

Pregled razvoja cementa i betona

Grgurev, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:437018>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ EKOINŽENJERSTVA

Ivan Grgurev

PREGLED RAZVOJA CEMENTA I BETONA
OVERVIEW OF THE DEVELOPMENT OF CEMENT AND CONCRETE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Nevenka Vrbos

Članovi ispitnog povjerenstva:

izv. prof.dr.sc. Nevenka Vrbos

prof.dr.sc. Juraj Šipušić

v.pred.dr.sc. Lidija Furač

Zagreb, rujan 2017.

Sadržaj:

Sažetak

Summary

1. Uvod.....	1
2. Opći dio.....	2
2.1. Povijest razvoja cementa.....	2
2.1.1. Nastanak cementa.....	3
2.1.2. 17. i 18. stoljeće.....	4
2.1.3. 19. stoljeće.....	5
2.1.4. 20.stoljeće.....	8
2.2. Cement.....	9
2.2.1. Oznake spojeva u kemiji cementa.....	10
2.2.2. Proizvodnja cementa.....	11
2.2.3. Silikatni cement- Portland cement.....	12
2.2.4. Primjer proizvodnje cementa u Našicecementu.....	14
2.2.5. Aluminatni cement.....	19
3. Povijest razvoja betona.....	21
3.1. Beton.....	21
3.2. Procvat proizvodnje betona u 19. stoljeću.....	22
3.3. Interes za armiranobetonske konstrukcije.....	24
3.4. Otkriće predgotovljenih betonskih elemenata.....	25
4. Objašnjenje o očuvanosti rimskog betona.....	26
5. Zaključak.....	27
6. Literatura.....	28
7. Životopis.....	29

Zahvaljujem se svojoj mentorici dr.sc. Nevenki Vrbos na pomoći i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Najveće hvala mojoj prijateljici Ani Peranić što je bila uz mene kroz sve moje godine studiranja, njoj ide dio zasluga od moje diplome, čestitke na izdržavanju moje malenkosti u svim fazama i oblicima.

Veliko hvala mojim prijateljima Anti Zdriliću, Kristini Haviđić i Anamariji Mitar na svojoj pomoći i svom svojem slobodnom vremenu koje su dali za mene.

Hvala mojim prijateljima Luki, Dini, Mislavu i Matei i ostalima što su mi bili podrška.

Zahvala obitelji koja je proživljavala sa mnom sve moje studentske dane, u trenucima kada sam i sam sebi bio nepodnošljiv, oni su me podnosili.

Hvala FKIT-u što mi je pružio nezaboravan osjećaj bivanja maskote fakulteta.

Sažetak:

Značajne promjene su se dogodile posljednjih sedamdesetak godina u pogledu tipa i svojstava betona i njegovih sastavnih dijelova. Istraživanja su dovela do gotovo potpunog razumijevanja svojstava betonskih materijala, kao što su cement i agregati, kao i efekata koje ovi materijali imaju na karakteristike svježeg i očvrslog betona.

Cement je osnovni i nezamjenjivi građevni materijal, dok je beton danas najšire upotrebljavani konstrukcijski materijal.

Želja za napretkom je prirodna, ali takvim načinom rada došlo je i do brzog iscrpljivanja prirodnih resursa te ugrožavanja okoliša. Stoga briga za okoliš postaje nužnost za budućnost.

U ovom radu smo htjeli dati pregled razvitka cementa i betona kroz godine.

Ključne riječi: povijest cementa i betona, portland cement, cementni klinker, armirani beton

Summary:

Significant changes have taken place over the past seventy years in terms of the type and properties of concrete and its constituent parts. The research has led to almost complete understanding of the properties of concrete materials, such as cement and aggregates, as well as the effects these materials have on the characteristics of fresh and hardened concrete.

Cement is a basic and irreplaceable building material, while concrete is today the most widely used construction material.

The desire for progress is natural, but such a way of working has also resulted in rapid depletion of natural resources and environmental endangering. Environmental care therefore becomes a necessity for the future.

In this paper we wanted to give an overview of the development of cement and concrete throughout the years.

Key words: cement, concrete, portland cement, cement clinker, reinforced concrete

1. Uvod

Povijest razvoja cementa i betona seže 12 milijuna godina unazad pa sve do danas. Stari Rimljani su prvi počeli s izradom cementa pomoću vapnenca 300 godina p.n.e. i njihove građevine su se zadržale sve do danas. Englez Joseph Aspdin u 19. stoljeću izumio je portland cement i time pokrenuo revoluciju u svijetu građevinarstva. Par godina poslije njega, u inovativnosti mu se pridružio francuz Joseph Monier, žicom ojačajući lonce za cvijeće, došao je do ideje o željeznom armiranju betona.

Proizvodnja cementa ovisi o mineralnom sastavu sirovine, a on ovisi o kemijskom sastavu. Cementi se dijele u dvije skupine, silikatne i aluminatne. Glavni predstavnik iz silikatnih cemenata je portland cement. Mineralni sastav portland cementnog klinkera nam govori o kvaliteti cementa. Od proizvodnje u Hrvatskoj, vrijedi izdvojiti Našicecement d.d., koja je naša najmodernija i jedina kontinentalna cementara s proizvodnjom od preko milijun tona cementa godišnje.

Kroz povijest, razvoj betona je dobio pravi zamah tek u 19. stoljeću. S izumom čeličnih armatura beton je postao upotrebljiv na dotad potpuno nezamislive načine. Beton je mješavina cementa, agregata (šljunka i pijeska), vode i dodatka. Kombiniranjem svih potrebnih sastojaka, beton prolazi kroz procese očvršćivanja te dobiva određena svojstva od kojih su nama najbitnija tlačna i vlačna čvrstoća, veoma mala propusnost vode te kemijska i volumenska stabilnost.

Uspoređujući beton starih Rimljana i beton današnjice, velika je razlika u kvaliteti. Suvremene zgrade uglavnom se grade tako da traju 100-tinjak godina. Lošije građene zgrade od suvremenog betona znaju se početi raspadati već nakon 30-ak godina, poznato je da brojne rimske građevine traju već više od 2.000 godina. Razlika je u sastavu cementne sirovine.

2. Opći dio

2.1. Povijest razvoja cementa

Sama riječ «cement» seže duboko u povijest čak do rimskih vremena. Tada se koristio pojam «opus caementitium» kojim se opisivala zidarska tvorevina nalik betonu, koja se izrađivala od otpadnog kamena i gdje je vezivni materijal bio gašeno vapno. Kasna antika uzdrmana je mnogim migracijskim procesima i društvenim katastrofama koji su ubrzo uslijedili što je dovelo do gubitka znanja o rimskoj gradnji, zajedno sa svojim «opus caementium»^[1].

2.1.1. Nastanak cementa

Cement je nastao prije najmanje 12 milijuna godina. Prirodni se cement stvarao dok je Zemlja prolazila kroz razdoblje intenzivnih geoloških promjena. Ljudi su na početku koristili upravo taj prirodni cement, a s vremenom su otkrili i kako napraviti cement iz drugih materijala^[1].

