

# KORIŠĆENJE NEKIH METODA UBRZANOG OČVRŠĆAVANJA ZA DOBIJANJE RANIH ČVRSTOĆA BETONA

Andjelija STEFANOVIĆ-ILIĆ

PREGLEDNI RAD  
UDK:666.972.035.5.004.15=861

## 1 UVOD

Savremena tehnologija gradjenja zahteva ostvarivanje relativno visokih čvrstoća betona pri veoma malim starostima, a koje se ne mogu ostvariti u prirodnim uslovima očvršćavanja. Očvršćavanje betona pri normalnim temperaturama i u uobičajeno vlažnim sredinama pod režimom nege koja se smatra uobičajenom – vlaženje betona – predstavlja relativno dugotrajan proces.

Čvrstoća betona tokom vremena menja se po zakonima koji imaju približno eksponencijale ili logaritamske oblike. Čvrstoća pri starosti od 28 dana je nominalna čvrstoća i naziva se markom betona (MB). Konačna vrednost kao i zavisnost čvrstoće betona od vremena uslovljena je nizom faktora:

- vrstom i granulometrijskim sastavom granulata,
- vrstom i količinom cementa,
- vodocementnim faktorom (W/C),
- negovanjem,
- temperaturom i vlažnošću sredine.

Delovanjem na beton po liniji ovih faktora proces očvršćavanja može se ubrzati. Ovo je naročito važno kod prefabrikacije betonskih elemenata, gde treba u kratkom vremenskom periodu osloboditi kalupe (oplate) i na taj način ubrzati proizvodni proces. Razvoj nauke o ubrzanom očvršćavanju klasičnog betona odvijao se u toku proteklih 110 godina. Još je 1880. nemački naučnik Michaelis ukazao da se sa povišavanjem temperature ubrza proces stvrdnjavanja cementa. Na praktičnoj primeni zaparivanja značajni su radovi Fressineta i Hirschfelda. Fressinet je 1928. prvi primenio toplotnu obradu betona u hermetički zatvorenim kalupima. U bivšem SSSR-u termička obrada se primenjuje od početka, a u Evropi i SAD od pedesetih godina prošlog veka. Posle Drugog svetskog rata u Zagrebu se u okviru "Jugobetona" uspešno koristi postupak toplotne obrade.

---

Adresa autora:

Doc. dr Andjelija Stefanović-Ilić, dipl.gradj.inž., Gradjevinski fakultet u Subotici, Kozaračka 2a, e-mail ilicandj@bitsyu.net

U Beogradu je toplotna obrada betona počela 1948. u "Standardbetonu". U postupku prinudnog očvršćavanja primenjen je metod toplotne obrade betona sa zagrevanjem do 80°C i pri normalnom atmosferskom pritisku. Paralelno sa razvojem ubrzanog očvršćavanja klasičnog betona primenjivali su se i usavršavali širom sveta i postupci za ubrzano očvršćavanje lakoagregatnog betona, najpre sa zrnima od ekspanzirane gline. Savremeni način gradnje zahtevao je ekonomičnost gradnje, kratke rokove i dobar kvalitet proizvoda. Veliki napredak u razvoju industrijalizacije gradjenja, značaj prinudnog očvršćavanja betona na tehnologiju industrijske proizvodnje objekata u gradjevinarstvu, obavezao je veliki broj naučnika i stručnjaka u svetu i kod nas da rade na problemima prinudnog očvršćavanja betona.

U tehnologiji betona poznate su tri grupe metoda za postizanje ranih čvrstoća: tehnološke, hemijske i fizičke.

U tehnološke metode spada: upotreba odgovarajuće vrste i količine cementa, smanjenje vodocementnog faktora, smanjenje pora u betonu, revibriranje betona. Upotrebom cemenata više klase i finijeg mliva postiže se brži prirast čvrstoće betona u toku vremena. Primenon većih količina cementa pri nepromenjenom sadržaju vode dobijaju se niži vodocementni faktori, a samim tim i veće početne čvrstoće betona.

U hemijske metode spada upotreba dodataka betonu tipa akceleratora ili superplastifikatora. Aditivi se dodaju betonu da bi se korigovala ili dobila planirana svojstva i karakteristike kako svežeg tako i očvršlog betona. Mogu biti u tečnom ili praškastom stanju, a doziraju se u odnosu na masu cementa. Treba pomenuti da su neku vrstu aditiva koristili i antički neimari još pre naše ere, dodajući malteru jaja, mleko i životinjsku krv, čime su dobijali otpornije maltere.

Danas, hemijska industrija proizvodi veliki broj aditiva, koji služe za poboljšanje određenih svojstava betona. Kao dodatna sredstva betonu, najčešće se koriste: plastifikatori (za poboljšanje ugradivosti), retarderi (usporivači očvršćavanja), akceleratori (sredstva za ubrzavanje očvršćavanja), zaptivači (sredstva za zaptivanje) i aeranti (uvlačenje vazduha u svežu betonsku masu).

