cementa su vrlo visoka rana i konačna čvrstoća, kratak period početka vezivanja, optimalna obradivost i značajan razvoj topline hidratacije. Svojstva i sastav te zahtijevane norme prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Tipična svojstva, sastav i njihova zastupljenost prema normi¹⁷

| Tipična svojstva | | Zahtjev norme |
|----------------------|--------------|-----------------|
| Vrijeme vezivanja | 200 ± 25 min | ≥ 60 |
| Gubitak žarenjem | < 3,5 % | ≤ 5,0 |
| Neotopiv ostatak | < 0,3 % | ≤ 5,0 |
| Kloridi | 0,01 % | ≤ 0,10 |
| % SO ₃ | 3,2 ± 0,4 % | ≤ 4,0 |
| Rana čvrstoća | 29 MPa | ≥ 20 |
| Normirana čvrstoća | 56 MPa | ≥ 42,5 ; ≤ 62,5 |
| Postojanost volumena | 1 mm | ≤ 10 |
| | | |
| Tipičan sastav | | Zahtjev norme |
| Klinker (K) | 95-100 % | 95-100 |
| Sporedni sastojci | 0-5 % | 0-5 |

2.1.2. Pijesak

Standardni CEN pijesak EN 196-1 prikazan na slici 7, prirodni je pijesak koji se sastoji od zaobljenih čestica i ima sadržaj silicija od najmanje 98 %. Sadržaj vlage mora biti manji od 0,2 % postignut sušenjem pri 105 °C do 110 °C do konstantne mase. Standardni CEN pijesak pakira se u vreće sa sadržajem (1350 ± 5) g čija vrsta materijala

ne smije utjecati na rezultate ispitivanja čvrstoće. Sadržaj svake vreće mora biti u skladu s specifičnom raspodjelom veličine zrna prikazanom u tablici 4.¹⁸

Tablica 4. Raspodjela veličine čestica CEN referentnog pijeska¹⁸

| Veličina mreže (mm) | 2,00 | 1,60 | 1,00 | 0,50 | 0,16 | 0,08 |
|---------------------------------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Kumulativan ostatak na situ (%) | 0 | 7 ± 5 | 33 ± 5 | 67 ± 5 | 87 ± 5 | 99 ± 1 |



Slika 7. CEN Standardni pijesak

2.1.3. Voda

Destilirana voda bez prisustva iona, elemenata u tragovima i nečistoća koje su prisutne u izvorskoj ili vodi iz vodovoda tj. otopljenih plinova i otopljenih ili suspendiranih čvrstih tvari.

2.1.4. Otpadna građevinska opeka

Otpadna građevinska opeka (slika 8.) je izlomljena i samljevena u tarioniku i mlinu, a potom prosijana kroz standardno sito od 125 µm. U tablici 5 prikazan je kemijski sastav.

Tablica 5. Kemijski sastav otpadne građevinske opeke¹⁹

| Sastojak | Udjel sastojaka, mas. % |
|--------------------------------|-------------------------|
| MgO | 2,99 |
| K ₂ O | 3,03 |
| Fe ₂ O ₃ | 6,18 |
| CaO | 6,60 |
| Al ₂ O ₃ | 15,36 |
| SiO ₂ | 63,42 |



a)

b)

c)

Slika 8. Otpadna građevinska opeka (a), izlomljena (b), samljevena i prosijana (c) građevinska opeka

2.2. Priprema morta

2.2.1. Sastav morta

Uzorci pripremani za proces hidratacije, a potom za određivanje čvrstoća sastoje se od cementa, CEN standardnog pijeska, vode i bez ili uz dodatak otpadne građevinske opeke. Svaka serija od tri ispitna uzorka bez otpadne opeke mora se sastojati od (450 ± 2) g cementa, (1350 ± 5) g pijeska, (225 ± 1) g vode. Ukoliko se koristi i otpadna opeka, 20% od ukupnih (450 ± 2) g cementa ide opeke, a preostali dio je cement. Točnije (360 ± 2) g cementa i (90 ± 2) g otpadne opeke.