12.000.000 g. p.n.e.

Na prostoru današnjeg Izraela odvale su se reakcije između vapnenca i uljnog škriljca pri spontanom sagorijevanju te su tako nastala ležišta cementnih spojeva. Ležišta su pronašli izraelski geolozi tijekom 1960-ih i 1970-ih godina.

3000. g. p.n.e.

Egipćani su koristili blato pomiješano sa slamom kako bi povezali osušene cigle. Pri izgradnji piramida koristili su žbuku od gipsa i vapna.

Kinezi su koristili cementni materijal za povezivanje bambusa za brodove i pri izgradnji Kineskog zida.

800. g. p.n.e.

Grčka, Kreta i Cipar su koristili žbuku od vapna koja je bila puno čvršća od kasnije rimske žbuke.

300. g. p.n.e.

Babilonci i Asirci- koristili bitumen za povezivanje kamenja i cigli.

300. g. p.n.e. – 476. n.e.

Rimljani su koristili pozzolanski cement iz Pozzuolija, pokraj Vezuva, za izgradnju Apijske ceste, rimskih toplica, rimskog amfiteatra i Panteona te akvadukta Pont du Gard u južnoj Francuskoj. Koristili su vapno kao cementni materijal.

Plinije je zabilježio kako je mješavina žbuke sadržavala vapno i pijesak u omjeru 1:4.

Vitruvije navodi omjer pozzolanskog pijeska i vapna od 2:1.

Životinjska mast, mlijeko i krv koristili su se kao aditivi (tvari koje se dodaju cementu za poboljšanje svojstava). Te građevine postoje još i danas!

1200. – 1500.

U Srednjem vijeku smanjena je kvaliteta cementnih materijala. Upotreba živog vapna i pozzolana (mješavine s aditivima) bila je izgubljena, ali je ponovo uvedena u 14. stoljeću.

2.1.2. 17. i 18. STOLJEĆE

1678.

Joseph Moxon piše o skrivenoj vatri u zagrijanom vapnu koja se pokazuje kada se doda voda.

1779.

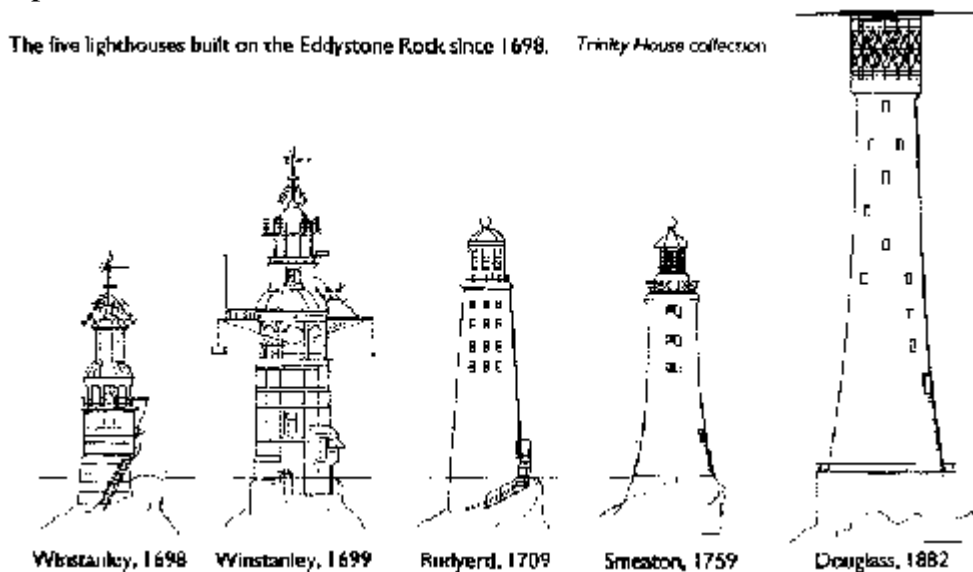
Bry Higgins izdao patent za hidraulični cement (žbuku) za vanjsko žbukanje.

1780.

Bry Higgins objavljuje knjigu „Experiments and Observations Made With the View of Improving the Art of Composing and Applying Calcereous Cements and of Preparing Quicklime“ (Pokusi i opažanja u pogledu poboljšanja umijeća sastavljanja i primjene sedrenih cementa i pripreme živog vapna).

1793.

John Smeaton otkriva da se pečenjem vapnenca koji sadrži glinu dobiva vapno koje može očvrnuti i pod vodom (hidraulično vapno). Koristio je hidraulično vapno za obnovu svjetionika Eddystone (slika 1.) u Cornwallu u Engleskoj. Određen je za izvođača 1756., ali je prvo morao izumiti materijal otporan na vodu. O svom je radu napisao knjigu.



Slika 1. Obnova svjetionika Eddystone kroz godine.

1796.

Englez James Parker patentira prirodni hidraulični cement dobiven pečenjem grumenja nepročišćenog vapnenca koji sadrže glinu. To je poznato kao Parkerov cement ili rimski cement^[1].

2.1.3. 19. STOLJEĆE

1802.

U Francuskoj se koristi sličan proces kao i Parkerov radi dobivanja rimskog cementa.

1810.

Edgar Dobbs registrira patent za hidrauličnu žbuku, koja je nažalost bila loše kvalitete zbog nepravilnog pečenja.

1812. -1813.

Francuz Louis Vicat priprema umjetno hidraulično vapno pečenjem sintetskih mješavina vapnenca i gline.

1818.

Maurice St. Leger registrira patente za hidraulični cement. U SAD-u proizveden prirodni cement – vapnenac koji prirodno ima odgovarajući sadržaj gline te daje istu vrstu betona koju je otkrio John Smeaton.

1820. – 1821.

John Tickell i Abraham Chambers registriraju dodatne patente za hidraulični cement.

1822.

Englez James Frost priprema umjetno hidraulično vapno slično Vicatovom i naziva ga britanskim cementom.

1824.

Englez **Joseph Aspdin** izumio portland cement pečenjem fino mljevene krede s glinom u prahu u peći za vapno, sve do odstranjivanja ugljikovog dioksida. Nakon toga je samljeo sinterirani proizvod i nazvao ga portland cement (slika 2.), prema visokokvalitetnom kamenu iz Portlanda u Engleskoj^[1].



Slika 2. Usporedba mljevenog portland cementa i kamena iz Portlanda.

1828.

I. K. Brunel prvi primijenio portland cement u građevini, za popunjavanje pukotina u tunelu ispod Temze.

1830.

Prva proizvodnja vapna i hidrauličnog cementa u Kanadi.

1836.

Prvi sistematični pokusi vlačne i tlačne čvrstoće u Njemačkoj.

1843.

Tvrtka J. M. Mauder, Son & Co. Licencirana za proizvodnju patentiranog portland cementa.

1845.

Isaac Johnson tvrdi da je sirovine iz portland cementa uspio spaliti na temperaturama za proizvodnju klinkera.

