

# Utjecaj dodatka otpadnog betona na specifičnu električnu provodnost cementne paste

---

Gobin, Valentino

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:765957>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**UTJECAJ DODATKA OTPADNOG BETONA NA SPECIFIČNU  
ELEKTRIČNU PROVODNOST CEMENTNE PASTE**

**ZAVRŠNI RAD**

**VALENTINO GOBIN**

**Matični broj: 1066**

**Split, srpanj 2020.**



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE**

**SMJER: KEMIJSKO INŽENJERSTVO**

**UTJECAJ DODATKA OTPADNOG BETONA NA SPECIFIČNU  
ELEKTRIČNU PROVODNOST CEMENTNE PASTE**

**ZAVRŠNI RAD**

**VALENTINO GOBIN**

**Matični broj: 1066**

**Split, srpanj 2020.**

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

**THE INFLUENCE OF WASTE CONCRETE ADDITION ON  
SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CEMENT PASTE**

**BACHELOR THESIS**

**VALENTINO GOBIN**

**Parent number: 1066**

**Split, July 2020.**

Sveučilište u Splitu  
Kemijско-tehnološki fakultet u Splitu  
Preddiplomski studij kemijske tehnologije

**Znanstveno područje:** Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:** Kemijско inženjerstvo

**Tema rada** je prihvaćena na 28. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijско-tehnološkog fakulteta dana 25. rujna 2019. godine

**Mentor:** doc. dr. sc. Damir Barbir

**Pomoć pri izradi:**

**UTJECAJ DODATKA OTPADNOG BETONA NA SPECIFIČNU ELEKTRIČNU  
PROVODNOST CEMENTNE PASTE**

Valentino Gobin, 1066

**SAŽETAK:** U ovom radu provedeno je određivanje specifične električne provodnosti cementnih pasti, bez dodatka i uz dodatak 5-30 mas. % otpadnog betona. Mjerenja su provedena u termostatu pri temperaturi od 20 °C i pri vodocementnom,  $V/C = 0,5$  i voda/kruto omjeru  $V/K = 0,5$ . Sve dobivene krivulje ovisnosti specifične električne provodnosti o vremenu hidratacije cementnih pasti imaju sličan grafički oblik s naglašenim vrhom maksimalne provodnosti. Vrijeme početka vezivanja za pojedini tip cementa odgovara vremenu pojave maksimalne specifične provodnosti. Iz rezultata se može zaključiti da dodatak otpadnog betona uzrokuje pad vrijednosti specifične električne provodnosti te su maksimumi pomaknuti prema kasnijim vremenima hidratacije. Također je uočena velika razlika u rezultatima specifične električne provodnosti između uzoraka portland cementa CEM I 42,5 R ULTIMO i TECNOCEM-a.

**Ključne riječi:** Portland cement; otpadni beton; specifična električna provodnost; konduktometar; hidratacija.

**Rad sadrži:** 33 stranice, 12 slika, 4 tablice i 11 literaturnih referenci.

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Sastav povjerenstva za obranu**

1. prof. dr. sc. Pero Dabić - predsjednik
2. dr. sc. Jelena Jakić, znanstveni suradnik - član
3. doc. dr. sc. Damir Barbir – član-mentor

**Datum obrane:** 16. srpnja 2020.

**Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen** u Knjižnici Kemijско-tehnološkog fakulteta Split, Ruđera Boškovića 35.

## BASIC DOCUMENTATION CARD

## BACHELOR THESIS

University of Split  
Faculty of Chemistry and Technology Split  
Undergraduate Study of Chemical Technology

**Scientific area:** Technical Sciences

**Scientific field:** Chemical Engineering

**Thesis subject** was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 28 from 25th September 2019.

**Mentor:** Ph. D. Damir Barbir, assistant prof.

**Technical assistance:**

### THE INFLUENCE OF WASTE CONCRETE ADDITION ON SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CEMENT PASTE

Valentino Gobin, 1066

**TITLE:** In this paper, the determination of the specific electrical conductivity of the cement pastes was carried out without the addition and with addition 5-30 wt.% of waste concrete. The measurements were carried out in a thermostat at 20 °C and at the water/cement ratio,  $W/C=0,5$  and water/solid ratio,  $W/S=0.5$ . All obtained curves of specific electrical conductivity dependence on the hydration time of the cement paste have a similar graphical shape with a pronounced peak of maximum conductivity. The start of binding time for a particular type of cement corresponds to the time of occurrence of maximum specific conductivity. From the results it can be concluded that the addition of waste concrete decreases specific electrical conductivity values. Also, a large difference in specific electrical conductivity results was observed between the Portland cement samples CEM I 42,5 R ULTIMO and TECNOCEM.

**Keywords:** Portland cement; waste concrete; specific electrical conductivity; conductivity meter; hydration.

**Thesis contains:** 33 pages, 12 figures, 4 tables and 11 references.

**Original in:** Croatian

**Defence committe:**

1. Ph.D. Pero Dabić, Full prof. - chair person
2. Ph.D. Jelena Jakić, Scientific associate - member
3. Ph.D. Damir Barbir, Assistant prof. – supervisor

**Defence date:** July 16 2020.

**Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in** Library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Ruđera Boškovića 35.

*Završni rad je izrađen u Zavodu za anorgansku tehnologiju, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom doc. dr. sc. Damira Barbira, u razdoblju od siječnja do veljače 2020. godine.*



*Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Damiru Barbiru na predloženoj temi i stručnoj pomoći tokom mjerenja i pisanja završnog rada.*

*Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom studiranja.*

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

- Pripremiti otpadni beton za eksperimentalni rad (usitniti, samljati, osušiti i prosijati kroz standardno sito 4900 očica/cm<sup>2</sup>).
- Portland cement CEM I 42,5 R trgovačkih naziva ULTIMO i TECNOCEM sušiti pri 105 °C do konstantne mase.
- Pripraviti cementne paste uz dodatak 5-30 mas. % otpadnog betona. Mjerenja provesti u termostatu pri 20 °C i pri vodocementnom,  $V/C = 0,5$  i voda/kruto omjeru,  $V/K = 0,5$ .
- Nakon provedenih mjerenja rezultate obraditi u Microsoft Excelu te nacrtati grafove ovisnosti specifične električne provodnosti o vremenu hidratacije cementnih pasti.
- Na osnovi rezultata zaključiti o utjecaju dodatka otpadnog betona na hidratacijske procese portland cementa CEM I 42,5 R

## SAŽETAK

U ovom radu provedeno je određivanje specifične električne provodnosti cementnih pasti, bez dodatka i uz dodatak 5-30 mas. % otpadnog betona. Mjerenja su provedena u termostatu pri temperaturi od 20 °C i pri vodocementnom,  $V/C = 0,5$  i voda/kruto omjeru  $V/K = 0,5$ . Sve dobivene krivulje ovisnosti specifične električne provodnosti o vremenu hidratacije cementnih pasti imaju sličan grafički oblik s naglašenim vrhom maksimalne provodnosti. Vrijeme početka vezivanja za pojedini tip cementa odgovara vremenu pojave maksimalne specifične provodnosti. Iz rezultata se može zaključiti da dodatak otpadnog betona uzrokuje pad vrijednosti specifične električne provodnosti te su maksimumi pomaknuti prema kasnijim vremenima hidratacije. Također je uočena velika razlika u rezultatima specifične električne provodnosti između uzoraka portland cementa CEM I 42,5 R ULTIMO i TECNOCEM-a.

**Ključne riječi:** Portland cement; otpadni beton; specifična električna provodnost; konduktometar; hidratacija.

## SUMMARY

In this paper, the determination of the specific electrical conductivity of the cement pastes was carried out without the addition and with addition 5-30 wt.% of waste concrete. The measurements were carried out in a thermostat at 20 °C and at the water/cement ratio,  $W/C=0,5$  and water/solid ratio,  $W/S=0,5$ . All obtained curves of specific electrical conductivity dependence on the hydration time of the cement paste have a similar graphical shape with a pronounced peak of maximum conductivity. The start of binding time for a particular type of cement corresponds to the time of occurrence of maximum specific conductivity. From the results it can be concluded that the addition of waste concrete decreases specific electrical conductivity values. Also, a large difference in specific electrical conductivity results was observed between the Portland cement samples CEM I 42,5 R ULTIMO and TECNOCEM.

**Keywords:** Portland cement; waste concrete; specific electrical conductivity; conductivity meter; hydration.

# SADRŽAJ

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>UVOD.....</b>                                                    | <b>1</b>  |
| <b>1. OPĆI DIO .....</b>                                            | <b>2</b>  |
| 1.1. Povijest cementa.....                                          | 2         |
| 1.2. Podjela cementa.....                                           | 3         |
| 1.3. Proizvodnja cementa .....                                      | 4         |
| 1.3.1. Sirovine za proizvodnju cementa .....                        | 4         |
| 1.3.1.1. Vapnena komponenta .....                                   | 4         |
| 1.3.1.2. Glinena komponenta .....                                   | 5         |
| 1.3.1.3. Korekcijski sastojci.....                                  | 5         |
| 1.3.2. Postupak proizvodnje .....                                   | 5         |
| 1.4. Kemijski sastav cementa .....                                  | 8         |
| 1.5. Hidratacija cementa .....                                      | 9         |
| 1.5.1. Reakcije hidratacije pojedinačnih minerala klinkera .....    | 11        |
| 1.5.1.1. Hidratacija $C_3S$ .....                                   | 11        |
| 1.5.1.2. Hidratacija $C_2S$ .....                                   | 11        |
| 1.5.1.3. Hidratacija $C_3A$ .....                                   | 11        |
| 1.5.1.4. Hidratacija $C_4AF$ .....                                  | 12        |
| 1.6. Dodatak otpadnog betona cementu .....                          | 13        |
| 1.7. Električna vodljivost.....                                     | 14        |
| 1.7.1. Specifična električna provodnost cementne paste .....        | 15        |
| 1.7.2. Instrumenti za mjerenje električne provodnosti .....         | 16        |
| <b>2. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>                                 | <b>17</b> |
| 2.1. Cilj rada .....                                                | 17        |
| 2.2. Materijali .....                                               | 17        |
| 2.2.1. Portland Ultimo premium i Tecnocem cement, cem i 42,5 R..... | 17        |
| 2.2.2. Otpadni beton .....                                          | 17        |
| 2.3. Priprema uzorka .....                                          | 18        |
| 2.4. Opis aparature i postupak mjerenja .....                       | 19        |
| 2.5. Određivanje konstante mjerne elektrode konduktometra.....      | 21        |
| <b>3. REZULTATI I RASPRAVA .....</b>                                | <b>22</b> |
| <b>4. ZAKLJUČCI.....</b>                                            | <b>32</b> |
| <b>5. LITERATURA.....</b>                                           | <b>33</b> |

## UVOD

Cement je mineralno vezivo, koje se pretežno primjenjuje u građevinarstvu kao vezivo prirodnih ili umjetnih agregata za proizvodnju betona ili mortova. Naziv cement koristi se za sva veziva s izrazito hidrauličnim svojstvima, što znači da vežu ili stvrdnjavaju u dodiru s vodom, te stvaraju stabilne ili netopljive produkte na zraku ili pod vodom. Proces hidratacije podrazumijeva reakciju između fino usitnjenog cementnog veziva tj. cementa i vode pri čemu nastaju produkti hidratacije s vezivnim svojstvima. Ukoliko se u reakcijski sustav uvode različiti dodaci, sustav se proširuje i postaje složeniji. Pri mjerenju specifične električne provodnosti cementnih pasta mogu se izvesti zaključci o utjecaju dodatka otpadnog betona na hidratacijske procese portland cementa. Pojava maksimalne vrijednosti specifične električne provodnosti ukazuje ujedno na početak vezivanja cementnog kompozita.