2.2.2. Miješanje morta

Pomoću vage potrebno je izvagati točno propisane mase cementa, otpadne opeke i vode. Prije samog miješanja koje se odvija u miješalici potrebno je u posebnoj čaši pomiješati cement i otpadnu opeku, ukoliko se koristi. Postupak miješanja odvija se u miješalici na način da se u zdjelu prvo doda cement (smjesa cement/opeka) i voda, pazeći da se izbjegne gubitak vode ili cementa. Odmah kada cement (smjesa cement/opeka) i voda dođu u kontakt treba pokrenuti miješalicu na maloj brzini. Nakon 30 s miješanja, tijekom slijedećih 30 s postepeno se dodaje pijesak, a potom dodatnih 30 s nastavi se s miješanjem na većoj brzini. Zaustavi se miješalica, gumenom ili plastičnom strugalicom ukloni mort koji se zalijepio za stjenku, vrati se u sredinu zdjele i nastavi s miješanje velikom brzinom 60 s.

2.2.2.1. Miješalica

Miješalica (slika 9.) korištena za pripremu morta sastoji se od dva dijela. Prvi dio je posuda od nehrđajućeg čelika kapaciteta od 5 litara (200 mm x 180 mm), a drugi dio je oštrica od nehrđajućeg čelika, koja se okreće oko vlastite osi kontroliranim brzinama pomoću električnog motora. Razmak između oštrice i zdjele je vrlo bitan i potrebno ga je redovito provjeravati. Razmak od (3 ± 1) mm odnosi se na situaciju kada su oštrica i prazna zdjela približene što je više moguće. Brzine kojima miješalica mora raditi navedene su u tablici 6.

Tablica 6. Brzine oštrice miješalice

| | Rotacija, min^{-1} | Planetarno kretanje, min^{-1} |
|---------------|-----------------------------|--|
| Mala brzina | 140 ± 5 | 62 ± 5 |
| Velika brzina | 285 ± 10 | 125 ± 10 |



Slika 9. Miješalica za mort MATEST, Italija

2.3. Priprema ispitnih uzoraka

Ispitni uzorci moraju biti dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm te u obliku prizme. Odmah nakon pripreme morta slijedi proces kalupljenja pomoću kalupa čvrsto pričvršćenog za pokretni stol. Prvi sloj morta (slika 10.,a) nanosi se direktno iz posude za miješanje te ravnomjerno raširi pomoću razmazivača, a zatim se zbijе prvi sloj morta (slika 10.,b) koristeći prvih 60 udaraca sprave za trzanje. Odmah nakon nanosi se drugi sloj morta, pazeći da ima viška, poravna se i zbijе s idućih 60 udaraca. Podigne se kalup, ukloni spremnik te odmah potom metalnim ravnalom ukloni i višak morta dok se površina ne zagladi.



a)

b)

Slika 10. Prvi sloj direktno nanesen iz posude (a), prizme nakon prvog zbijanja (b)

2.3.1. Kalupi

Kalupi (slika 11.) se sastoje od tri horizontalna odjeljka tako da se istovremenu dobiju tri prizme istih dimenzija. Izrađen je od čelika sa stjenkama debljine 10 mm, a svaka unutarnja strana je kaljena na Vickersovu tvrdoću od najmanje HV 200. Uklanjanje kalupljenih uzoraka mora biti moguće bez oštećenja, a kada je kalup postavljen mora biti siguran i pravilno pričvršćen za osnovnu ploču koja u kontaktu sa stolom ne smije uzrokovati sekundarne vibracije.



a)



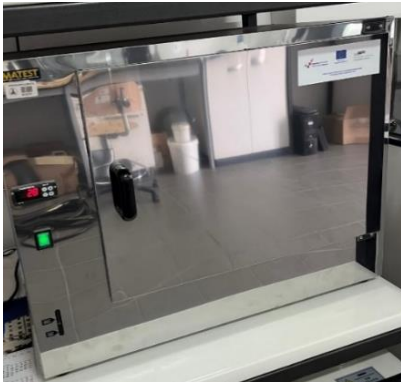
b)

Slika 11. Potresni stol firme MATEST, Italija (a), kalup za prizmice (b)