1849.

Pettenkofer i Fuches obavili prvu preciznu kemijsku analizu portland cementa.

1860.

Početak ere portland cementa suvremenog sastava.

1862.

Englez Blake Stonebreaker predstavio drobilice za klinker.

1867.

Francuz Joseph Monier ojačao lonce za cvijeće Amerikanca Williama Wanda pomoću žice i tako uveo ideju **željeznih armatura**.

1871.

David Saylor registrirao prvi američki patent za portland cement. Pokazao važnost proizvodnje pravog cementnog klinkera.

1880.

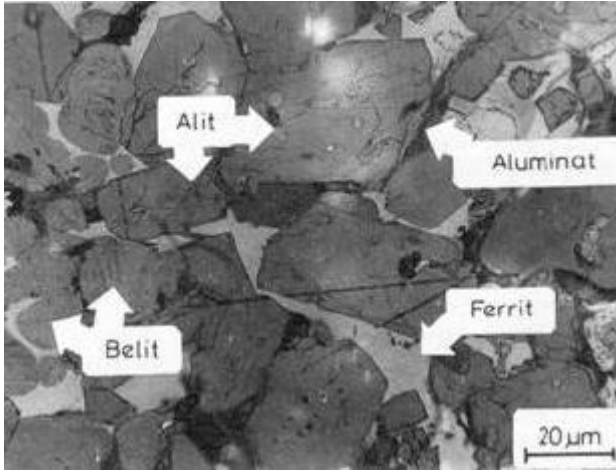
Englez J. Grant pokazao važnost korištenja najčvršćih i najgušćih dijelova klinkera. Glavni su se sastojci kemijski analizirali.

1886.

Prva rotacijska peć predstavljena u Engleskoj i zamijenila peći s okomitom osovinom^[1].

1887.

Francuz Henri Le Chatelier odredio je omjer oksida radi pripreme pravilne količine vapna za proizvodnju cementa. Komponente je nazvao ovako: alit (trikalcij silikat), belit (dikalcij silikat) i celit (tetrakalcij aluminoforit) (slika 3.). Ustvrdio je kako očvršćivanje nastaje formiranjem kristalnih proizvoda reakcije cementa i vode.



Slika 3. Mikroskopski prikaz alita, belita i celita.

1889.

Izgrađen prvi most od armiranog betona.

1890.

Dodavanje gipsa pri mljevenju klinkera za usporavanje otvrdnjivanja betona prvi put obavljeno u SAD-u. Okomite peći zamijenjene rotacijskima i uveden kuglični mlin za mljevenje cementa.

1891.

George Bartholomew postavio prvu betonsku ulicu u SAD-u, u gradu Bellefontaine u Ohiju. Postoji još i danas!

1893.

William Michaelis ustvrdio da hidratizirani metasilikati tvore želatinoznu masu (gel) koji tijekom vremena dehidrira i otvrdne^[1].

2.1.4. 20. STOLJEĆE

1900.

Standardizirani osnovni testovi na cementu.

1903.

Prva betonska višekatnica izgrađena u Cincinnatiju u Ohiju.

1908.

Thomas Edison izgradio jeftine i udobne betonske kuće u gradu Union u New Jerseyu. Postoje još i danas!

1909.

Thomas Edison registrirao patent za rotacijske peći.

1929.

Amerikanac Dr. Linus Pauling postavio skup načela za strukture složenih silikata.

1930.

Uvedene tvari za stvaranje mjehurića zraka u cementu kako bi se poboljšala otpornost na oštećenja nastala smrzavanjem, odnosno otapanjem leda.

1936.

Izgrađene prve velike betonske brane, Hooverova i brana Grand Coulee. Postoje još uvijek!

1956.

Američki kongres donio zakon o federalnoj međudržavnoj autocesti.

1967.

Prva sportska građevina s betonskom kupolom, Assembly Hall, izgrađena na Sveučilištu u Illinoisu, u urbanom području Urbana-Champaign.

1970.

Prvi put uvedeno ojačavanje cementa vlaknima.

1975.

Izgrađen CN toranj u Torontu u Kanadi, najviša zgrada izgrađena lijevanjem cementa u pomične forme. Izgrađena najviša zgrada, Water Tower Place u Chicagu.

1980.

Prvi put uvedeni superplastifikatori kao aditiv cementu.

1985.

Prvi put uveden silikatni prah kao pozzolanski aditiv. Beton „najviše čvrstoće“ upotrijebljen u izgradnji Union Plaze u Seattleu.

1992.

Izgrađena najviša zgrada od armiranog betona, na adresi S. Wacker Dr. 311 u Chicagu^[1].

2.2. Cement

Cement je praškasti materijal koji pomiješan s vodom tvori cementnu pastu. Kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima cementna pasta prelazi u očvrslu cementni kamen. Time razvija svoja kohezijska i adhezijska svojstva koja omogućuju da poveže zrna stijena i minerala u kontinuiranu, čvrstu masu betona^[2].

U procesu transformacije od osnovnih sirovina (gline i vapnenca) do cementne paste postoje dvije odvojene faze kemijskih promjena. U prvoj fazi, proizvodnji, sirovine se sinteriraju pri čemu nastaju spojevi cementa, a u drugoj fazi, hidrataciji, cement kao dio betonske mješavine hidratizira da bi tvorio očvrslu ili hidratiziranu cementnu pastu.

Podjela cementa

Prema kemijskom sastavu cement dijelimo na dvije skupine:

- Silikatni cementi dobivaju se pečenjem lapora i vapnenca. Najznačajniji iz skupine silikatnih cementa je portland cement, koji služi i kao baza za proizvodnju metalurških, pucolanskih i supersulfatnih cementa. Jedna od vrsta portland cementa je i bijeli cement koji se dobiva pečenjem kaolina i vapnenca.
- Aluminatni cementi dobivaju se pečenjem boksita i vapnenca, koriste se pri izradi vatrostalnih betona, kao i pri betoniranju na vrlo niskim temperaturama^[2].

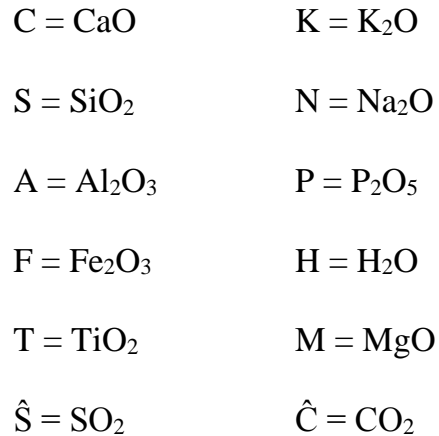
Osim tih vrsta cementa, možemo ga podijeliti i s obzirom na tehnička svojstva kao i na zahtjeve koji se odnose na krajnju namjenu:

- Cement opće namjene
- Cement sa zgurom niskih početnih čvrstoća
- Cement opće namjene niske toplinske hidratacije
- Posebni cement vrlo niskih toplina hidratacije
- Bijeli cement
- Sulfatno otporni cement
- Aluminatni cement

2.2.1. Oznake spojeva u kemiji cementa

U kemiji cementa uobičajeno označavanje spojeva izvodi se pomoću kratica za pojedine okside koji tvore te spojeve.