# 1. OPĆI DIO

## 1.1. Povijest cementa

Materijal sličan cementu je nastao prije 12 milijuna godina, dok je zemlja prolazila kroz razdoblje intenzivnih geoloških promjena kojeg su ljudi prvotno koristili, a s vremenom su spoznali kako dobiti cement iz drugih materijala. 3000.g. p. n. e. Egipćani su koristili blato pomiješano sa slamom što im je omogućilo vezanje osušenih cigli, dok su pri izgradnji piramida (slika 1) koristili žbuku od gipsa i vapna. Kinezi su koristili cementni materijal za izgradnju Kineskog zida (slika 2)



**Slika 1.** Egipatske piramide



**Slika 2.** Kineski zid

Grci su 800.g. p.n.e. koristili žbuku od vapna koja je bila puno čvršća od kasnije rimske žbuke. Uz Grke, Rimljani su 300.g. p. n. e. koristili puzzolanski cement Pozzuolija, pokraj Vezuva, za izgradnju Apijske ceste, rimskih toplica, rimskog koloseuma (slika 3) i Panteona te akvadukta Pont du Gard u južnoj francuskoj. Unatoč tome što nisu imali saznanja o tehnologiji kakvu danas posjeduju stručnjaci, građevine su napravljene kvalitetno što pokazuje njihovo postojanje sve do danas.<sup>1</sup>



**Slika 3.** Rimski koloseum

1824. godine u Engleskoj, Joseph Aspdin je dobio sinterirani proizvod pečenjem fino mljevene krede s glinom u prahu u peći za vapno pri temperaturi ispod 1250 °C, sve do odstranjivanja ugljikova dioksida. Dobiveni proizvod je nakon mljevanja nazvao Portland cement po visokokvalitetnom kamenu iz Portlanda.

1845. godine Isaac Johnson tvrdio je da je sirovine portland cementa, za razliku od Aspdina uspio spaliti na mnogo višim temperaturama, slično onima koje se koriste danas (1400-1500 °C) te tako dobio prvi moderni portland cement.

## **1.2. Podjela cementa**

Prema svojem mineralnom sastavu cementi se dijele u dvije grupe:

- silikatni cementi,
- aluminatni cementi.

Glavni minerali klinkera u silikatnim cementima su silikati, a prema sastavu cementi se mogu podijeliti na podgrupe:

- čisti portland cement,
- portland cement s dodacima,
- pucolanski cement,
- metalurški cement,
- miješani cement,
- bijeli cement.

Glavni minerali klinkera u aluminatnim cementima su kalcijevi aluminati.

Prema namjeni cementi se dijele na cemente opće namjene među koje spada većina silikatnih cemenata i na cemente posebne namjene ili specijalne cemente gdje spadaju:

- cement niske topline hidratacije,
- sulfatno otporni cement,
- bijeli cement,
- aluminatni cement.



Prema aktualnoj europskoj regulativi ENV 197-1 <sup>2</sup>, vrste cementa se određuju na način na koji bi se omogućilo lakše uključivanje svih članica CEN-a (franc. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, Belgija). Prema ovoj regulativi određeni su cementi opće namjene koji su podijeljeni u pet glavnih vrsta:

- CEM I - portland cement,
- CEM II - kompozitni portland cement,
- CEM III - metalurški cement,
- CEM IV - pucolanski cement,
- CEM V - kompozitni cement.

### **1.3. Proizvodnja cementa**

#### **1.3.1. Sirovine za proizvodnju cementa**

Kao sirovine koje se upotrebljavaju pri proizvodnji cementnog klinkera mogu poslužiti prirodni minerali i industrijski produkti. Sirovine moraju sadržavati glavne kemijske komponente cementa tj. kalcijev oksid, silicijev dioksid, komponentu s aluminijevim oksidom te željezov oksid. Takav sastav sirovine se vrlo teško nalazi u željenom omjeru te je zbog toga potrebno proračunati smjesu koja će se sastojati od dvije komponente, u kojoj je jedna bogata vapnom (vapnena komponenta), a druga silicijevim dioksidom, glinom i željeznim oksidom (glinena komponenta).<sup>3</sup>

##### **1.3.1.1. Vapnena komponenta**

Za vapnenu komponentu se koriste kreda, lapor ili vapnenac.

Kemijski sastav vapnenca je  $\text{CaCO}_3$  i u prirodi je veoma rasprostranjen. Postoje tri kemijski čista oblika vapnenca a to su kalcit, aragonit i vaterit.

Kalcit kristalizira romboedarski te njegova gustoća varira u rasponu od 2,6 do 2,8 kao i tvrdoća po Mossovoj ljestvici koja može iznositi od 1,8 do 3,0. Kalcit nerijetko sadrži primjese kao što su glina i željezni oksid, što uzrokuje promjenu njegove bijele boje.

Aragonit kristalizira rompski i ima gustoću 2,95, dok vaterit kristalizira heksagonski.

Kreda je sedimentna stijena koja je znatno mekša od kalcita što je čini povoljnijom sirovinom za mokri postupak proizvodnje. Sadrži između 98 i 99 mas. %  $\text{CaCO}_3$  uz male primjese  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgCO}_3$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Lapor predstavlja prijelaz od vapnenca prema glinama, što znači da su u njegovom sastavu primjese glinene komponente mnogo zastupljenije nego kod krede i vapnenca.

#### 1.3.1.2. Glinena komponenta

Gline su proizvodi meteoroloških promjena silikatnih materijala na zemljinoj kori. Tu se mogu svrstati alkalijski alumo-silikati, feldspati i tinjci.

Gline se pretežno sastoje od alumo-silikata koje imaju ugrađene  $\text{OH}^-$  skupine i molekule vode opće formule  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Mogu se podijeliti u nekoliko mineraloških skupina:

- kaolinska (kaolinit, dikit, nakrit, halozit),
- montmorilonitsku (montmorilonit, bajdelit, nontronit i saponit),
- gline koje sadrže alkalije i
- mineraloška skupina glinastih tinjaca, uključujući i ilit.

Glinena komponenta u sirovini za dobivanje cementnog klinkera predstavlja glavni izvor  $\text{SiO}_2$  kao i pratećih sporednih komponenata od čega su najznačajnije alkalije.

#### 1.3.1.3. Korekcijski sastojci

Ukoliko se ustanovi da u sirovinskoj smjesi za dobivanje cementnog klinkera postoji neprisustvo nekog sastojka u dovoljnoj količini, tada se u sirovinsku smjesu dodaju tzv. korekcijski sastojci. Korekcijski sastojak pretežno sadrži tvari koje nedostaju u sirovinskoj smjesi. Željezna ruda ili piritna troska se upotrebljavaju pri nedostatku željezova oksida, dok se pri nedostatku silicijeva oksida kao korekcijski sastojak upotrebljava kvarcni pijesak, glina s visokim sadržajem  $\text{SiO}_2$  i slični materijali.

### 1.3.2. Postupak proizvodnje

Postupak proizvodnje cementa (slika 4) sastoji se od sljedećih faza:

- eksploatacija mineralnih sirovina,

- priprema mineralnih sirovina za proizvodnju klinkera,
- miješanje mineralnih sirovina i proizvodnja klinkera i
- mljevenje klinkera i dodavanje aditiva te pakiranje cementa.

Najčešće eksploatirane sirovine su vapnenac i lapor. Njihovim bušenjem, miniranjem ili strojnim iskopom dobiva se materijal različitih dimenzija koje mogu varirati od nekoliko milimetara do više od jednog i pol metra, čiji kemijski sastav često nije ujednačen.<sup>4</sup>

Kamenolomi su najčešće povezani s pogonom u kojima se nalaze i drobilice. Drobilice koje se koriste u pogonu određuju potreban granulometrijski sastav sirovine, te je tipični zahtjev da zrna sirovine budu u rasponu od 30 do 150 mm.

Neizostavan dio procesa je homogenizacija mineralne sirovine čime se postiže ujednačen kemijski sastav. Uzimanjem uzoraka, te kemijskom analizom iz minskih bušotina se dobivaju podaci o raspodjeli kemijskog sastava stijene. Ukoliko rezultati kemijske analize ukazuju na to da uzorak ima povoljan raspored kemijskog sastava, odminirana sirovina se može homogenizirati već kod utovara i transporta. Ako kemijska analiza ne daje zadovoljavajuće rezultate sirovina se mora homogenizirati na deponijama prilikom čega se sirovina deponira vertikalno u slojevima, a eksploatira horizontalno presijecajući slojeve. Nakon homogenizacije i granulometrijske obrade sirovine dobiva se ulazna sirovina za proizvodnju cementnog klinkera.

Nastavak procesa se odvija u uređaju za mljevenje gdje se potrebni sastojci melju na veličinu zrna koja je najčešće ispod 90  $\mu\text{m}$ , te se doziraju i miješaju dok se ne dobije mješavina zadovoljavajućeg sastava. Uvođenjem mješavine u rotacijsku peć pri temperaturama 1400-1500 °C nastaje cementni klinker. Rotacijska peć (slika 5) sastoji se od čeličnog cilindra promjera nekoliko metara i dužine od 50 do 200 metara, koji je iznutra obložen vatrostalnim opekama. Rotacijska peć mora biti blago nagnuta u jednu stranu na čijoj se donjoj strani nalazi plamenik, a na gornjoj ulazi sirovina. Rotacija peći oko njene uzdužne osi uzokuje postupno gibanje sirovine prema plameniku, te se nakon obrade ispušta i hladi na dnu. U rotacijskoj peći se provodi niz reakcija poput kalcinacije, sinteriranja, raspadanja postojećih minerala i formiranja novih, čiji su produkt granule klinkera, tamno smeđe boje i veličine 1-25 mm. Da bi dobili cement dobiveni klinker je potrebno samljeti na određene dimenzije pri čemu se istovremeno dodaje gips, uz eventualno dodavanje drugih dodataka ovisno o karakteristikama željenog cementa.



## 1.4. Kemijski sastav cementa

Glavni kemijski sastojci portland cementa su oksidi (Tablica 1), u kojoj najzastupljeniji CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.<sup>4</sup>

**Tablica 1.** Prosječni kemijski sastav portland cementnog klinkera <sup>2</sup>

| SASTOJAK                             | OZNAKA                      | MASENI POSTOTAK, % |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| CaO                                  | <b>C</b>                    | 58-67              |
| SiO <sub>2</sub>                     | <b>S</b>                    | 16-26              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | <b>A</b>                    | 4-8                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | <b>F</b>                    | 2-5                |
| MgO                                  | <b>M</b>                    | 1-5                |
| Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O | <b>N+K</b>                  | 0-1                |
| SO <sub>3</sub>                      | <b><math>\bar{S}</math></b> | 0,1-2,5            |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       |                             | 0-3                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>        |                             | 0-1,5              |
| TiO <sub>2</sub>                     |                             | 0-0,5              |
| Gubitak žarenjem                     |                             | 0-0,5              |

Osnovni minerali klinkera koji nastaju u cementu su nositelji fizikalno kemijskih te vezivnih svojstava konačnog proizvoda. Tipični sastav portland cementa prikazan je u Tablici 2.