2.4. Vađenje i stvrdnjavanje

Prije samog vađenja uzoraka, kalupi s dobivenim uzorcima se odlažu u uređaj s vlažnim zrakom tako da vlažan zrak ima pristup svim stranama kalupa (slika 12.,a). Uređaj mora biti postavljen i održavan na temperaturi $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ i relativne vlažnosti zraka ne manjoj od 90 %. Potom uzorci iz kalupa se vade koristeći plastične ili gumene čekiće, pazeći da se uzorci ne oštete te odnose na stvrdnjavanje u vodu (slika 12.,b). Uzorci se urone u vodu na $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ u posudama. Uzorci trebaju biti postavljeni vodoravno ili okomito na rešetke te držati ih razdvojene jedne od drugih tako da voda ima slobodan pristup svim stranama uzorka. Za punjenje uređaja vodom koristi se voda iz slavine i povremeno dolijeva kako bi se održala konstantna razina vode. Nakon

određene starosti uzoraka (1, 2, 7 i 28 dana) uzorci se uklanjaju iz vode najviše 15 min prije izvođenja ispitivanja čvrstoće.



a)



b)

Slika 12. MATEST vlažna komora za njegovanje uzoraka, Italija (a), MATEST termostat, Italija (b)

2.5. Testiranje čvrstoće

2.5.1. Savojna čvrstoća

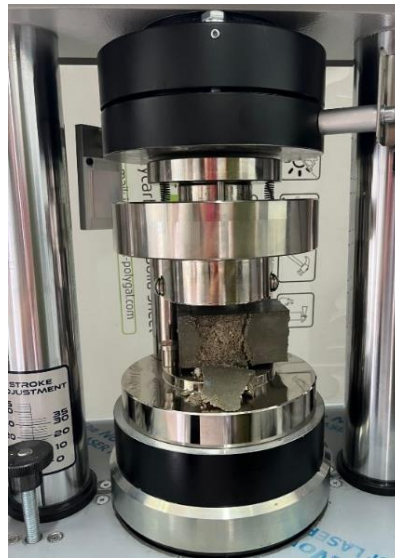
Savojna čvrstoća prizme ispituje se u uređaju za ispitivanje savojne čvrstoće prikazanom na slici 13. Prizma se postavi jednom bočnom stranom na potporne valjke tako da je njezina uzdužna os okomita na oslonce. Opterećenje se nanosi okomito pomoću valjka za opterećenje na suprotnu bočnu stranu prizme te se polako povećava brzinom od (50 ± 10) N/s do samog loma prizme.



Slika 13. MATEST preša za određivanje savojne čvrstoće

2.5.2. Tlačna čvrstoća

Svaka polovica prizme dobivena nakon ispitivanja savojne čvrstoće sada ide na određivanje tlačne čvrstoće. Svaka polovica prizme ispituje se opterećivanjem njezinih bočnih strana pomoću uređaja za ispitivanje tlačne čvrstoće na slici 14. Polovica prizme se centrirana bočno prema pločama stroja unutar $\pm 0,5$ mm, a uzdužno tako da krajnja površina prizme visi na pločom za oko 10 mm. Polako se nanosi opterećenje brzinom od (2400 ± 200) N/s dok ne dođe do samog loma.



Slika 14. MATEST preša za određivanje tlačne čvrstoće

3. REZULTATI I RASPRAVA

Mjerenja savojne i tlačne čvrstoće mortova bez i uz dodatak otpadne građevinske opeke izvršena su nakon 1, 2, 7 i 28 dana hidratacije, a dobiveni rezultati prikazani u tablicama 7 i 8 te slikama 15, 16, 17 i 18.

Tablica 7. Savojne čvrstoće cementnih mortova bez i s dodatkom otpadne građevinske opeke

| Savojna čvrstoća, MPa | | | |
|---------------------------|--------|-------------|------------|
| | | Bez dodatka | Uz dodatak |
| Vrijeme hidratacije, dani | 1 dan | 1,428 | 1,130 |
| | 2 dan | 2,044 | 1,098 |
| | 7 dan | 2,784 | 2,431 |
| | 28 dan | 3,168 | 2,771 |