Oznake glavnih oksida su:



Na temelju skraćenih simbola kemijski sastav pojedinih osnovnih sastojaka i hidrata pišemo^[3]:



2.2.2. Proizvodnja cementa

Proizvodnja se osniva na uspostavljanju i održavanju što je moguće više točnih odnosa između bazičnih i kiselih komponenti sirovine, njihovog mljevenja, pažljivog miješanja i pečenja do sinteriranja na temperaturi od 1400 do 1450°C. Za vrijeme pečenja dolazi do gubitka oko 1/3 početne mase.

Osnovne sirovine za proizvodnju cementa su lapori s povećanim udjelom karbonata, te glineni pijesci pri čemu su minerali glina iz frakcije nositelji oksida Si, Al i Fe. Prema načinu prerade sirovine razlikuju se 4 glavna tehnološka procesa proizvodnje u industriji cementa: suhi, polusuh, polumokri i mokri.

U suhom postupku sirovinska mješavina oksida iz koje se dobiva klinker odlazi na termičku obradu u obliku fino samljevenog praha tzv. sirovinskog brašna. Prije ulaska u rotacijsku peć, gdje nastaje klinker, homogenizira se u silosu za homogenizaciju i zagrijava u izmjenjivaču topline gdje se odvija i kalcinacija. Ugradnjom predkalcinatora u izmjenjivač topline smanjuju se troškovi proizvodnje, a također je moguće povećati kapacitet.

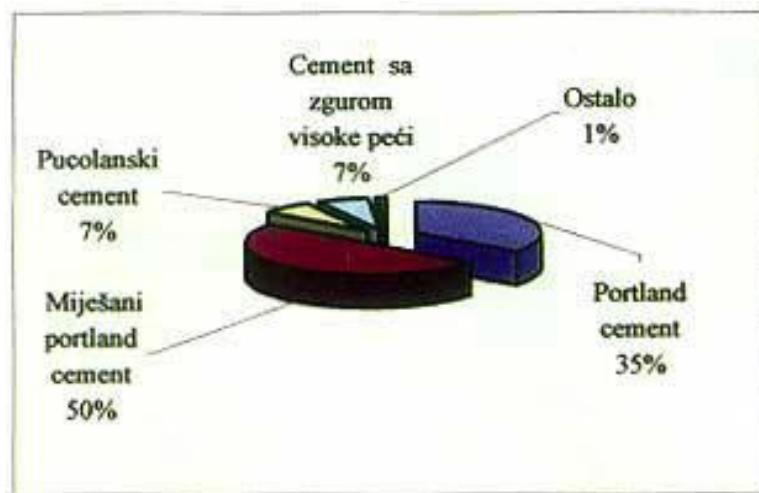
Kod polusuhog postupka sirovinsko brašno se prevodi u kuglice sa 10 – 20 % vode i ubacuje u horizontalni sustav predgrijača ispred rotacijske peći gdje se kuglasti materijal suši, predgrijava i djelomično kalcinira. Izlazni plinovi peći ne mogu se koristiti pri sušenju i mljevenju zbog niske temperature.

U polumokrom postupku sirovinskom mulju se uklanja voda u filtarskim prešama. Proizvodi se filtarski kolač, sa sadržajem vlage 16 - 21 %, koji se drži u privremenim skladištima prije ubacivanja u drobilice i sušare gdje se proizvodi sirovinsko brašno.

Kod mokrog postupka ulazni materijal sadrži oko 28 – 43 % vode koja se sirovini dodaje u mlinu tako da nastaje sirovinski mulj. Homogenizacija se postiže u posebnom bazenu za mulj gdje komprimirani zrak miješa mulj. Mulj se pumpa u rotacijsku peć. Kemijske primjene se zbivaju postupno u pojedinim dijelovima peći ovisno o temperaturi koja na tom dijelu vlada. Voda isparava u zoni sušenja, a zatim se materijal pomiče prema zoni sinteriranja da bi se ispekao klinker. Nedostatak ovog postupka je velika potrošnja energije i veliki volumen plina nastalog sagorijevanjem^[3].

2.2.4. Silikatni cement- Portland cement

Danas se nazivom cement obično označuje vezivna komponenta u nekom kompozitnom materijalu, a kao sinonim se često koriste i nazivi beton ili mort, iako su potonji samo produkti miješanja cementa, agregata, vode i drugih sastojaka. Kada se pak govori o uporabi, daleko najveći udio na tržištu ima portland cement (po podacima iz 2000. godine za države Europske unije, ta se brojka kreće oko 35% za čisti portland-cement, uz dodatnih 50% za miješani portland-cement, slika 4.), a u manjoj se mjeri koriste i bijeli cement, aluminatni cement, metalurški cement, pucolanski cement, magnezij-oksikloridni cement i nekoliko drugih, novijih vrsta, koje su još uvijek u stadiju prilagodbe i pozicioniranja na tržištu^[3].