**Tablica 2.** Minerološki sastav portland cementa <sup>2</sup>

| NAZIV                      | KEMIJSKA FORMULA                                                    | OZNAKA                     |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Alit                       | 3CaO·SiO <sub>2</sub>                                               | C <sub>3</sub> S           |
| Belit                      | 2CaO·SiO <sub>2</sub>                                               | C <sub>2</sub> S           |
| Trikalcijev aluminat       | 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | C <sub>3</sub> A           |
| Trikalcijev aluminat ferit | 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> AF          |
| Gips                       | CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                | C $\bar{S}$ H <sub>2</sub> |

Alit (tj.  $C_3S$  s onečišćenjima) je najzastupljeniji mineral u portland cementnom klinkeru koji je odgovoran za čvrstoću cementa. U cementnom klinkeru ne postoji čisti  $C_3S$ , već su prisutne dvije modifikacije koje se stabiliziraju ugradnjom stranih iona kao što su Al i Mg. Da bi došlo do njegovog nastanka,  $C_2S$  i  $CaO$  se moraju zagrijati na temperature iznad  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , u protivnom dolazi do raspada  $C_3S$  na  $C_2S$  i  $CaO$ .

Belit je  $\beta$  modifikacija  $C_2S$ -a koja se dobiva pečenjem klinkera pri temperaturi sintriranja iznad  $1420\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Belit ima pet polimorfnih modifikacija. Karakteristika belita je znatno sporija hidratacija od alita, ali su nakon dužeg vremena njihove krajnje čvrstoće podjednake. Belit daje čvrstoću cementu u razdoblju od preko jedne godine.

Trikalcijev aluminat, za razliku od alita i belita nema polimorfnih modifikacija. Karakteristika mu je vrlo brza reakcija s vodom, ali nema izražene hidraulične karakteristike. Koristan je za postizanje ranih čvrstoća cementa.

Trikalcijev aluminat ferit uvijek kristalizira rompski, te neznatno utječe na povećanje čvrstoće cementa. Feritna faza se javlja kao drugi međuprostorni sastojak cementnog klinkera te je nepravilnog oblika. Kako posljednja kristalizira od svih faza, njen oblik određuju ostali već iskristalizirani minerali i faze. Ima ulogu topitelja i korigira loša svojstva alita.

Gips se dodaje u razmjernoj količini trikalcijevih aluminata da bi se u cementu osigurala dovoljna količina sulfata za reakciju  $C_3A$ . Dodatkom gipsa ne samo da se regulira vrijeme vezivanja, već se postiže i formiranje etringita koji tijekom rane faze očvršćavanja cementa ima prostor za nastajanje, bez da pri tom razara strukturu cementnog kamena te time postiže reguliranje skupljanja tijekom sušenja. Prevelike količine gipsa u cementu su nepoželjne iz razloga što je gips lako topiv u reakciji s vodom, što bi kasnije uzrokovalo nastajanje poroznih struktura u betonu.

## **1.5. Hidratacija cementa**

U dodiru cementa s vodom dolazi do reakcija pri kojima cement dobiva svojstva veziva. Taj proces se naziva hidratacija cementa. Hidratacija je vrlo složen fizikalno-kemijski proces, čija je posljedica vezanje, zgušćivanje i skrućivanje cementne smjese u krutu masu nalik kamenu. Reakcije hidratacije se odvijaju sve dok se ne postigne stanje ravnoteže, tj. dok ne ponestane ili reaktanata ili slobodnog prostora za nastajanje

hidratacijskih produkata. Da bi se objasnio mehanizam procesa hidratacije, vezanja i očvršćivanja mineralnih veziva kroz povijest su se javljale različite teorije.

Kristalizacijska teorija <sup>5</sup> - H. Le Chatelier (1887. g.) tvrdio je da se proces hidratacije odvija zbog kristalizacije hidratiziranih produkata iz njihove prezasićene otopine. Čvrstoća i tvrdoća paste se objašnjava kao postojanje adhezijskih sila između kristalića hidratiziranih faza.

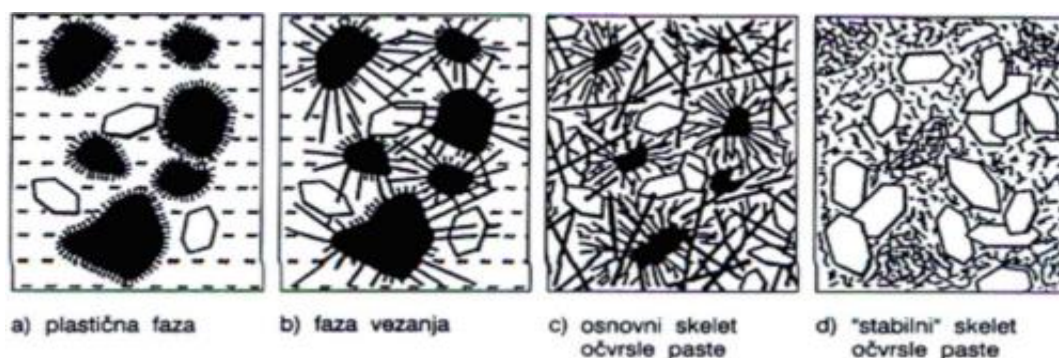
Koloidna teorija – W. Michaelis (1900. g.) tvrdi da u pasti nastaju koloidni hidratacijski produkti kojima se pripisuju sva karakteristična svojstva.

A. Brajkov (1930. g.) objedinjuje obje teorije gdje navodi da se sve tvari koje se nalaze u prezasićenoj otopini mogu tijekom procesa hidratacije pojaviti u koloidnom obliku, a potom prijeći u kristalne faze. U prvoj fazi dolazi do procesa hidrolize i hidratacije, u drugoj do nastanka koloida, a u trećoj do kristalizacije.

Ukoliko čvrsta tvar nastaje u sredini vlastite zasićene otopine, ona se izlučuje u koloidnom stanju i zatim prelazi u oblik gela. S vremenom se količina gela povećava što uzrokuje imobilizaciju tekućine, povećanje viskoznosti sustava, plastičnost sustava opada i dolazi do vezanja sustava. Ovu teoriju koja se sastoji od:

- perioda otapanja u vodi i zasićenja otopine (pripremni period),
- perioda koloidizacije (gelatizacije, stvaranja gela) ili vezanja, i
- perioda kristalizacije ili stvrdnjavanja,

moguće je primjeniti za objašnjavanje otvrdnjavanja svih mineralnih veziva. Solidifikacija, odnosno vezivanje cementa je prijelaz iz fluidnog i plastičnog stanja u kruto, konačno stanje, kao što je prikazano na slici 6.



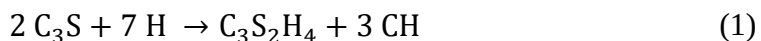
**Slika 6.** Shematski prikaz formiranja strukture očvrse cementne paste <sup>2</sup>

Zbog složenosti procesa hidratacije u sustavu cement-voda, hidratacija cementa se nastoji pojednostavniti kroz hidrataciju osnovnih minerala cementnog klinkera.

### **1.5.1. Reakcije hidratacije pojedinačnih minerala klinkera**

#### **1.5.1.1. Hidratacija $C_3S$**

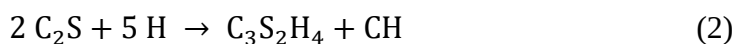
Pri dodiru  $C_3S$  s vodom dolazi do procesa hidratacije, koji se može opisati jednačbom:



Reakcija hidratacije alita je egzoterman proces, u kojem dolazi do oslobađanja kalcijeva hidroksida (CH) te formiranja slabo kristaličnog, gotovo amorfnog produkta. Nastali produkt se u kemiji cementa naziva C-S-H produktom. Odnosi komponenata (C/S i H/S) u nastalom produktu nisu stalni, već ovise o uvjetima pod kojima su nastali i prolaze kroz razne promjene tokom hidratacijskog procesa. U razdoblju između 7 i 28 dana C-S-H produkt je glavni nositelj mehaničkih karakteristika u vezivu, iz razloga što stvara kontinuiranu matricu u cementnim pastama.

#### **1.5.1.2. Hidratacija $C_2S$**

Hidratacija  $C_2S$  se pojednostavljeno može opisati jednačbom:

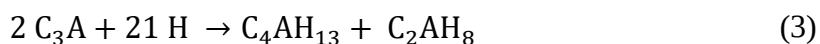


Reakcija je također egzotermna, ali manje u usporedbi s hidratacijom  $C_3S$ . Pri hidrataciji  $C_2S$  nastaju isti produkti kao kod hidratacije  $C_3S$ , samo je reakcija do 30 puta sporija. Usporedbom jednačbi hidratacije alita i belita uočava se da alit daje znatno veću količinu CH, dok produkti hidratacije belita sadrže znatno veći udio bitnijeg C-S-H produkta.

#### **1.5.1.3. Hidratacija $C_3A$**

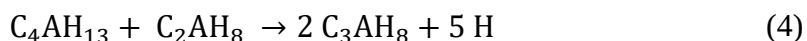
Trikalcijev aluminat je najaktivniji mineral u portland cementu u dodiru s vodom, što znatno utječe na svojstva vezivanja cementa, reologiju svježeg cementnog kompozita i njegovo očvršćivanje u prvih 24 sata.

U čistom portland cementu proces hidratacije  $C_3A$  se odvija uvijek u prisustvu gipsa prema jednačbi:

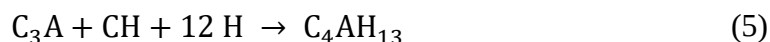




Uslijed burne reakcije povećava se temperatura te dolazi do spontanog prijelaza heksagonskih hidrata, u stabilnije kubične hidrate prema reakciji:

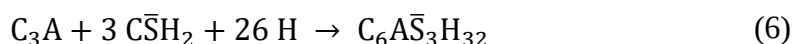


U prisustvu vapna (CH), aluminatna faza reagira s vodom prema sljedećoj jednadžbi:



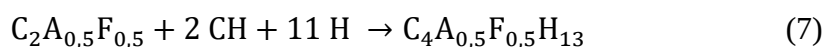
U prisustvu gipsa, uz vapno dolazi do hidratizacije aluminatne faze pri čemu nastaje etringit, koji se taloži na površini hidratiziranih alitnih zrna, te na taj način stvara prepreku brznoj hidrataciji.

Reakcija nastajanja etringita može se prikazati jednadžbom:

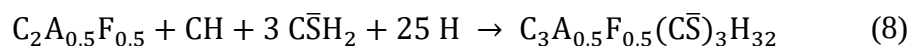


#### 1.5.1.4. Hidratacija $C_4AF$

Hidratacija  $C_4AF$  reagira slično, ali manje burno kao i  $C_3A$ . U prisustvu vapna proces hidratacije se može prikazati jednadžbom:

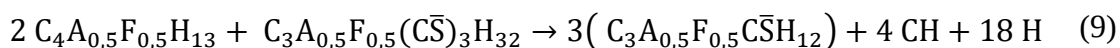


U prisutnosti kalcijeva hidroksida i gipsa, hidratacijom  $C_4AF$  nastaje etringitna faza prema jednadžbi:



Nastala etringitna faza se još naziva  $AF_t$  faza.

Kada u reakciji ponestane gipsa, dolazi do reakcije između  $C_4A_{0,5}F_{0,5}H_{13}$  i  $AF_t$  faze pri čemu nastaje  $AF_m$  faza:



Nastale faze  $AF_t$ ,  $AF_m$  i  $C_4A_{0,5}F_{0,5}H_{13}$  po strukturi sliče aluminatnim fazama te s njima stvaraju čvrste otopine. Feritna faza pridonosi podjednako čvrstoći cementnih kompozita u svim periodima.