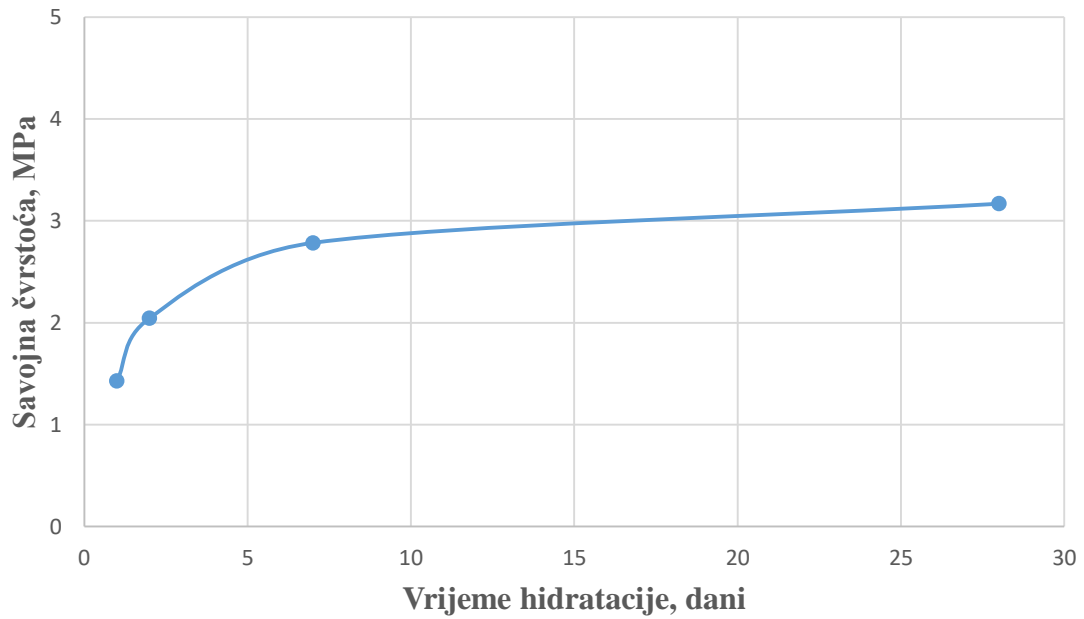
Tablica 8. Tlačne čvrstoće cementnih mortova bez i s dodatkom otpadne građevinske opeke

| Tlačna čvrstoća, MPa | | | |
|---------------------------|--------|-------------|------------|
| | | Bez dodatka | Uz dodatak |
| Vrijeme hidratacije, dani | 1 dan | 23,679 | 17,766 |
| | 2 dan | 32,625 | 17,680 |
| | 7 dan | 44,944 | 37,108 |
| | 28 dan | 62,659 | 48,469 |

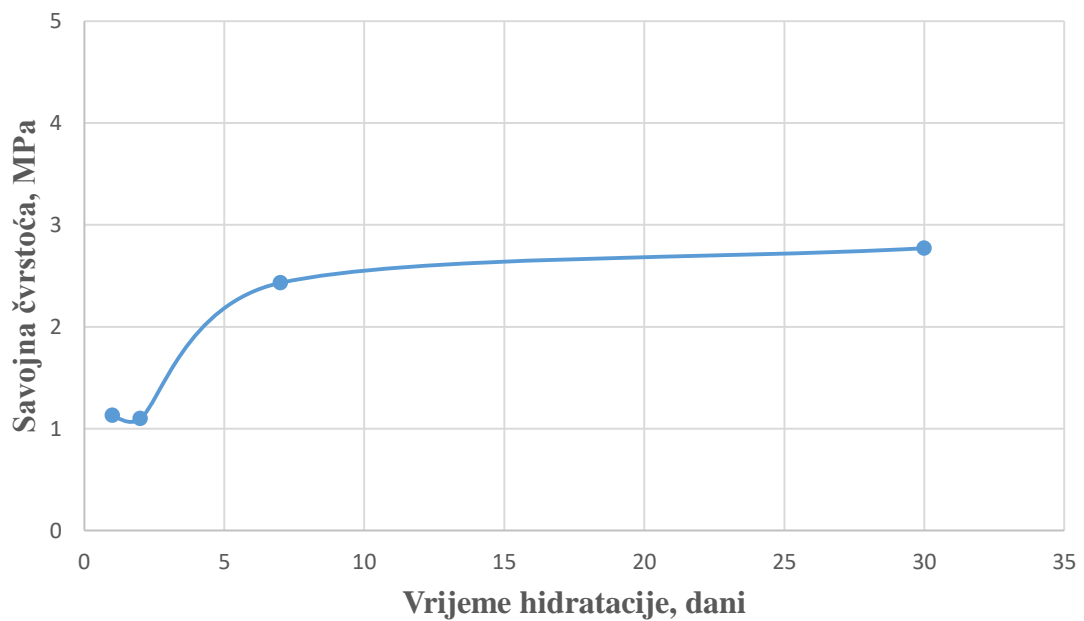
Hidratacijom smjese cementa, vode i bez ili uz dodatak otpadne građevinske opeke dobije se cementna pasta koja nakon određenog vremena njegovanja u vodi prelazi u čvrstu tvar sličnu kamenu čiju čvrstoću je potrebno ispitati.