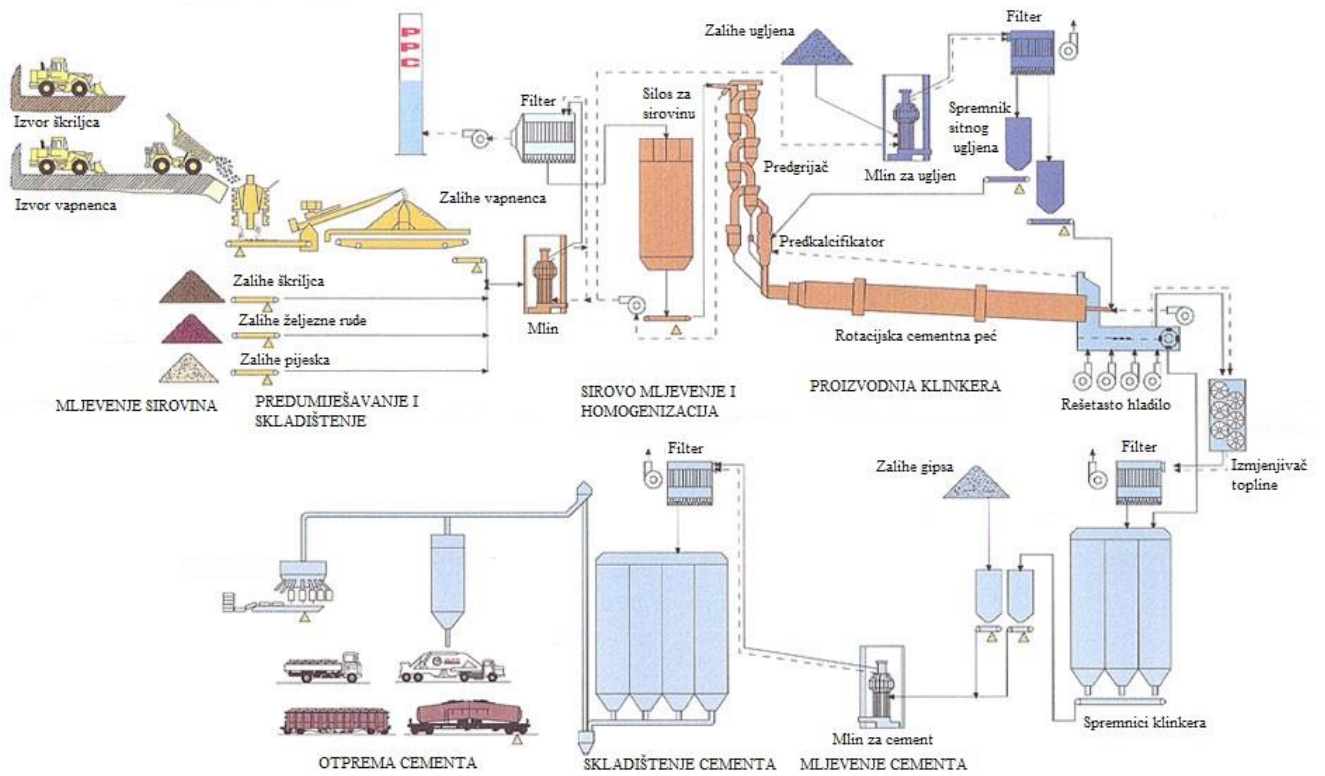


Slika 4. Proizvodnja cementa po tipovima za zemlje EU 2000^[3].

Obični se portland-cement prema američkoj normativnoj specifikaciji ASTM C 150-94 definira na sljedeći način: „Portland-cement je hidraulički cement proizveden mljevenjem u prah klinkera, koji se sastoji uglavnom od hidrauličkih silikata, a obično sadrži jedan ili više oblika kalcijeva sulfata dodanih u tijeku meljave.“

Europske norme za cement, koje i mi u Hrvatskoj slijedimo, naznačene su specifikacijom EN 197-1³, a portland-cement svrstavaju u istu kategoriju kao i druge vrste cemenata, te ih zajedno definiraju na sljedeći način: „Cement je hidrauličko vezivo, što znači fino mljeveni anorganski materijal koji, pomiješan s vodom, daje cementno vezivo koje procesom hidratacije veže i otvrdnjava, te nakon otvrdnjavanja ostaje postojane čvrstoće i stabilnosti čak i ispod vode.“

Proizvodnja portland cementa je vrlo složen proces (Slika 5.), koji se odvija u nekoliko različitih stupnjeva te započinje pretvorbom početne sirovine u portland-cementni klinker, a završava nastankom cementne paste^[4].



Slika 5. Postupak proizvodnje portland-cementa.

2.2.3. Primjer proizvodnje cementa u Našicecementu

U Našicecementu klinker se proizvodi suhim postupkom proizvodnje. Našicecement d.d. (slika 6.) je najmodernija i jedina kontinentalna cementara u Hrvatskoj, te druga po veličini, s godišnjom proizvodnjom od preko 1 milijun tona cementa^[4].



Slika 6. Prikaz tvornice Našicecement d.d.^[5]

Sirovine se eksploatiraju sa dva površinska kopa: Bukova glava (slika 7.) i Vranići (slika 8.). Vapnenci i lapori bogati kalcijevim karbonatom čiji je tvornički naziv visokokarbonatna sirovina(dalje VK) dopremaju se do kopa Bukova glava. Glinoviti pijesci bogati su silicijem, aluminijem i željezom i njihov tvornički naziv je niskokarbonatna sirovina (dalje NK), a dopremaju se sa kopa Vranići. Izbor otkopnog mjesta vrši se na temelju kemijske karte kvalitete prema kojoj je moguće dugoročno planirati eksploataciju. Na izabranom mjestu vrši se direktna eksploatacija sirovine ukoliko je to moguće, odnosno utovar nakon izvršenog bušenja i miniranja^[4].



Slika 7. Površinsko ležište vapnenca Bukova glava.



Slika 8. Površinsko glinsko ležište Vranići.

VK je primarna komponenta, koja čini oko 90% sastava sirovinske smjese. VK sirovina se u Našicecimentu drobi u valjkastoj drobilici do potrebne veličine čestica. NK sirovina je korektivna komponenta koja se drobi u manjoj drobilici sa čekićima. Korekcija materijala vrši se dodavanjem NK sirovine VK sirovini prije ulaska u drobilicu i/ili promjenom omjera miješanja komponenata utovarom sa više otkopnih mjesta, tako da se svake minute dobiva podatak o kemijskom sastavu sirovine koja je deponirana u depo halu. Kao ključni parametri prate se prosječno sadržaji CaCO_3 , H_2O , SO_3 , stupanj zasićenja, silikatni i aluminatni modul u količini VK koja je ušla u haldu, te trenutno odstupanje od zadanog^[4].



Slika 9. Depo hala u tvornici Našicecement d.d.

Depo hala (slika 9.) podijeljena je na tri halde. Dvije halde se pune i prazne naizmjenice VK sirovinom, a treća prethodno osušenom NK sirovinom. U depo hali se vrši predhomogenizacija (nasipavanje vodoravno, oduzimanje okomito).

Nakon predhomogenizacije sirovina se transportira u sušaru gdje se suši do potrebne vlažnosti. Kao energent za plamenik sušare koristi se zemni plin, a također se iskorištavaju i otpadni plinovi iz rotacijske peći. Vrući plinovi i sirovina u sušari se miješaju istosmjerno. Prosušena VK i NK sirovina doziraju se u predsušaru mlina. Miješaju se u točno određenim i dobro kontroliranim omjerima kako bi se postigao željeni kemijski sastav sirovinskog brašna. Omjer miješanja sirovina ovisi o materijalu sirovine, procesu i zahtjevima procesa te zahtjevima za proizvodom^[4].

U mlinu se sirovina potpuno osuši i samelje u fino sirovinsko brašno. U nekim cementarama npr. Našicecementu se koristi dvokomorni kuglični mlin. Da bi se iz sirovinskog brašna proizveo klinker ujednačene kvalitete uz kontinuiran rad peći, potrebno je da sirovinsko brašno ima određenu finoću i da bude dovoljno homogenizirano u kemijskom pogledu

Samljevena sirovina se u dinamičkom separatoru mlina sirovine odvaja na grubo i fino samljevenu. Grubo samljevana sirovina vraća se natrag u mlin, a fino samljevana se odvodi u ćelije silosa za homogenizaciju sirovinskog brašna. U višem dijelu silosa nalazi se 7 ćelija, a donji dio je prostor u koji se istovremeno iz više ćelija ispušta sirovinsko brašno kako bi se postigla što bolja homogenizacija.