## 1.6. Dodatak otpadnog betona cementu

Tijekom proteklih nekoliko desetljeća, razvoj energetske i resursno učinkovite tehnologije i produkata postao je primarni cilj održivog razvoja, u kojem ni građevinska industrija nije iznimka<sup>6</sup>. Građevinska industrija je odgovorna za potrošnju 50 % prirodnih sirovina, 40 % od ukupne uporabe energije i proizvodnju skoro polovice od ukupnog industrijskog otpada širom svijeta. U građevinskoj industriji smatra se da proizvodnja betona ima najznačajniji utjecaj na okoliš, troškove i društvo. Količina betona koja se proizvede i broj betonskih struktura koje se izgrade čini značajan dio globalnog problema održivog razvoja. Beton je najčešće korišten građevinski materijal, te se njegova proizvodnja i uporaba iz godine u godinu neprestano povećava. Razina štetnog utjecaja betona na okoliš u usporedbi s ostalim građevinskim materijalima je relativno mala, međutim, zbog velike proizvodnje betona, ukupni negativni utjecaj betonskih konstrukcija na okoliš je značajan: velika potrošnja prirodnih sirovina (agregati za cement, beton i energiju) i velika količina proizvedenog otpada nastalog građenjem i rušenjem betonskih konstrukcija. Recikliranje predstavlja jedan od načina pretvaranja otpadnog betona u ponovno upotrijebive resurse. Na taj način smanjuje se količina otpadnog betona na odlagalištima otpada, smanjuje se upotreba prirodnih resursa za proizvodnju cementa, kao i potrošnja energije i novca. Stoga, uporaba recikliranog betonskog agregata u novim zgradama mogla bi biti od presudne važnosti za postizanje održive gradnje. Da bi se agregat pripremio, elementi otpadnog betona mehanički se drobe na male dijelove više puta<sup>7</sup>. Nakon mljevenja, čestice različitih veličina se prosijavaju kroz sita različitih dimenzija. Otpad srušenih konstrukcija sadrži razne nečistoće kao što su metali, drvo, plastika, staklo i gips koji imaju štetne učinke te moraju biti uklonjene. Kada se otpadni beton zdrobi, određena količina žbuke i cementne paste ostaje pričvršćena na kamene dijelove u recikliranom agregatu. Zbog pričvršćene žbuke, reciklirani agregati, u usporedbi s normalnim agregatima imaju 10% manju gustoću, veću poroznost i veću apsorpciju vode. Ova svojstva recikliranih agregata također utječu na svojstva betona. Reciklirani betonski agregat najčešće se koristi kao dopuna te baza za izgradnju cesta, ali se i mali dio koristi za izgradnju struktura visoke kvalitete. Iako standardi mnogih zemalja dopuštaju uporabu recikliranog betonskog agregata u izgradnji betonskih konstrukcija, njegov stvarni udio ostaje ograničen na manje od 1 %. Potencijal recikliranja otpadnog betona, u svrhu smanjenja opterećenja okoliša može biti u

potpunosti iskoristiv samo ako reciklirani betonski agregat zamijeni normalni agregat u konstrukcijskom betonu. Na slici 7 prikazan je postupak recikliranja otpadnog betona.



**Slika 7.** Stanja betona tijekom procesa recikliranja: beton nakon rušenja (a), razdvojene jezgrene žice (b), šljunak od betona (c).<sup>6</sup>

### 1.7. Električna vodljivost

Elektroanalitička metoda kojom se mjeri električna vodljivost naziva se konduktometrija<sup>8</sup>. Zasniva se na brzini prijenosa električnog naboja kroz tvar, a uvjetovana je prisustvom slobodnih nositelja električnog naboja. U rekcijskom sustavu cement-voda, nositelji električnog naboja su svi ioni koji se u otopini nalaze, te električna vodljivost ovisi o njihovoj koncentraciji i pokretljivosti pod utjecajem električnog polja. Doprinos pojedine ionske vrste ukupnoj električnoj vodljivosti ovisi o relativnoj koncentraciji i električnoj pokretljivosti dane ionske vrste u otopini. Konduktometrija nije selektivna metoda, te mjerenjem električne vodljivosti pomoću nje može se odrediti samo ukupnu koncentraciju iona u određenoj otopini, što je razlog njenoj ograničenoj primjeni.

Pod utjecajem električnog polja ioni putuju različitim brzinama između elektroda konduktometrijske ćelije. Negativno nabijeni ioni putuju prema pozitivno nabijenoj elektrodi, dok pozitivno nabijeni elektroni putuju prema negativno nabijenoj elektrodi, te takvo usmjereno gibanje elektrona predstavlja električnu struju. Recipročna vrijednost električnog otpora je električna vodljivost otopine, čija je jedinica Siemens (S). Električna vodljivost otopina u ćeliji ovisi o koncentraciji i električnoj pokretljivosti iona, o presjeku stupca otopine između elektroda kroz što se odvija tok električne struje i o razmaku između elektroda ćelije, prema relaciji:

$$G = \kappa \cdot \frac{A}{l} \quad (10)$$

gdje  $\kappa$  - predstavlja električnu provodnost otopine,  $A$  - površinu presjeka otopine kroz koji se odvija tok struje, a  $l$  - udaljenost između elektroda ćelije. Omjer  $A/l$  predstavlja konstantu ćelije koja se određuje eksperimentalnim putem tako da se vrši mjerenje vodljivosti otopine kojoj električna konstanta ima poznatu vrijednost. Upotrebom ćelije za konduktometriju koja ima poznatu konstantu moguće je odrediti električnu provodnost ispitivane otopine mjerenjem vodljivosti, prema relaciji:

$$\kappa = G \cdot C \quad (11)$$

gdje je:

$\kappa$  – električna provodnost,  $S \text{ cm}^{-1}$

$C$  – konstanta konduktometrijske ćelije,  $\text{cm}^{-1}$

$G$  – električna vodljivost,  $S$ .

### 1.7.1. Specifična električna provodnost cementne paste

Specifična električna provodnost cementne paste ovisi o koncentraciji iona koji su prisutni u otopini i njihovoj pokretljivosti dok su pod utjecajem električnog polja određene jakosti. Praćenje električne vodljivosti tokom procesa hidratacije pruža informacije o dinamici sustava i reakcijama koje se odvijaju u periodu stvaranja očvrslje cementne paste. Vrijeme na kojem se uoči maksimum na krivulji odgovara vremenu početka vezivanja. Tijek procesa hidratacije može se podijeliti u nekoliko karakterističnih perioda. U početnom dijelu hidratacije dolazi do brzog otapanja klinkera i gipsa, pri kojem ioni prelaze u otopinu, što za posljedicu ima povišenje specifične električne provodnosti. Nakon nekoliko minuta otopina postaje prezasićena i počinje taloženje C-S-H što usporava hidrataciju.

Drugi karakterističan period je period mirovanja, u kojem su reakcije sporije i otopina se obogaćuje kalcijevim ionima. U prisutnosti gipsa može doći do prezasićenja kalcijevim ionima u otopini zbog čega se počne taložiti, što uzrokuje malo smanjenje provodnosti nakon postizanja maksimuma. Nastavkom procesa hidratacije dolazi se do perioda akceleracije gdje se povećava toplina hidratacije, a provodnost pada. Gips se troši uslijed

stvrđnjavanja, pri čemu zbog povećane topline hidratacije reakcije postaju sve brže. Gustoća se tokom procesa sve više povećava, te na taj način spriječava prodiranje vode, zbog čega se reakcije usporavaju.

### **1.7.2. Instrumenti za mjerenje električne provodnosti**

Izmjenična struja potrebna je za mjerenje električne provodnosti elektrolita. Ukoliko bi se koristila istosmjerna struja došlo bi do elektrolize koja bi uzrokovala polarizaciju elektroda te izmijenila sastav elektrolita u njihovoj blizini.

Ovisno o električnoj provodnosti otopine koja se ispituje, odabire se frekvencija izmjeničnog napona. Kod niskih provodnosti otopina, provodnost se čak može odrediti i mjerenjem istosmjerne struje kroz ćeliju. Kod viših provodnosti koriste se frekvencije u rasponu od 50 do 100 Hz, a što je ona veća, veća je i točnost mjerenja.

Za mjerenje provodnosti pri korištenju izmjenične struje koristi se Mullardov konduktometar, koji je ustvari modificirani Wheatstoneov most.

Danas se upotrebljavaju visoko precizni, digitalni instrumenti s operacijskim pojačalima visokog ulaznog otpora te mikroprocesima za obradu mjernih podataka.

## **2. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **2.1. Cilj rada**

U eksperimentalnom dijelu rada izvršena su mjerenja specifične električne provodnosti cementa CEM I s dodatkom 5-30 mas % otpadnog betona pri temperaturi od 20 °C i omjeru voda / kruto  $V/K = 0,5$ . Uspoređivanjem dobivenih rezultata specifične električne provodnosti uzoraka cementa s ili bez dodatka otpadnog betona može se zaključiti o utjecaju otpadnog betona na hidratacijske procese cementnog kompozita.

### **2.2. Materijali**

#### **2.2.1. Portland Ultimo premium i Tecnocem cement, cem i 42,5 R**

Cementi koji su korišteni za provedbu eksperimentalnog dijela su portlandski cementi CEM I 42,5 R trgovačkih naziva ULTIMO PREMIUM I TECNOCEM koji su sušeni pri 105 °C do konstantne mase. CEM I 42,5 R je komercijalni proizvod cementare CEMEX Hrvatska iz Kaštel Sućurca čija su svojstva vrlo visoka rana i konačna čvrstoća, kratak period početka vezivanja, optimalna obradivost, znatan razvoj topline hidratacije.<sup>9</sup>

#### **2.2.2. Otpadni beton**

Prethodno hidratizirani CEM I je predstavljao beton, koji je usitnjen i osušen pri temperaturi pri 105 °C. Nakon sušenja je samljeven u Retsch RM 200 mlinu u periodu od 20 minuta do veličine manje od 125 µm. Kad se postigla željena veličina čestica vršilo se prosijavanje u periodu od 10 minuta na Fritsch analysette 3 spartan pulverisette 0 treskalici sa standardnim sitom od 125 µm.



**Slika 8.** Mlin Retsch RM 200



**Slika 9.** Fritsch analysette 3 spartan  
pulverisette 0 treskalica

### 2.3. Priprema uzorka

Uzorci potrebni za mjerenje specifične električne provodnosti cementnih pasti se pripremaju homogenizacijom portland cementa CEM I i otpadnog betona s udjelom od 5-30 mas % s redestiliranom vodom. Cementna pasta koja ima vodocementni omjere  $V/C = 0,5$ , priprema se na način da se na analitičkoj vagi izvaže 100 grama uzorka. Uzorak koji se sastoji od portland cementa CEM I i otpadnog betona mora se predhodno promiješati na suho da bi se dobio homogeni prah, u kojeg se zatim pipetom dodaje 50 mL redestilirane vode. Uzorak se miješa 3 minute te se dobiva kompaktna masa. Nakon što se dobila kompaktna masa, ona se prenese u termostatirani držač uzorka koji je postavljen na temperaturu od 20 °C. Mjernu posudu potrebno je poklopiti poklopcem, nakon čega se u uzorak uroni elektroda konduktometrijske ćelije te se vrši mjerenje specifične električne provodnosti svaku minutu pomoću konduktometra koji je povezan na računalo te se dobiveni rezultati mjerenja pohranjuju. Konduktometrijsko mjerenje je provedeno na 8 pripravljenih uzoraka, od kojih su dva uzorka čisti portland cement CEM I 42,5 R drugačijeg trgovačkog naziva, dok šest ostalih uzoraka sadržavaju portland cement pomiješan s otpadnim betonom u različitim masenim postotcima.