Ispitivanja čvrstoće provedena su nakon 1, 2, 7 i 28 dana njegovanja u vodi te se na taj način dobilo maksimalno opterećenje koje je primijenjeno na uzorak kako bi došlo do njegovog loma te maksimalna količina otpadne građevinske opeke koja se može dodati portland cementu, a da zadovoljava propisanu čvrstoću u normi HRN EN 196-1.

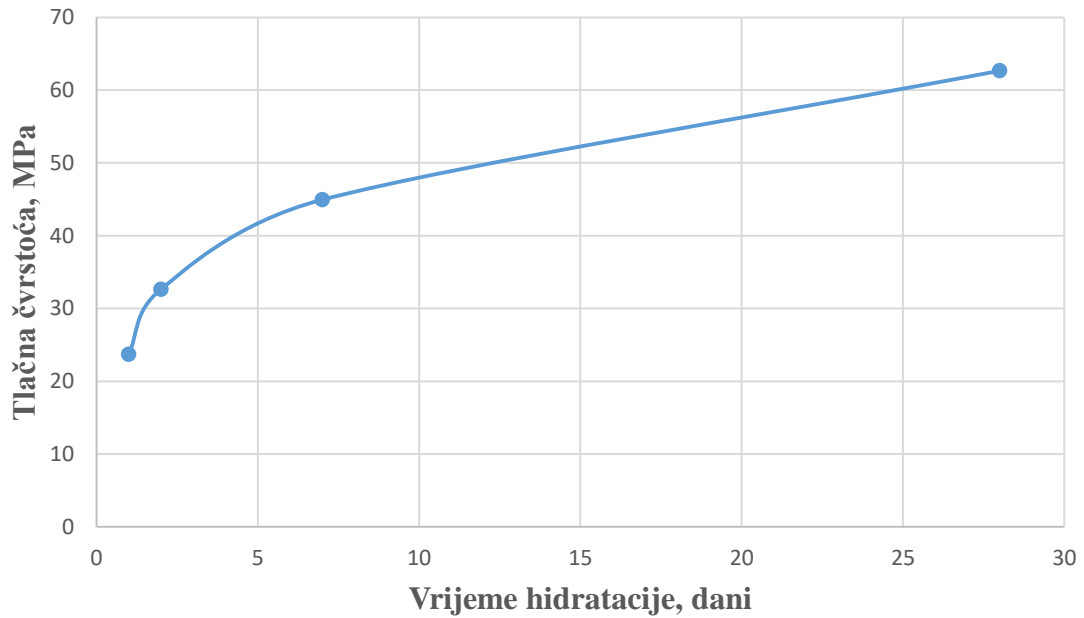
Prvo se mjeri savojna čvrstoća čiji su rezultati prikazani u tablici 7 te na slikama 15 i 16., s potom tlačna čvrstoća čiji su rezultati prikazani u tablici 8 te na slikama 17 i 18.