Proizvodnja klinkera

Dobro homogenizirano sirovinsko brašno, jednoličnog kemijskog sastava, prolazi kroz izmjenjivač topline u kojemu toplina vrućih plinova iz rotacijske peći protustrujno prelazi na sirovinsko brašno koje na taj način ulazi zagrijano u peć. Često se koristi izmjenjivač topline s predkalcinatorom. Sastoji se od 1 dvojnog i 3 jedinična ciklona. Između 3. i 4. ciklona nalaze se dva plamenika na kojima izgara oko 60 % ukupne količine goriva, a ostatak izgara na plameniku peći. U predkalcinatoru se sirovinsko brašno još više zagrijava i velikim dijelom dekarbonatizira (otpuštanje CO_2 iz CaCO_3 na $850\text{--}900^\circ\text{C}$). Preostala toplina u plinovima na izlazu izmjenjivača, koristi se pri sušenju u sušari i mlinovima sirovine i ugljena. Upotrebom predkalcinatora smanjuju se troškovi i povećava se kapacitet proizvodnje. Nakon izmjenjivača sirovinsko brašno ulazi u rotacijsku peć. Kako bi se postigla ustaljena kvaliteta cementnog klinkera moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti:

- temperatura
- propisana finoća mljevenja, vlažnost i homogenost sirovinskog brašna
- kontinuirano doziranje peći s količinom koju pogon može ispeći.

Rotacijska peć, promjera 4.4 m i duljine 70 m, blago je nagnuta (3 – 4 % od horizontale) i okreće se brzinom od 1 – 4 okretaja u minuti. Materijal ulazi na višem dijelu te klizi kroz peć. Temperatura u peći raste prema izlazu, gdje je instaliran glavni plamenik koji kao energent koristi ugljenu prašinu. U procesu sinteriranja na temperaturi od 1200°C do 1450°C minerali sirovine tvore kristale minerala klinkera. Vrući cementni klinker u obliku kuglica ispada iz peći i ubrzano se hladi okolišnim zrakom u roštiljnom hladnjaku na oko 100°C . Brzo hlađenje klinkera je potrebno da bi se konstituenti klinkera zadržali u kristalnoj formi koja ima najbolja hidraulička svojstva^[5].

Ohlađeni klinker se skladišti i čuva u tri silosa. On je glavna komponenta u proizvodnji cementa.

U mlinu cementa cementni klinker se melje u fini prah. Pri mljevenju se dodaje oko 5% prirodnog ili umjetnog gipsa koji služi za kontrolu brzine vezivanja, a od ostalih dodataka zgura, leteći pepeo, prirodni pucolan (tuf) i vapnenac. Potrebno je odmah istaknuti da željene karakteristike finalnog proizvoda (gotovog cementa) ponajprije zavise o vrsti i količini dodataka cementu, kao i o finoći obrade samog samljevenog cementa. Sa depoa dodataka dodaci se izuzimaju, miješaju, prema potrebi suše u sušari dodataka i transportiraju do bunkera mlinova cementa^[5].

U zadanom omjeru klinker i dodaci se preko vaga doziraju u mlinove cementa. Obično tri cijevna dvokomorna mlina sa kuglama melju komponente u cement. Cement odgovarajućeg sastava i finoće, transportira se i skladišti u odgovarajuće označene silose. Uskladišteni cement propisno se izuzima prilikom otpreme. Cement se otprema kamionima, uvrećan na paletama u vrećama od 25 kg i 50 kg ili u rasutom stanju^[5].

Mineralni sastav portland cementnog klinkera

Glavni sastojci portland cementnog klinkera su:

Trikalcij-silikat (C_3S) = alit – nastaje pri visokim temperaturama ($>1250^\circ C$) reakcijom C_2S i CaO uz male količine primjesa (Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O). Alit je glavni i najzastupljeniji mineral portland cementnog klinkera. Njegova karakteristika je da brzo otvrdnjava pa o njemu ovisi čvrstoća cementa. Stabilan je na temperaturama između 1250 i $1900^\circ C$, a na nižim temperaturama raspada se na C_2S i CaO . Poznato je čak 7 polimorfni modifikacija čistog C_3S .

Dikalcij-silikat (C_2S) = belit – najmanje je značajan sastojak portland cementnog klinkera jer ga ima puno manje nego alita. Vrlo sporo otvrdnjava i veže, te prilikom hidratacije razvija malo topline. Poznato je 5 polimorfni modifikacija.

Tetrakalcij-aluminat-ferit (C_4AF) – kristalizira u rompskom sustavu. Prilikom hidratacije razvija toplinu te reagira brzo, ali ipak ne toliko brzo kao trikalcij-aluminat. Ima ulogu topitelja i korigira loša svojstva alita.

Trikalcij-aluminat (C_3A) – prilikom hidratacije razvija puno topline i brzo veže te je stoga važan za postizanje ranih čvrstoća cementa. Nema polimorfni modifikacija^[4].

2.2.5. Aluminatni cement

Aluminatni cement je proizvod koji se dobiva finim mljevenjem aluminatnog cementnog klinkera, koji se dobiva pečenjem vapnenca (oko 40%) i boksita (oko 60%). Osnovni oksidi aluminatnog cementa su CaO , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{FeO})$, a kao prateći sastojci SiO_2 , TiO_2 , MgO i alkalije. Aluminatni cement je otporan na alkalijske otopine, razvija vrlo visoke čvrstoće unutar 24 sata te je otporan i na sulfate.

Pored veće otpornosti aluminatni cement razvija vrlo visoku energiju hidratacije pa se prilikom njegove uporabe oslobađaju znatne količine topline. Toplina hidratacije je egzoterman proces i količina topline po gramu nehidratiziranog cementa, koja se oslobodi tijekom toga procesa naziva se topline hidratacije. Može se odrediti mjerenjem temperature uzorka cementne paste tijekom hidratacije u adijabatskom kalorimetru. To je tzv. određivanje topline hidratacije metodom termos boce. Toplina hidratacije može se odrediti i kemijskim postupkom, metodom otapanja. Ukupna količina topline cementa približno je jednaka zbroju toplina hidratacije njihovih konstituenata, tako da je moguće iz poznatog mineralnog sastava procijeniti njegovu toplinu hidratacije^[4].

Mineralni sastav aluminatnog cementnog klinkera

Glavna komponenta aluminatnog cementa je monokalcij-aluminat (CA)

- **monokalcij-aluminat, CA** – najvažniji mineral u aluminatnom cementu i nositelj visoke početne čvrstoće. Proces prekrystalizacije CA odvija se brzo, što dovodi do brzog očvršćivanja betona.
- **monokalcij-dialuminat, CA₂** – javlja se zbog nehomogenosti taline. Reakcija s vodom je slaba, no pospješuje se s otopinom viših pH vrijednosti (tzv. vapnenom vodom), a s time raste i čvrstoća.
- **dikalcij-silikat, C₂S** – postoji u α , β , γ modifikacijama, no u aluminatnom cementu se javlja kao β -C₂S (belit). Sporo hidratizira pa hidrauličkim svojstvima betona pridonosi u kasnijoj fazi očvršćivanja, tek nakon mjesec dana postiže 1/10 konačne čvrstoće.
- **dikalcij-alumosilikat, C₂AS** – naziva se još i gelenit. Reagira vrlo sporo s vodom, a hidratacija se pospješuje u alkalnim otopinama (vapnena voda). U aluminatnom cementu se ne nalazi čist već sadrži primjese magnezijevih i željeznih oksida.
- **trikalcij-aluminat, C₃A** – ima veliku ulogu u vezanju i ranom očvršćivanju aluminatnog cementa. U početku C₃A s vodom reagira vrlo brzo nakon čega slijedi razdoblje polagane reakcije.
- **dodekalkcij-heptaaluminat, Ca₁₂Al₁₄O₃₃** – u prirodi se nalazi kao mineral majenit. Kada je prisutan u aluminatnom cementu u malim količinama doprinosi brzom vezanju. U većim količinama nepovoljno djeluje na čvrstoću cementne paste^[4].