## 2.4. Opis aparature i postupak mjerenja

Praćenje procesa hidratacije cementa provedeno je uz mikroprocesorski konduktometar MA 5964 – ISKRA (slika 10 b). Konduktometar je vrlo precizan uređaj kojim se mjeri specifična električna provodnost, a povezan je s računalom koje pohranjuje rezultate mjerenja u točno određenim vremenskim intervalima. Mjerno područje konduktomera je od  $10^{-3} \mu\text{S}/\text{cm}$  do  $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ mS}/\text{cm}$  u temperaturnom području od  $-50$  do  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  uz veliku jednostavnost i univerzalnost pri mjerenju. U svrhu pohranjivanja podataka preko računala koristi se serijski digitalni izlaz RS 232 C.<sup>10</sup>

Elektroda konduktometrijske ćelije izrađena je od nehrđajućeg čelika (prokroma) uz konstantu mjerne elektrode  $C = 0,2832 \text{ cm}^{-1}$ . Da bi se mjerenje moglo precizno izvršiti, nakon uključivanja konduktometra i računala, postavljaju se parametri koji moraju biti konstantni tijekom mjerenja, a to su:

- trenutna temperatura uzorka (TA) =  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- referentna temperatura uzorka (TR) =  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- karakteristika elektrode od nehrđajućeg čelika kao konduktometrijske ćelije.

Pripremljen uzorak cementne paste prenese se u termostatisiranu staklenu posudu (slika 10 c) s dvostrukim stjenkama u kojoj cirkulira voda zadane temperature. Elektroda konduktometrijske ćelije (slika 10 c) se uroni u uzorak kroz rupu na poklopcu posude s dvostrukom stijenkom. Svaku 1 minutu konduktometar računalu šalje mjerne podatke te ih ono pohranjuje do završetka mjerenja. Mjerenje je završeno nakon uočenog kontinuiranog pada specifične električne provodnosti.







**Slika 10. :** Aparatura za određivanje specifične električne provodnosti a) uz prikaz konduktometra ISKRA MA-5964 b) te elektrode od nehrđajućeg čelika i staklene posude s dvostrukom stijenkom c) te termostat d)

## 2.5. Određivanje konstante mjerne elektrode konduktometra

Za određivanje konstante mjerne elektrode koristi se otopina KCl koncentracije 0,1 mol/L. Ovaj postupak se provodi termostatiranjem vode i standardne otopine u čašici pri temperaturu od 20 °C. U termostatiranu otopinu se zatim uranja elektroda, te se mjehurići zraka uklanjaju laganom vrtnjom. Nakon što se konduktometar uključi, potrebno je unijeti odgovarajuće vrijednosti za konstantu mjerne elektrode, trenutnu i referentnu temperaturu.

Da bi se postiglo što točnije mjerenje, elektrodu je nužno isprati tri puta sa destiliranom vodom te jednom sa otopinom KCl. Kada se uspostavi zadana temperatura, vrši se očitavanje mjernih vrijednosti. U slučaju da mjerenjem dobiveni rezultat odstupa od očekivane mjerne vrijednosti otopine KCl tada se upisuje druga mjerna vrijednost dok se ne dobije zadovoljavajuća provodnost otopine. Određena vrijednost konstante mjerne elektrode iznosi 0,2832 cm<sup>-1</sup>.

### 3. REZULTATI I RASPRAVA

Rezultati određivanja specifične električne provodnosti portland cementa CEM I sa i bez dodatka otpadnog prikazani su u tablici 3 i na slikama 11 i 12.

**Tablica 3.** *Rezultati određivanja specifične električne provodnosti*

| Vrijeme<br>min | Specifična električna provodnost mS/cm |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | U00VG                                  | U05VG | U10VG | U15VG | U20VG | U25VG | U30VG | T00VG |
| 0              | 14,82                                  | 13,97 | 14,59 | 13,33 | 12,36 | 11,58 | 11,04 | 12,59 |
| 1              | 15,63                                  | 14,85 | 14,79 | 13,46 | 12,68 | 11,77 | 11,38 | 13,12 |
| 2              | 16,04                                  | 15,32 | 14,88 | 13,54 | 12,86 | 11,92 | 11,55 | 13,43 |
| 3              | 16,28                                  | 15,60 | 14,95 | 13,61 | 13,00 | 12,03 | 11,68 | 13,68 |
| 4              | 16,45                                  | 15,76 | 14,99 | 13,66 | 13,10 | 12,11 | 11,79 | 13,88 |
| 5              | 16,55                                  | 15,87 | 15,03 | 13,70 | 13,17 | 12,17 | 11,87 | 14,07 |
| 6              | 16,64                                  | 15,95 | 15,06 | 13,73 | 13,24 | 12,22 | 11,94 | 14,21 |
| 7              | 16,71                                  | 16,01 | 15,09 | 13,77 | 13,28 | 12,26 | 12,00 | 14,34 |
| 8              | 16,77                                  | 16,06 | 15,12 | 13,80 | 13,31 | 12,30 | 12,05 | 14,45 |
| 9              | 16,82                                  | 16,10 | 15,14 | 13,83 | 13,35 | 12,33 | 12,09 | 14,54 |
| 10             | 16,87                                  | 16,14 | 15,17 | 13,85 | 13,38 | 12,36 | 12,13 | 14,61 |
| 11             | 16,91                                  | 16,17 | 15,19 | 13,88 | 13,41 | 12,39 | 12,17 | 14,68 |
| 12             | 16,95                                  | 16,20 | 15,22 | 13,91 | 13,44 | 12,42 | 12,20 | 14,75 |
| 13             | 16,99                                  | 16,23 | 15,24 | 13,93 | 13,47 | 12,44 | 12,24 | 14,80 |
| 14             | 17,03                                  | 16,26 | 15,27 | 13,96 | 13,50 | 12,47 | 12,27 | 14,86 |
| 15             | 17,06                                  | 16,29 | 15,29 | 13,97 | 13,52 | 12,50 | 12,30 | 14,90 |
| 16             | 17,10                                  | 16,31 | 15,31 | 14,00 | 13,55 | 12,52 | 12,33 | 14,94 |
| 17             | 17,13                                  | 16,33 | 15,33 | 14,02 | 13,57 | 12,55 | 12,36 | 14,98 |
| 18             | 17,16                                  | 16,36 | 15,36 | 14,04 | 13,60 | 12,57 | 12,39 | 15,01 |
| 19             | 17,19                                  | 16,38 | 15,38 | 14,06 | 13,62 | 12,59 | 12,41 | 15,04 |
| 20             | 17,22                                  | 16,40 | 15,41 | 14,09 | 13,65 | 12,62 | 12,44 | 15,08 |
| 21             | 17,25                                  | 16,42 | 15,43 | 14,11 | 13,67 | 12,64 | 12,47 | 15,11 |
| 22             | 17,28                                  | 16,44 | 15,45 | 14,13 | 13,69 | 12,67 | 12,49 | 15,15 |
| 23             | 17,30                                  | 16,46 | 15,47 | 14,15 | 13,71 | 12,69 | 12,51 | 15,18 |
| 24             | 17,33                                  | 16,49 | 15,49 | 14,17 | 13,73 | 12,71 | 12,54 | 15,21 |

|    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25 | 17,36 | 16,51 | 15,51 | 14,19 | 13,75 | 12,73 | 12,56 | 15,25 |
| 26 | 17,39 | 16,53 | 15,54 | 14,21 | 13,78 | 12,75 | 12,58 | 15,31 |
| 27 | 17,41 | 16,55 | 15,56 | 14,23 | 13,80 | 12,78 | 12,60 | 15,37 |
| 28 | 17,44 | 16,57 | 15,58 | 14,25 | 13,81 | 12,80 | 12,61 | 15,36 |
| 29 | 17,47 | 16,59 | 15,60 | 14,27 | 13,83 | 12,82 | 12,63 | 15,35 |
| 30 | 17,49 | 16,61 | 15,62 | 14,30 | 13,84 | 12,84 | 12,64 | 15,37 |
| 31 | 17,52 | 16,64 | 15,64 | 14,32 | 13,86 | 12,86 | 12,66 | 15,41 |
| 32 | 17,54 | 16,66 | 15,66 | 14,34 | 13,88 | 12,88 | 12,68 | 15,38 |
| 33 | 17,57 | 16,68 | 15,68 | 14,35 | 13,89 | 12,90 | 12,70 | 15,51 |
| 34 | 17,59 | 16,70 | 15,70 | 14,37 | 13,91 | 12,92 | 12,71 | 15,46 |
| 35 | 17,62 | 16,72 | 15,72 | 14,39 | 13,93 | 12,93 | 12,73 | 15,49 |
| 36 | 17,65 | 16,74 | 15,74 | 14,41 | 13,94 | 12,96 | 12,75 | 15,51 |
| 37 | 17,67 | 16,77 | 15,76 | 14,43 | 13,96 | 12,98 | 12,76 | 15,52 |
| 38 | 17,70 | 16,79 | 15,78 | 14,45 | 13,98 | 12,99 | 12,78 | 15,56 |
| 39 | 17,72 | 16,81 | 15,80 | 14,47 | 13,99 | 13,01 | 12,80 | 15,56 |
| 40 | 17,75 | 16,83 | 15,82 | 14,49 | 14,01 | 13,03 | 12,81 | 15,59 |
| 41 | 17,77 | 16,85 | 15,83 | 14,51 | 14,03 | 13,05 | 12,83 | 15,61 |
| 42 | 17,79 | 16,87 | 15,86 | 14,53 | 14,04 | 13,07 | 12,84 | 15,62 |
| 43 | 17,81 | 16,89 | 15,87 | 14,55 | 14,06 | 13,09 | 12,86 | 15,64 |
| 44 | 17,83 | 16,91 | 15,90 | 14,56 | 14,07 | 13,10 | 12,88 | 15,66 |
| 45 | 17,85 | 16,93 | 15,91 | 14,58 | 14,09 | 13,12 | 12,89 | 15,68 |
| 46 | 17,88 | 16,95 | 15,93 | 14,59 | 14,11 | 13,14 | 12,91 | 15,70 |
| 47 | 17,89 | 16,97 | 15,95 | 14,61 | 14,12 | 13,15 | 12,92 | 15,71 |
| 48 | 17,92 | 16,99 | 15,97 | 14,62 | 14,14 | 13,17 | 12,94 | 15,73 |
| 49 | 17,93 | 17,01 | 15,99 | 14,64 | 14,16 | 13,19 | 12,96 | 15,75 |
| 50 | 17,95 | 17,03 | 16,00 | 14,65 | 14,17 | 13,20 | 12,97 | 15,76 |
| 51 | 17,98 | 17,05 | 16,02 | 14,67 | 14,19 | 13,22 | 12,99 | 15,78 |
| 52 | 18,00 | 17,07 | 16,04 | 14,68 | 14,20 | 13,23 | 13,00 | 15,79 |
| 53 | 18,02 | 17,08 | 16,05 | 14,70 | 14,22 | 13,25 | 13,02 | 15,81 |
| 54 | 18,04 | 17,10 | 16,07 | 14,71 | 14,23 | 13,27 | 13,03 | 15,83 |
| 55 | 18,06 | 17,12 | 16,09 | 14,73 | 14,25 | 13,28 | 13,05 | 15,84 |
| 56 | 18,08 | 17,14 | 16,11 | 14,74 | 14,26 | 13,30 | 13,07 | 15,86 |
| 57 | 18,10 | 17,16 | 16,12 | 14,76 | 14,28 | 13,31 | 13,08 | 15,88 |