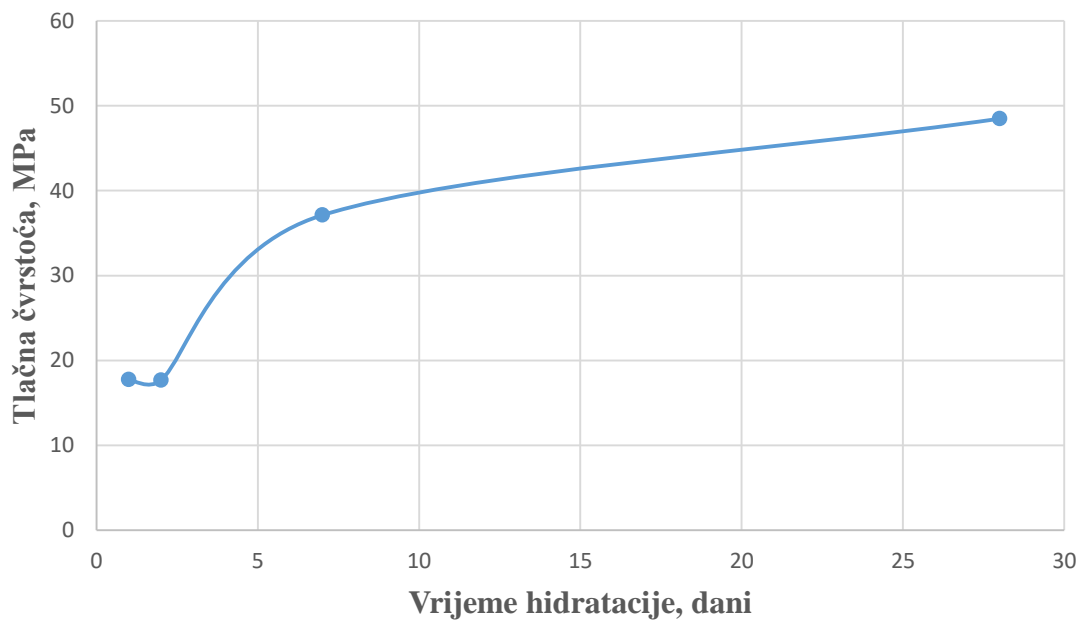
Slika 15. Ovisnost savojne čvrstoće o vremenu hidratacije za cementni mort bez dodatka otpadne građevinske opeke



Slika 16. Ovisnost savojne čvrstoće o vremenu hidratacije za cementni mort uz dodatak otpadne građevinske opeke



Slika 17. Ovisnost tlačne čvrstoće o vremenu hidratacije za cementni mort bez dodatka otpadne građevinske opeke



Slika 18. Ovisnost tlačne čvrstoće o vremenu hidratacije za cementni mort uz dodatak otpadne građevinske opeke

Prema hrvatskoj normi HRN EN 196-1, rana čvrstoća za CEM I nakon 2 dana trebala bi biti ≥ 20 MPa, dok bi normirana čvrstoća nakon 28 dana njegovanja trebala iznositi $\geq 42,5$ MPa. Utjecaj otpadne građevinske opeke na čvrstoću cementnog morta očituje se u rezultatima, budući da je dio aktivne komponente (portland cement) zamijenjen otpadnim materijalom. Mjerenja čvrstoće mortova s dodatkom otpadne građevinske opeke pokazuju niže vrijednosti tlačnih čvrstoća u usporedbi s referentnim uzorcima bez dodataka. Iako dodatak do 20 mas. % otpadne građevinske opeke ne ispunjava uvjet za ranu čvrstoću prema propisanim granicama, zadovoljava uvjet za normiranu čvrstoću.

5. ZAKLJUČCI

Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Dodatak otpadne građevinske opeke u reakcijski sustav cement-voda utječe na čvrstoću cementnog morta nakon određenog vremena hidratacije.
- Iz rezultata mjerenja tlačne čvrstoće mortova s dodatkom otpadne građevinske opeke može se zaključiti da uzorci koji sadrže otpadnu građevinsku opeku pokazuju nižu tlačnu čvrstoću u usporedbi s uzorkom koji ne sadrži dodatak.
- Dodatak 20 mas. % otpadne građevinske opeke ne zadovoljava uvjet rane čvrstoće nakon 2 dana hidratacije čija vrijednost mora biti ≥ 20 MPa, ali zadovoljava uvjet normirane čvrstoće nakon 28 dana hidratacije čija vrijednost mora biti $\geq 42,5$ MPa.