3. Povijest razvoja betona

3.1. Beton

Beton je mješavina cementa, agregata (šljunka i pijeska), vode i dodatka. Pijesak i zrnje stijena čine agregat ili granulat. Voda izaziva reakciju s cementom te kemijskim procesom hidratacije nakon miješanja i ugradnje beton očvršćuje. U modernoj tehnologiji osim tih sastojaka, često se upotrebljavaju dodaci betonu ili aditiv, a u smjesi je uvijek prisutan i zrak. Tijekom procesa očvršćivanja beton razvija određena svojstva od kojih su najbitnija tlačna i vlačna čvrstoća, veoma mala propusnost vode te kemijska i volumenska stabilnost^[2].

Vrste betona: svježi beton, pumpani beton, prepakt beton, vakumirani beton, mlazni beton, valjani beton, specijalni betoni (lagani, teški, tekući i vatrobeton).

Danas se u svijetu proizvodi više od šest milijardi kubika betona čiji sastav ovisi o vrsti konstrukcije u koju se ugrađuje i o načinu ugradnje. Pritom treba znati da u novije vrijeme na Kinu otpada gotovo 45 posto svjetske proizvodnje cementa.

Povijest razvoja betona do 19. stoljeća opisana je kroz povijest razvoja cementa.

3.2. Procvat proizvodnje betona u 19. stoljeću

Padom Rimskog Carstva je proizvodnja ovog specifičnog građevinskog materijala zaboravljena sve dok kotač povijesti ponovno nije pokrenut u 19. stoljeću u Engleskoj (1844.) te nešto kasnije i u Francuskoj. No, prava je revolucija definitivno započela kada je beton **armiran čeličnim šipkama** (slika 10.). Tako ojačan, armirani je beton postao upotrebljiv i u onim segmentima gradnje o kojima graditelji do tada nisu ni sanjali^[6].



Slika 10. Beton ojačan armiranim čeličnim šipkama.

U samim počecima beton je doživljavao kao slobodan materijal koji omogućava nove forme, no bilo je potrebno još neko vrijeme kako bi se usavršile metode proračuna. Za drvenu gredu stropa je bilo dovoljno proračunati krak sila, za proračun ravne betonske ploče trebalo je znati parcijalnu diferencijalnu jednadžbu 4. reda.

Čelične šipke postavljene na područjima u kojima se očekuju vlačna i posmična naprezanja preuzele su na sebe ta djelovanja pa je potpunom proizvodu, armiranom betonu, povećana nosivost posebice na tlačna djelovanja. Današnji beton može biti obični, beton velike čvrstoće, beton ultravelike čvrstoće, samougradivi, mlazni...^[6]

Prva armirano-betonska zgrada na kojoj je novi materijal postao ujedno uz konstrukcijski element i element pročelja zgrade bila je stambena zgrada Augusta Perreta, Rue Franklin 25, Pariz. On je kao pionir upotrebe betona, projektirao je i crkvu Notre Dame u Le Raincyju kod Pariza i tada je po prvi put oblikovano pročelje kao lagana filigranska betonska rešetka, dok je nosivost građevine dobijena izvedbom stupova u unutrašnjosti objekta.

Novi materijal osvojio je mnoge. Iako ne bez osporavanja, beton su koristili i Frank Lloyd Wright u SAD-u (crkva Unity, Oak park, 1904.) i slovenski arhitekt i dizajner Jože Plečnik (kripta crkve Sv. Duha u Beču, 1910.) te Max Littman (Škola anatomije, München, 1906.).

Ali, kada je 1913. godine završena Milenijska dvorana Maxa Berga u poljskom Wroclawu (tada Breslau) koja je svojom kupolom nakon 18 stoljeća premašila kupolu Pantheona u Rimu bilo je jasno kako je beton materijal budućnosti bez konkurencije. Trideset i dva rebra poduprla su kupolu raspona 65 metara, a na vrhu se nalazio svjetlarnik. Bila je to prva reprezentativna građevina kojom iznutra i izvana u potpunosti dominira beton^[6].

3.3. Interes za armiranobetonske konstrukcije

Nagli porast interesa za armiranobetonske konstrukcije u graditeljstvu se nastavio i započeta je gradnja velikog broja objekata različitih oblika i namjena.

1914.

Le Corbusier je projektirao kuću Domino koja je imala AB elemente: stupove, ploče katova i stubište jednake za sve vlasnike stanova u zgradi. Sve ostalo je svaki pojedini korisnik mogao ispuniti s materijalima i na način prema svojim specifičnim željama.

1916.

Na aerodromu Orly u Parizu sagrađen je hangar za avione kao ljuska debljine 90 centimetra i raspona od 75 metara, autora Eugenea Freyssineta.

1921.

Einsteinov toranj u Postdamu Ericha Mendelsohna, primjer monolitne naglašenosti betona kao materijala.

1923.

Kubizam je u to vrijeme bio nova forma u slikarstvu koja se prelila i na arhitekturu, mnogi su projektanti slijedili taj trend, među njima i Mies van der Rohe s paviljonom Barcelona.

Međutim, smatra se kako je najviše domete s novim materijalom dosegno američki arhitekt Frank Lloyd Wright koji je beton poimao kao materijal u kojem tek treba pronaći medij izražavanja s obzirom na njegove velike konstrukcijske mogućnosti i plastičnu formu. Obiteljska kuća 'Nad slapovima' i mnoštvo poslovnih objekata diljem Amerike primjeri su takvog poimanja materijala.

1924.

Sagrađen je Planetarium u Jenni, projekt trojice autora Bauersfelda, Dyckerhoffa i Widmanna

Le Corbusier je i dalje eksperimentirao s betonom kao materijalom te ostavio za povijest arhitekture crkvu Notre Dame du Haut u Ronchampu. Ovu crkvu je projektirao i izveo 1965. godine i ona u potpunosti odudara od njegova projekta iz 1929. godine, čuvene vile Savoye.

Tako je beton kao materijal postao upotrebljiv na razne načine, ali i kao materijal kojim je moguće ostvariti nove socijalne i političke ideje tog vremena.