|    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 58 | 18,12 | 17,18 | 16,14 | 14,77 | 14,29 | 13,33 | 13,10 | 15,90 |
| 59 | 18,14 | 17,20 | 16,15 | 14,78 | 14,31 | 13,34 | 13,12 | 15,91 |
| 60 | 18,16 | 17,22 | 16,17 | 14,80 | 14,32 | 13,36 | 13,13 | 15,93 |
| 61 | 18,17 | 17,23 | 16,19 | 14,81 | 14,33 | 13,37 | 13,15 | 15,95 |
| 62 | 18,19 | 17,25 | 16,21 | 14,83 | 14,35 | 13,40 | 13,17 | 15,97 |
| 63 | 18,21 | 17,27 | 16,22 | 14,84 | 14,37 | 13,37 | 13,18 | 15,98 |
| 64 | 18,23 | 17,29 | 16,24 | 14,85 | 14,38 | 13,36 | 13,20 | 16,00 |
| 65 | 18,25 | 17,31 | 16,25 | 14,87 | 14,39 | 13,41 | 13,21 | 16,02 |
| 66 | 18,27 | 17,32 | 16,27 | 14,88 | 14,41 | 13,45 | 13,23 | 16,04 |
| 67 | 18,29 | 17,34 | 16,28 | 14,89 | 14,42 | 13,44 | 13,26 | 16,05 |
| 68 | 18,31 | 17,36 | 16,30 | 14,91 | 14,43 | 13,44 | 13,29 | 16,07 |
| 69 | 18,34 | 17,39 | 16,31 | 14,92 | 14,45 | 13,49 | 13,24 | 16,09 |
| 70 | 18,36 | 17,41 | 16,33 | 14,94 | 14,46 | 13,50 | 13,28 | 16,11 |
| 71 | 18,39 | 17,42 | 16,34 | 14,95 | 14,47 | 13,51 | 13,32 | 16,12 |
| 72 | 18,41 | 17,44 | 16,36 | 14,96 | 14,49 | 13,52 | 13,33 | 16,14 |
| 73 | 18,43 | 17,46 | 16,37 | 14,98 | 14,50 | 13,54 | 13,34 | 16,15 |
| 74 | 18,45 | 17,47 | 16,39 | 14,99 | 14,51 | 13,56 | 13,34 | 16,17 |
| 75 | 18,46 | 17,49 | 16,41 | 15,01 | 14,53 | 13,59 | 13,37 | 16,19 |
| 76 | 18,48 | 17,51 | 16,42 | 15,02 | 14,54 | 13,53 | 13,34 | 16,21 |
| 77 | 18,50 | 17,52 | 16,43 | 15,03 | 14,55 | 13,58 | 13,40 | 16,23 |
| 78 | 18,52 | 17,54 | 16,45 | 15,05 | 14,57 | 13,58 | 13,40 | 16,25 |
| 79 | 18,54 | 17,55 | 16,47 | 15,06 | 14,58 | 13,60 | 13,41 | 16,28 |
| 80 | 18,55 | 17,57 | 16,48 | 15,08 | 14,59 | 13,61 | 13,41 | 16,30 |
| 81 | 18,56 | 17,58 | 16,50 | 15,09 | 14,60 | 13,63 | 13,43 | 16,31 |
| 82 | 18,58 | 17,60 | 16,51 | 15,10 | 14,62 | 13,63 | 13,44 | 16,33 |
| 83 | 18,59 | 17,62 | 16,53 | 15,12 | 14,63 | 13,65 | 13,43 | 16,35 |
| 84 | 18,60 | 17,63 | 16,54 | 15,13 | 14,64 | 13,66 | 13,44 | 16,37 |
| 85 | 18,62 | 17,65 | 16,55 | 15,14 | 14,66 | 13,66 | 13,47 | 16,39 |
| 86 | 18,63 | 17,66 | 16,57 | 15,15 | 14,67 | 13,68 | 13,47 | 16,40 |
| 87 | 18,65 | 17,68 | 16,58 | 15,17 | 14,68 | 13,69 | 13,46 | 16,42 |
| 88 | 18,67 | 17,70 | 16,60 | 15,18 | 14,69 | 13,71 | 13,49 | 16,43 |
| 89 | 18,68 | 17,72 | 16,61 | 15,20 | 14,71 | 13,72 | 13,52 | 16,45 |
| 90 | 18,70 | 17,73 | 16,62 | 15,21 | 14,72 | 13,73 | 13,54 | 16,46 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 91  | 18,71 | 17,75 | 16,64 | 15,22 | 14,73 | 13,74 | 13,54 | 16,47 |
| 92  | 18,72 | 17,77 | 16,65 | 15,23 | 14,74 | 13,75 | 13,55 | 16,49 |
| 93  | 18,74 | 17,78 | 16,67 | 15,25 | 14,76 | 13,76 | 13,55 | 16,51 |
| 94  | 18,76 | 17,80 | 16,68 | 15,26 | 14,77 | 13,77 | 13,56 | 16,53 |
| 95  | 18,77 | 17,81 | 16,70 | 15,27 | 14,78 | 13,79 | 13,53 | 16,55 |
| 96  | 18,78 | 17,83 | 16,71 | 15,29 | 14,79 | 13,80 | 13,57 | 16,58 |
| 97  | 18,80 | 17,84 | 16,73 | 15,30 | 14,81 | 13,81 | 13,57 | 16,59 |
| 98  | 18,81 | 17,86 | 16,74 | 15,31 | 14,82 | 13,83 | 13,59 | 16,61 |
| 99  | 18,83 | 17,87 | 16,75 | 15,32 | 14,83 | 13,84 | 13,61 | 16,63 |
| 100 | 18,85 | 17,89 | 16,77 | 15,33 | 14,85 | 13,86 | 13,62 | 16,64 |
| 101 | 18,86 | 17,90 | 16,78 | 15,35 | 14,86 | 13,87 | 13,64 | 16,65 |
| 102 | 18,88 | 17,91 | 16,79 | 15,36 | 14,87 | 13,89 | 13,65 | 16,66 |
| 103 | 18,89 | 17,93 | 16,81 | 15,37 | 14,88 | 13,90 | 13,66 | 16,68 |
| 104 | 18,91 | 17,95 | 16,82 | 15,39 | 14,89 | 13,92 | 13,67 | 16,69 |
| 105 | 18,92 | 17,96 | 16,83 | 15,40 | 14,91 | 13,94 | 13,68 | 16,71 |
| 106 | 18,94 | 17,97 | 16,85 | 15,41 | 14,92 | 13,95 | 13,69 | 16,72 |
| 107 | 18,95 | 17,99 | 16,86 | 15,42 | 14,93 | 13,96 | 13,70 | 16,73 |
| 108 | 18,97 | 18,00 | 16,87 | 15,44 | 14,94 | 13,98 | 13,71 | 16,74 |
| 109 | 18,98 | 18,02 | 16,89 | 15,45 | 14,96 | 13,99 | 13,72 | 16,76 |
| 110 | 19,00 | 18,04 | 16,90 | 15,46 | 14,98 | 14,00 | 13,73 | 16,77 |
| 111 | 19,01 | 18,05 | 16,91 | 15,47 | 14,99 | 14,01 | 13,74 | 16,78 |
| 112 | 19,02 | 18,07 | 16,93 | 15,48 | 15,01 | 14,03 | 13,75 | 16,79 |
| 113 | 19,04 | 18,08 | 16,94 | 15,49 | 15,02 | 14,03 | 13,76 | 16,81 |
| 114 | 19,05 | 18,09 | 16,95 | 15,51 | 15,03 | 14,04 | 13,77 | 16,82 |
| 115 | 19,07 | 18,11 | 16,96 | 15,52 | 15,05 | 14,05 | 13,78 | 16,83 |
| 116 | 19,08 | 18,12 | 16,97 | 15,53 | 15,06 | 14,06 | 13,80 | 16,85 |
| 117 | 19,09 | 18,13 | 16,98 | 15,54 | 15,08 | 14,07 | 13,81 | 16,86 |
| 118 | 19,10 | 18,15 | 17,00 | 15,55 | 15,09 | 14,07 | 13,83 | 16,88 |
| 119 | 19,11 | 18,16 | 17,01 | 15,56 | 15,10 | 14,08 | 13,84 | 16,89 |
| 120 | 19,13 | 18,17 | 17,02 | 15,57 | 15,11 | 14,09 | 13,85 | 16,90 |
| 121 | 19,14 | 18,19 | 17,03 | 15,58 | 15,12 | 14,10 | 13,87 | 16,91 |
| 122 | 19,14 | 18,20 | 17,04 | 15,59 | 15,13 | 14,10 | 13,88 | 16,92 |
| 123 | 19,15 | 18,21 | 17,06 | 15,61 | 15,14 | 14,11 | 13,89 | 16,94 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 124 | 19,15 | 18,22 | 17,06 | 15,62 | 15,14 | 14,12 | 13,89 | 16,95 |
| 125 | 19,15 | 18,23 | 17,07 | 15,63 | 15,15 | 14,13 | 13,90 | 16,97 |
| 126 | 19,16 | 18,24 | 17,08 | 15,64 | 15,16 | 14,13 | 13,91 | 16,98 |
| 127 | 19,16 | 18,25 | 17,09 | 15,65 | 15,16 | 14,14 | 13,92 | 16,99 |
| 128 | 19,15 | 18,26 | 17,10 | 15,66 | 15,17 | 14,15 | 13,93 | 17,01 |
| 129 | 19,14 | 18,27 | 17,11 | 15,66 | 15,18 | 14,16 | 13,94 | 17,02 |
| 130 | 19,14 | 18,28 | 17,11 | 15,67 | 15,19 | 14,17 | 13,95 | 17,03 |
| 131 | 19,13 | 18,28 | 17,12 | 15,68 | 15,20 | 14,18 | 13,97 | 17,05 |
| 132 | 19,11 | 18,28 | 17,12 | 15,69 | 15,20 | 14,18 | 13,98 | 17,06 |
| 133 | 19,10 | 18,28 | 17,12 | 15,70 | 15,21 | 14,19 | 13,99 | 17,07 |
| 134 | 19,09 | 18,28 | 17,12 | 15,70 | 15,22 | 14,20 | 14,00 | 17,09 |
| 135 | 19,07 | 18,27 | 17,12 | 15,71 | 15,23 | 14,21 | 14,00 | 17,10 |
| 136 | 19,06 | 18,26 | 17,11 | 15,71 | 15,24 | 14,22 | 14,01 | 17,11 |
| 137 | 19,04 | 18,25 | 17,11 | 15,72 | 15,25 | 14,23 | 14,02 | 17,12 |
| 138 | 19,03 | 18,24 | 17,10 | 15,72 | 15,25 | 14,23 | 14,03 | 17,14 |
| 139 | 19,01 | 18,23 | 17,09 | 15,72 | 15,26 | 14,24 | 14,04 | 17,15 |
| 140 | 19,00 | 18,21 | 17,08 | 15,72 | 15,26 | 14,24 | 14,04 | 17,17 |
| 141 | 18,98 | 18,19 | 17,06 | 15,72 | 15,26 | 14,25 | 14,04 | 17,18 |
| 142 | 18,97 | 18,18 | 17,05 | 15,71 | 15,27 | 14,26 | 14,05 | 17,19 |
| 143 | 18,96 | 18,16 | 17,04 | 15,71 | 15,27 | 14,26 | 14,05 | 17,21 |
| 144 | 18,95 | 18,15 | 17,03 | 15,70 | 15,28 | 14,27 | 14,06 | 17,22 |
| 145 | 18,94 | 18,14 | 17,01 | 15,70 | 15,28 | 14,27 | 14,06 | 17,24 |
| 146 | 18,93 | 18,12 | 16,99 | 15,69 | 15,28 | 14,27 | 14,06 | 17,25 |
| 147 | 18,92 | 18,10 | 16,98 | 15,68 | 15,28 | 14,28 | 14,07 | 17,26 |
| 148 | 18,91 | 18,09 | 16,97 | 15,66 | 15,27 | 14,28 | 14,07 | 17,27 |
| 149 | 18,90 | 18,08 | 16,96 | 15,65 | 15,26 | 14,28 | 14,07 | 17,29 |
| 150 | 18,89 | 18,07 | 16,94 | 15,64 | 15,25 | 14,28 | 14,08 | 17,30 |
| 151 | 18,89 | 18,06 | 16,93 | 15,63 | 15,25 | 14,28 | 14,08 | 17,31 |
| 152 | 18,88 | 18,06 | 16,92 | 15,62 | 15,24 | 14,28 | 14,08 | 17,32 |
| 153 | 18,87 | 18,05 | 16,91 | 15,60 | 15,22 | 14,28 | 14,08 | 17,33 |
| 154 | 18,86 | 18,04 | 16,90 | 15,59 | 15,21 | 14,27 | 14,07 | 17,35 |
| 155 | 18,86 | 18,03 | 16,89 | 15,58 | 15,19 | 14,27 | 14,08 | 17,36 |
| 156 | 18,86 | 18,02 | 16,88 | 15,57 | 15,18 | 14,26 | 14,07 | 17,37 |