6. POPIS KRATICA I SIMBOLA

U kemiji cementa, radi lakšeg prikaza, često se koriste skraćene oznake za složene mineralne spojeve. U ovom radu su korištene neke od tih skraćenica, a za bolje snalaženje i razumijevanje dostupan je njihov popis.

| | |
|--|--|
| A..... | Al ₂ O ₃ |
| C..... | CaO |
| F..... | Fe ₂ O ₃ |
| H..... | H ₂ O |
| K..... | K ₂ O |
| M..... | MgO |
| \bar{M} | Mn ₂ O ₃ |
| P..... | P ₂ O ₅ |
| S..... | SiO ₂ |
| \bar{S} | SO ₃ |
| T..... | TiO ₂ |
| N+K..... | Na ₂ O+K ₂ O |
| C ₂ S..... | 2CaO·SiO ₂ (dikalcijev silikat) |
| C ₃ S..... | 3CaO·SiO ₂ (trikalcijev silikat) |
| C ₃ A..... | 3CaO·Al ₂ O ₃ (trikalcijev aluminat) |
| C ₄ AF..... | 4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ (tetrakalcijev aluminat ferit) |
| C-S-H..... | kalcijev silikat-hidratna faza |
| CH..... | Ca(OH) ₂ (kalcijev hidroksid) |
| C ₆ A \bar{S} ₃ H ₃₂ | Etringit |
| 3C ₄ A \bar{S} H ₁₂ | Monosulfat |
| C ₃ A _{0.5} F _{0.5} (C \bar{S}) ₃ H ₃₂ | AFt – faza ili aluminat-ferit-trisulfatna faza |
| C ₃ A _{0.5} F _{0.5} C \bar{S} H ₁₂ | AFm – faza ili aluminat-ferit-monosulfatna faza |
| CEM I..... | portland cement bez dodataka |
| R _f | svojna čvrstoća, MPa |
| F _f | primijenjeno opterećenje na sredinu prizme pri lomu, N |
| b..... | stranica kvadratnog presjeka prizme, mm |
| I..... | udaljenost između nosača, mm |

R_c tlačna čvrstoća, MPa
 F_c maksimalno opterećenje pri lomu, N
 V/C Omjer voda – cement
 ΔH promjena entalpije, J/g

7. LITERATURA

1. P. Krolo, Tehnologija veziva i kompozitnih materijala, KTF, Split, 1999.
2. A. Đureković, Cement, cementni kompoziti i dodaci za beton, IGH i Školska knjiga, Zagreb, 1996.
3. URL: <https://sedamsvetskih cudastarogveka.wordpress.com/2016/05/12/velike-piramide-u-gizi/> (3.8.2024.)
4. URL: <https://www.britannica.com/place/Campus-Martius> (3.8.2024.)
5. URL: <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material/History-of-cement> (5.7.2024.)
6. URL: <https://www.worldcementassociation.org/about-cement/our-history> (5.7.2024.)
7. D. Vrkljan, M. Klanfar, Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, Rudarsko-geološko naftni fakultet, Zagreb, 2010.
8. URL: <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material/Extraction-and-processing> (4.8.2025.)
9. URL: <https://gradjevinac.blogspot.com/2012/12/materijali-cement.html> (4.8.2024.)
10. URL: <https://house.decorexpro.com/hr/cement/iz-chego-delayut/> (4.8.2024.)
11. URL: <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material/The-major-cements-composition-and-properties> (11.7.2024)
12. J. Zelić, Z. Osmanović, Čvrstoća i trajnost cementnih kompozita, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2014.
13. URL: <https://www.understanding-cement.com/clinker.html> (11.7.2024)
14. E. M. Gartner, J. F. Young, D. A. Darnidot, I. Jawed, Structure and performance of cements 2, Taylor & Francis, London, 2002.
15. URL: <https://www.jkcement.com/blog/basics-of-cement/what-is-cement-hydration/> (13.7.2024.)
16. D. P. Bentz, E. J. Garboczi, C. J. Haecker, O. M. Jensen, Effects of cement particle size distribution on performance properties of portland cement-based materials, Cem. Concr. Res. **29** (1999) 1-17.
17. URL: <https://www.cemex.hr/documents/47380066/47381413/Tehnicka+uputa+CEM+I+42%2C5+R+Sv+Juraj+2023.pdf/46dd2e6f-ba06-c563-32ae-b85bce3babe?&t=1699437430045> (25.7.2024.)
18. URL: <https://standard-sand.com/en/standard-sand-cen-en-196-1-2/> (25.7.2024.)

19. Barbir, D., Dabić, P., Lisica, A., Barbir, D. (2014.) Recycling and reuse of waste building brick in cement composites. In: Šolić, S., Šnajdar Musa, M. (ed.) Conference Proceedings: International Conference on Materials MATRIB. Vela Luka, Croatia: Croatian Society for Materials and tribology, str. 30-39.