Korištenje betona omogućilo je projektantima slobodu rada na projektiranju, a investitorima avangardni izgled njihova doma^[6].

3.4. Otkriće predgotovljenih betonskih elemenata

Ekstravagantno umjetničko izražavanje tako je dobilo svoje mjesto pod suncem i u arhitekturi posebice nakon 2. svjetskog rata kada je pokret moderne u mnogim zemljama naišao na plodno tlo. Sve više su se cijenile značajke betona kao građevinskog materijala, posebice za zgrade javne namjene, velike sportske dvorane (Palazzetto dello Sport, Rim, Pier Luigi Nervi 1957. (slika 11.); dvorana u Tokiju, Kenzo Tange, 1964.), aerodromi (JFK u New Yorku, Eero Saarinen, 1962.), operne kuće (Sidney, Jorn Utzon 1973.) i nezamislivo veliki broj drugih objekata projektiran je i građen betonom. Jednostavni oblici su se i dalje razvijali, no korištene su i druge forme, zakrivljene i dinamičke plohe krovova i fasada, složeni geometrijski oblici do tada neviđeni (tzv. ljuske koje su omogućavale natkrivanje bez međuoslonaca) i drugo.

Mogućnost da se pojedini elementi pripreme u radionici i da se kao gotov element dopreme na gradilište, a to je beton kao materijal omogućavao u velikoj mjeri, spoznata je relativno kasno, polovicom 20. stoljeća, prvo u Njemačkoj, a kasnije i drugdje.



Slika 11. Palazzetto dello sport, Rim.

1967.

U Münchenu je sagrađena ljuska koja je prekrila 20 tisuća kvadrata prostora sve od predgotovljenih elemenata, a na sličan način započeta je i gradnja stambenih zgrada koja je bila brža i jednostavnija. Sve donedavno građevine više od 22 metra u pravilu su se izvodile od čelika. Zbog velike vlastite težine i male čvrstoće betona izmjere AB stupova bile su prevelike u odnosu na čelik. No, u posljednje vrijeme sagrađene su visoke građevine u SAD-u čvrstoća većih od 65 N/mm^2 , u Seattlu čak i do 131 N/mm^2 . To daje novu sliku na buduću gradnju betonom posebice u oblasti visokogradnje^[6].

4. Objašnjenje o očuvanosti rimskog betona

Suvremene zgrade uglavnom se grade tako da traju 60-ak godina, mostovi oko 120, a brane oko 250. No dok se lošije građene zgrade od suvremenog betona znaju početi raspadati već nakon 30-ak godina, poznato je da brojne rimske građevine traju već više od 2.000 godina. Štoviše, čini se da s vremenom postaju sve čvršće, a ne slabije.

Jedno novo istraživanje, objavljeno u časopisu *American Mineralogist* razotkrilo je ključne tajne čvrstoće rimskog betona. Prema studiji koju je proveo tim s University of Utah, rimski beton radio se od **mješavine vulkanskog pepela, vapna, odnosno kalcijeva oksida, morske vode i vulkanskog kamenja**. Za razliku od suvremenog betona, takva mješavina, kada se koristila za izgradnju luka, lukobrana i brana, u kontaktu s vodom postajala je sve čvršća. Znanstvenici tvrde da je ta činjenica posljedica kemijske reakcije morske vode s vulkanskim materijalima u kojoj se formiraju novi minerali koji jačaju beton^[7].

U sažetku svojeg rada autori ističu da je još Plinije stariji u prvom stoljeću naše ere isticao procese u kojima se vulkanski pepeo u kontaktu s morskom vodom pretvarao u jedinstvenu kamenu masu koja je svakim danom postajala sve snažnija. Voditeljica istraživanja Marie Jackson, geologinja s University of Utah, kaže da su rimski izumitelji betona bili vrlo inteligentni te da su u svoj rad uložili jako puno vremena.

Znanstvenici su još u ranijim studijama u rimskom betonu otkrili da su čestice vapna sadržavale rijedak aluminijev supstituirani **tobermorit**. U novom istraživanju Jackson i njezini suradnici otkrili su da se u strukturama betona formiraju veće količine tobermorita. U njemu morska voda prodire u beton, otapa vulkanske kristale i staklo, da bi na njihovom mjestu s vremenom kristalizirali tobermorit i filipsit.

S druge strane suvremeni beton, koji se temelji na portland cementu, ne mijenja se nakon što se stvrdne. To pak znači da reakcije u njemu uglavnom mogu uzrokovati oštećenja. „Mislim da istraživanje otvara potpuno novu perspektivu za izradu betona u kojoj možemo razmotriti procese korozije koji zapravo stvaraju iznimno koristan mineralni cement što će voditi do trajne otpornosti betona, zapravo možda čak i do njezina povećanja s vremenom“, kaže Jackson koja smatra da bi se rimski recept mogao koristiti pri gradnji struktura u moru^[7].

5. Zaključak

Nakon pridruživanja EU i usvajanjem europskih normi za cement pruža se mogućnost proizvodnje više vrsta cementa za različite namjene u proizvodnji cementa, a pri samoj proizvodnji betona. Prednosti takvih načina proizvodnje daju proizvodnji betona i cementa odlike održive tehnologije. Potrebno je stalno poboljšanje kvalitete proizvoda i štednja prirodnih izvora sirovine i energije. Potrebno je zbrinjavati otpadni materijal na prikladan način i smanjivati emisiju štetnih plinova u atmosferi.

6. Literatura:

1. <http://www.cemex.hr/Povijestcementaibetona.aspx>
2. Begović, D. i Štirmer, N., Teorija i tehnologija betona, Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.
3. Popović, K., „Proizvodnja cementa i održivi razvoj, Građevinar“, Vol 55 (2003) 201-206
<http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-55-2003-04-02.pdf>
4. Šimunović, M., Cement, Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2009.
5. Našicecement d.d.
https://hr.wikipedia.org/wiki/Na%C5%A1icecement_d.d.
6. <http://www.gradimo.hr/clanak/povijest-betona/37675>
7. Burečić, M., Cementne sirovine, Završni rad, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Zagreb, 2011
<http://www.jutarnji.hr/life/znanost/otkrivena-tajna-rimskog-betona-formula-stara-2000-godina-bolja-je-od-bilo-kojeg-danasnjeg-materijala/1154933/>

7. Životopis

██████████████████████ Pohadao sam osnovnu školu u OŠ Julija Klovića na Trešnjevci u Zagrebu. Završio sam gimnaziju Tituša Brezovačkog u Zagrebu. Upisao sam se na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu na ljeto 2011. godine. Završio sam tečaj za demonstratora hokeja na travi na ljeto 2012. godine. Od 2014. godine radim kao trener mlađih uzrasta u svom klubu, HK Jedinstvo, za dvije kategorije, pioniri do 12 godina i pionirke do 12 godina. Upisao sam se na Kineziološkom fakultetu na SCIT, višu školu za izobrazbu trenera hokeja na travi na ljeto 2015. godine. Internacionalni sam sudac hokeja na travi od 2009. godine.