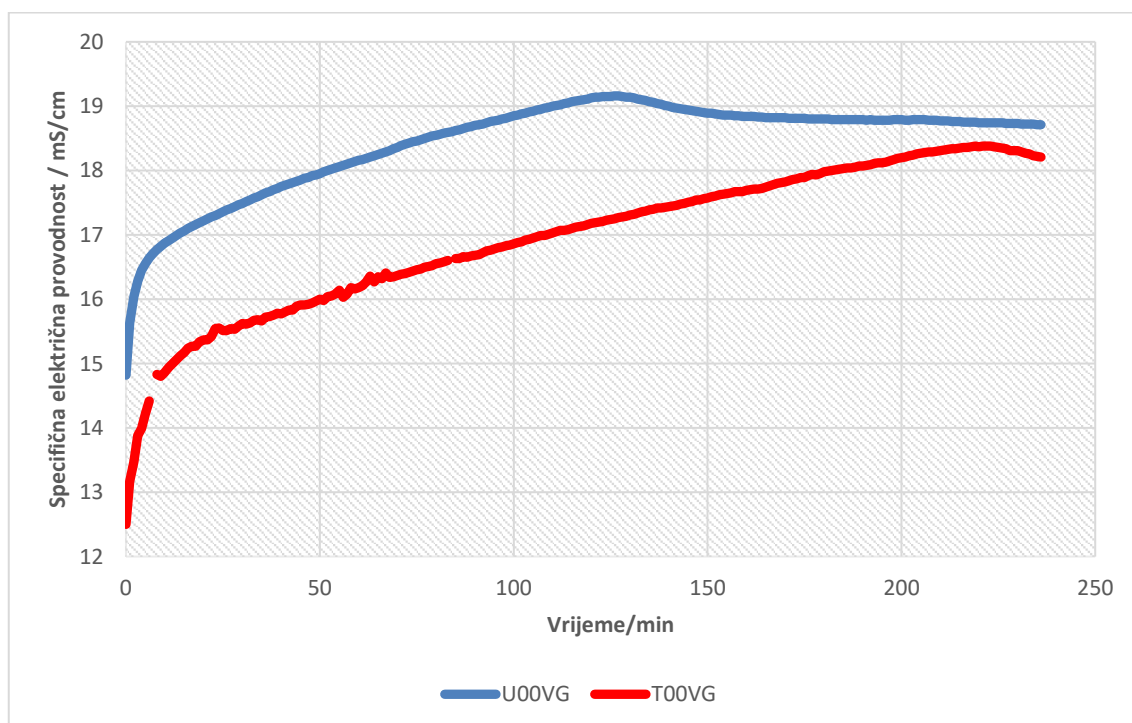
|     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 157 | 18,85 | 18,02 | 16,88 | 15,56 | 15,16 | 14,25 | 14,07 | 17,38 |
| 158 | 18,85 | 18,01 | 16,87 | 15,55 | 15,15 | 14,25 | 14,06 | 17,39 |
| 159 | 18,84 | 18,00 | 16,86 | 15,54 | 15,14 | 14,24 | 14,06 | 17,41 |
| 160 | 18,84 | 17,99 | 16,86 | 15,53 | 15,12 | 14,23 | 14,06 | 17,42 |
| 161 | 18,84 | 17,98 | 16,85 | 15,52 | 15,11 | 14,22 | 14,05 | 17,43 |
| 162 | 18,84 | 17,98 | 16,84 | 15,51 | 15,10 | 14,21 | 14,04 | 17,45 |
| 163 | 18,83 | 17,98 | 16,84 | 15,51 | 15,09 | 14,20 | 14,03 | 17,46 |
| 164 | 18,83 | 17,97 | 16,84 | 15,50 | 15,08 | 14,19 | 14,02 | 17,47 |
| 165 | 18,82 | 17,97 | 16,83 | 15,49 | 15,07 | 14,18 | 14,02 | 17,48 |
| 166 | 18,82 | 17,97 | 16,83 | 15,48 | 15,06 | 14,17 | 14,01 | 17,49 |
| 167 | 18,82 | 17,96 | 16,83 | 15,48 | 15,05 | 14,16 | 14,00 | 17,51 |
| 168 | 18,82 | 17,96 | 16,82 | 15,48 | 15,04 | 14,16 | 13,99 | 17,52 |
| 169 | 18,82 | 17,95 | 16,82 | 15,47 | 15,04 | 14,15 | 13,98 | 17,54 |
| 170 | 18,82 | 17,95 | 16,81 | 15,46 | 15,03 | 14,14 | 13,97 | 17,55 |
| 171 | 18,81 | 17,95 | 16,81 | 15,46 | 15,02 | 14,13 | 13,96 | 17,56 |
| 172 | 18,81 | 17,95 | 16,81 | 15,45 | 15,02 | 14,12 | 13,96 | 17,57 |
| 173 | 18,81 | 17,94 | 16,81 | 15,45 | 15,01 | 14,11 | 13,95 | 17,58 |
| 174 | 18,81 | 17,94 | 16,80 | 15,45 | 15,01 | 14,11 | 13,94 | 17,59 |
| 175 | 18,81 | 17,94 | 16,80 | 15,44 | 15,00 | 14,10 | 13,94 | 17,61 |
| 176 | 18,80 | 17,94 | 16,80 | 15,44 | 15,00 | 14,10 | 13,93 | 17,62 |
| 177 | 18,80 | 17,94 | 16,80 | 15,44 | 14,99 | 14,09 | 13,92 | 17,63 |
| 178 | 18,80 | 17,94 | 16,80 | 15,44 | 14,99 | 14,08 | 13,91 | 17,64 |
| 179 | 18,80 | 17,94 | 16,79 | 15,43 | 14,98 | 14,08 | 13,91 | 17,66 |
| 180 | 18,80 | 17,94 | 16,79 | 15,43 | 14,98 | 14,07 | 13,90 | 17,67 |
| 181 | 18,80 | 17,93 | 16,79 | 15,43 | 14,97 | 14,07 | 13,89 | 17,68 |
| 182 | 18,79 | 17,93 | 16,79 | 15,43 | 14,97 | 14,06 | 13,89 | 17,69 |
| 183 | 18,79 | 17,93 | 16,79 | 15,42 | 14,97 | 14,06 | 13,89 | 17,71 |
| 184 | 18,79 | 17,93 | 16,79 | 15,42 | 14,96 | 14,05 | 13,88 | 17,72 |
| 185 | 18,79 | 17,93 | 16,78 | 15,42 | 14,96 | 14,05 | 13,88 | 17,56 |
| 186 | 18,79 | 17,93 | 16,78 | 15,42 | 14,96 | 14,05 | 13,87 | 17,76 |
| 187 | 18,79 | 17,93 | 16,78 | 15,42 | 14,96 | 14,04 | 13,87 | 17,75 |
| 188 | 18,79 | 17,93 | 16,78 | 15,41 | 14,95 | 14,04 | 13,87 | 17,77 |
| 189 | 18,79 | 17,93 | 16,78 | 15,41 | 14,96 | 14,04 | 13,86 | 17,78 |



|     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 190 | 18,79 | 17,92 | 16,78 | 15,41 | 14,96 | 14,03 | 13,86 | 17,78 |
| 191 | 18,78 | 17,92 | 16,78 | 15,41 | 14,96 | 14,03 | 13,86 | 17,79 |
| 192 | 18,79 | 17,92 | 16,78 | 15,41 | 14,96 | 14,03 | 13,85 | 17,84 |
| 193 | 18,78 | 17,92 | 16,77 | 15,41 | 14,96 | 14,02 | 13,85 | 17,87 |
| 194 | 18,78 | 17,92 | 16,77 | 15,40 | 14,97 | 14,02 | 13,84 | 17,86 |
| 195 | 18,78 | 17,92 | 16,77 | 15,40 | 14,96 | 14,02 | 13,84 | 17,87 |
| 196 | 18,78 | 17,92 | 16,77 | 15,40 | 14,96 | 14,01 | 13,84 | 17,88 |
| 197 | 18,78 | 17,92 | 16,77 | 15,40 | 14,95 | 14,01 | 13,84 | 17,89 |
| 198 | 18,79 | 17,92 | 16,77 | 15,40 | 14,95 | 14,01 | 13,83 | 17,92 |
| 199 | 18,79 | 17,91 | 16,76 | 15,40 | 14,96 | 14,01 | 13,83 | 17,93 |
| 200 | 18,79 | 17,92 | 16,76 | 15,40 | 14,96 | 14,01 | 13,83 | 17,93 |
| 201 | 18,78 | 17,91 | 16,76 | 15,39 | 14,96 | 14,00 | 13,82 | 17,95 |
| 202 | 18,78 | 17,91 | 16,76 | 15,39 | 14,96 | 14,00 | 13,82 | 17,98 |
| 203 | 18,79 | 17,91 | 16,76 | 15,39 | 14,95 | 14,00 | 13,82 | 17,95 |
| 204 | 18,79 | 17,91 | 16,76 | 15,39 | 14,95 | 14,00 | 13,82 | 18,01 |
| 205 | 18,79 | 17,91 | 16,76 | 15,38 | 14,94 | 14,00 | 13,82 | 17,99 |
| 206 | 18,79 | 17,91 | 16,76 | 15,38 | 14,94 | 13,99 | 13,81 | 18,02 |
| 207 | 18,78 | 17,91 | 16,76 | 15,38 | 14,93 | 13,99 | 13,81 | 18,06 |
| 208 | 18,78 | 17,90 | 16,76 | 15,38 | 14,93 | 13,99 | 13,81 | 18,08 |
| 209 | 18,78 | 17,90 | 16,76 | 15,38 | 14,93 | 13,99 | 13,81 | 18,03 |
| 210 | 18,77 | 17,90 | 16,75 | 15,38 | 14,92 | 13,99 | 13,81 | 18,06 |
| 211 | 18,77 | 17,90 | 16,75 | 15,38 | 14,92 | 13,99 | 13,81 | 18,07 |
| 212 | 18,77 | 17,90 | 16,75 | 15,38 | 14,91 | 13,98 | 13,81 | 18,12 |
| 213 | 18,76 | 17,90 | 16,75 | 15,37 | 14,91 | 13,98 | 13,80 | 18,13 |
| 214 | 18,76 | 17,90 | 16,75 | 15,37 | 14,91 | 13,98 | 13,80 | 18,11 |
| 215 | 18,76 | 17,90 | 16,75 | 15,37 | 14,91 | 13,98 | 13,80 | 18,09 |
| 216 | 18,75 | 17,90 | 16,76 | 15,37 | 14,90 | 13,98 | 13,80 | 18,13 |
| 217 | 18,75 | 17,89 | 16,76 | 15,37 | 14,90 | 13,98 | 13,80 | 18,10 |
| 218 | 18,75 | 17,89 | 16,75 | 15,37 | 14,90 | 13,98 | 13,80 | 18,14 |
| 219 | 18,75 | 17,89 | 16,75 | 15,37 | 14,90 | 13,98 | 13,79 | 18,16 |
| 220 | 18,74 | 17,89 | 16,75 | 15,36 | 14,91 | 13,98 | 13,79 | 18,17 |
| 221 | 18,74 | 17,89 | 16,74 | 15,36 | 14,91 | 13,98 | 13,79 | 18,15 |
| 222 | 18,74 | 17,89 | 16,74 | 15,36 | 14,91 | 13,97 | 13,79 | 18,02 |

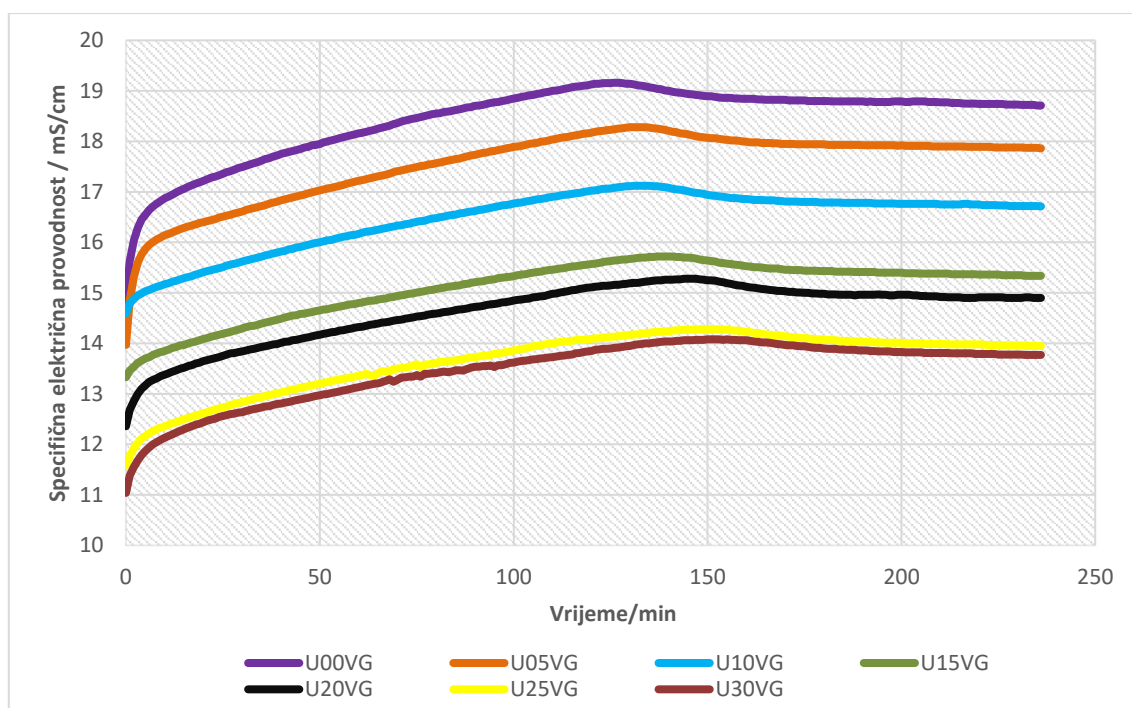
|     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 223 | 18,74 | 17,89 | 16,74 | 15,36 | 14,91 | 13,97 | 13,79 | 18,08 |
| 224 | 18,74 | 17,88 | 16,74 | 15,36 | 14,91 | 13,97 | 13,79 | 18,30 |
| 225 | 18,74 | 17,88 | 16,73 | 15,36 | 14,91 | 13,97 | 13,78 | 18,12 |
| 226 | 18,74 | 17,88 | 16,73 | 15,35 | 14,91 | 13,96 | 13,78 | 18,18 |
| 227 | 18,73 | 17,88 | 16,73 | 15,35 | 14,90 | 13,96 | 13,78 | 17,89 |
| 228 | 18,73 | 17,88 | 16,72 | 15,35 | 14,90 | 13,96 | 13,78 | 18,19 |
| 229 | 18,73 | 17,88 | 16,72 | 15,35 | 14,90 | 13,96 | 13,78 | 17,96 |
| 230 | 18,73 | 17,88 | 16,72 | 15,35 | 14,90 | 13,95 | 13,78 | 18,15 |
| 231 | 18,72 | 17,88 | 16,72 | 15,35 | 14,90 | 13,96 | 13,78 | 18,20 |
| 232 | 18,72 | 17,87 | 16,72 | 15,34 | 14,91 | 13,95 | 13,77 | 18,23 |
| 233 | 18,72 | 17,87 | 16,72 | 15,34 | 14,91 | 13,95 | 13,77 | 18,13 |
| 234 | 18,72 | 17,87 | 16,72 | 15,34 | 14,90 | 13,95 | 13,77 | 18,26 |
| 235 | 18,71 | 17,87 | 16,72 | 15,34 | 14,90 | 13,95 | 13,77 | 18,12 |

U tablici 3 polja označena žutom bojom predstavljaju maksimume specifične električne provodnosti za svaki od uzoraka.



**Slika 11.** Usporedba uzorka CEM I bez dodatka otpadnog građevinskog materijala različitih proizvođača.

Usporedbom dva portland cementa CEM I 42,5 R trgovačkih naziva ULTIMO PREMIUM i TECNOCEM uočeno je da ULTIMO pokazuje puno bolja svojstva. U tablici 3, te na slici 11 se može vidjeti da uzorak čistog portland cementa ULTIMO ima pojavu maksimalne provodnosti nakon 127 minuta i ona iznosi 19,16 mS/cm, dok se za uzorak čistog portland cementa TECNOCEM ona javlja nakon 221. minute te iznosi 18,38 mS/cm. Stoga je u daljnjem eksperimentalnom radu korišten portland cement ULTIMO uz različite dodatke otpadnog betona. Ovako velika razlika između rezultata dvaju čistih portland cementa može se pripisati različitoj finoći mliva, kao i različitim sastavima ova dva cementa.<sup>11</sup>



**Slika 12.** Ovisnost vrijednosti specifičnih električnih provodnosti o vremenu hidratacije

Iz slike 12 može se vidjeti da sve krivulje imaju sličan izgled s naglašenim maksimumom specifične električne provodnosti. Oznaka U00VG odnosi se na čisti portland cement CEM I 42,5 R trgovačkog naziva ULTIMO PREMIUM. Ostale oznake (U05VG, U10VG, U15VG, U20VG, U25VG i U30VG) odnose se na uzorke portland cementa ULTIMO uz dodatak 5-30 mas. % otpadnog betona. Dodatak otpadnog betona uzrokuje pad specifične električne provodnosti. Kod čistog portland cementa U00VG, maksimalna vrijednost specifične električne provodnosti iznosi 19,16 mS / cm. Smanjenjem udjela cementa u ostalim uzorcima, maksimum specifične električne provodnosti je sve manji, te on za 5 mas % otpadnog građevinskog materijala iznosi 18,28 mS / cm, za 10 mas % 17,12 mS / cm, za 15 mas % 15,72 mS / cm, za 20 mas % 15,28 mS / cm, za 25 mas %

14,28 mS / cm, te za 30 mas % 14,08 mS / cm. Povećanjem udjela otpadnog materijala, maksimumi specifične električne provodnosti pomiču se prema kasnijim vremenima hidratacije. Budući da je pojava maksimuma specifične provodnosti u direktnoj vezi s početkom vezivanja cementnih kompozita, može se reći da dodatak otpadnog materijala odgađa početak vezivanja uzoraka. Smanjenjem udjela portland cementa koji predstavlja aktivnu komponentu, uzrokuje se pad specifične električne provodnosti, te se ioni cementa koji u najvećoj mjeri pridonose rastu specifične električne provodnosti ne mogu nadomjestiti ionima otpadnog građevinskog materijala.

**Tablica 4.** *Usporedba preračunate vrijednosti specifične električne provodnosti s obzirom na smanjenje udjela cementa i maksimalne eksperimentalne vrijednosti.*

| Mas..udio otpadnog betona<br>(%) | Izračunata max. vrijednost<br>mS/cm | Eksperimentalna max.<br>vrijednost mS / cm |
|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| 0                                | 19,16                               | 19,16                                      |
| 5                                | 18,28                               | 18,20                                      |
| 10                               | 17,12                               | 17,24                                      |
| 15                               | 15,72                               | 16,29                                      |
| 20                               | 15,28                               | 15,33                                      |
| 25                               | 14,28                               | 14,37                                      |
| 30                               | 14,04                               | 13,41                                      |

Primjer proračuna:

5 % otpadnog betona –  $19,16 \text{ ms/cm} \cdot 0,95 = 18,28 \text{ ms/cm}$

10 % otpadnog betona –  $19,16 \text{ ms/cm} \cdot 0,90 = 17,12 \text{ ms/cm}$

U tablici 4. prikazana je usporedba preračunate vrijednosti s obizorm na smanjenje udjela cementa i maksimalne eksperimentalne vrijednosti uzoraka sa različitim udjelima otpadnog betona. Iz tablice se može uočiti da nema velike razlike u rezultatima između ovih vrijednosti, što doprinosi činjenici da smanjenjem udjela portland cementa, koji najviše doprinosi specifičnoj provodnosti, za isti postotak dolazi do smanjenja specifične električne provodnosti.

## 4. ZAKLJUČCI

Na temelju provedenih mjerenja i dobivenih rezultata može se izvesti sljedeće zaključke:

- Konduktometrijska metoda omogućuje kontinuirano praćenje i utjecaj dodatka otpadnog betona na hidratacijske procese portland cementa.
- Sve dobivene krivulje uzoraka cementnih pasta određene pri  $V/K = 0,5$  i  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  pokazuju sličan grafički oblik.
- Uzorak čistog portland cementa ULTIMO ima najveću vrijednost specifične električne provodnosti na 127. minuti, i ona iznosi  $19,16\text{ mS/cm}$ .
- Uzorak čistog portland cementa TECNOCEM ima najveću vrijednost specifične električne provodnosti u 221. minuti i ona iznosi  $18,38\text{ mS/cm}$ .
- Razlika između vrijednosti čistih portland cemenata može se pripisati različitoj finoći mliva, kao i različitom sastavu.
- Dodatak otpadnog betona uzrokuje pad vrijednosti specifične električne provodnosti.
- Dodatak otpadnog betona uzrokuje kasniji početak vezivanja cementnih kompozita.

## 5. LITERATURA

1. URL: <https://www.cemex.hr/povijest-cementa-i-betona> (15.5.2020)
- 2.. P. Krolo, Tehnologija veziva i kompozitnih materijala, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 1999.
- 3..A. Đureković, Cement, cementni kompozit i dodaci za cement, IGH i Školska knjiga, Zagreb, 1996.
4. D. Vrkljan, M. Klanfar, Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, Rudarsko - geološko - naftni fakultet, Zagreb, 2010.
5. J. Zelić, Z. Osmanović, Čvrstoća i trajnost cementnih kompozita, Kemijskotehnološki fakultet, Split, 2014.
6. F. Pacheco Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, J. Ding and J. de Brito, Handbook of recycled concrete and demolition waste, Woodhead publisher limited, Cambridge, 2013.
7. J. de Brito, N. Saikia, Recycled aggregate in concrete - Use of industrial, construction and demolition waste, Springer Science & Business Media, London, 2012.
8. I. Piljac, Senzori fizikalnih veličina i elektroanalitičke metode, Media print i Tiskara Hrastić, Zagreb, 2010.
9. Tehnička uputa za rasuti cement *CEM I 42,5 R*, CEMEX Hrvatska, 2014.
10. Tehničko upustvo za korištenje konduktometra *MA 5964.*, ISKRA, 1985.
11. H. F. W. Taylor, Cement Chemistry, 2nd edition, Thomas Telford Publishing, London, 1998.