Plastifikatori su dodaci betonu koji pri jednakoj količini vode poboljšavaju obradivost betona ili pri jednakoj obradivosti betona omogućavaju smanjenje količine vode. To su organski polimeri rastvorljivi u vodi koji treba da budu sintetizovani, upotrebom kompleksnog procesa polimerizacije, da bi proizveli dugačke molekule visoko molekularne mase, i zato su oni relativno skupi. S druge strane, zato što se proizvode za specifične namene, njihove karakteristike mogu da se optimizuju u smislu dužine molekula sa minimumom unakrsnog povezivanja. Veća molekularna masa poboljšava efikasnost superplastifikatora.

Postoje četiri glavne kategorije superplastifikatora: sulfonovani melamin-formaldehid kondenzati, sulfonovani naftalin-formaldehid kondenzati, modifikovani lignosulfonati i ostali kao što su estri sulfonske kiseline i karbohidratni estri.

Razvijena je modifikacija superplastifikatora baziranog na naftalinu uključanjem kopolimera sa funkcionalnom sulfonskom i karbonskom grupom. To odražava elektrostatički naboj na česticama cementa i sprečava flokulaciju adsorpcijom na površini čestica cementa. Kopolimer je aktivniji na višim temperaturama što je naročito korisno kod betoniranja po vrućem vremenu kada se visoka obradivost može zadržati do jednog sata posle mešanja.

Glavno dejstvo dugih molekula je omotavanje oko čestica zbog čega dobijaju visoko negativan naboj tako da se one međusobno odbijaju. Ovo rezultuje deflokulacijom i disperzijom čestica. Rezultujuće poboljšanje obradivosti može da se iskoristi na dva načina: proizvodnjom betona sa veoma visokom obradivošću ili betona sa veoma visokom čvrstoćom.

Pri datom vodocementnom faktoru i količini vode u mešavini, disperzivno dejstvo superplastifikatora povećava obradivost betona. Dobijeni beton može da se ugradi uz malo nabijanja i nije podložan prekomernom »znojenju« ili segregaciji.

Druga upotreba superplastifikatora je u proizvodnji betona normalne ugradivosti ali sa ekstremno visokom čvrstoćom zahvaljujući veoma značajnoj redukciji vodocementnog faktora. Ako se ovakav beton termički obrađuje zaparivanjem ili na neki drugi način moguće je postići i visoke rane čvrstoće.

Superplastifikatori ne menjaju strukturu cementne kaše, samo dolazi do boljeg rasporeda čestica cementa i stoga do njihovih bolje hidratacije. Ovo objašnjava zašto se u nekim slučajevima desilo da je upotreba superplastifikatora povećala čvrstoću betona pri konstantnom vodocementnom faktoru.

Ubrzivači ili akceleratori deluju ili kao ubrzivači vezivanja cementa ili u ranom periodu očvršćavanja betona povećavaju njegove čvrstoće. Decenijama je najčešće korišćen kalcijum hlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) kao ubrzivač očvršćavanja betona. On je veoma efikasan za ubrzavanje hidratacije, zbog toga što vrši neznatnu promenu alkalnosti vode pora ili služi kao katalizator pri hidrataciji. Kalcijum hlorid je, bez sumnje, efikasan i jeftin akcelerator ali ima ozbiljan nedostatak. Prisustvo jona hlorida uzrokuje koroziju čelične armature. Mnogi autori su proučavali dejstvo  $\text{CaCl}_2$  kao ubrzivača. Konstatovano je da  $\text{CaCl}_2$  utiče na proces hidratacije naročito trikalcijum silikata ( $\text{C}_3\text{S}$ ), povećava specifičnu površinu produkata hidratacije, mešajući morfologiju kao i dimenzioni raspored pora gela i kapilara i molarni

odnos  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ . Konstatovana je ubrzana hidratacija i drugih minerala portland cementa:  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  i  $\text{C}_4\text{AF}$ . Prema nekim istraživačima kalcijum hlorid dodat betonu utiče na smanjenje izdvajanja vode na površini betona. Utvrđeno je da povećava otpornost betona na koroziju i abraziju. Kada se vrši zaparivanje ili negovanje pri povišenim temperaturama,  $\text{CaCl}_2$  povećava čvrstoću betona i omogućuje podizanje temperature tokom negovanja. Ako se betonu doda do 2%  $\text{CaCl}_2$  čvrstoća takvog betona će rasti, dok će veći procenat dodatka uticati negativno na mehaničke čvrstoće. Radi toga kod upotrebe ovog dodatka treba biti krajnje obazriv. Uticaj akceleratora na ranu čvrstoću betona znatno zavisi od vrste akceleratora, vrste cementa, pa je čak drugačiji i kod cementa iste nominalne vrste ali različite količine. Tačan sastav aditiva se ne otkriva iz komercijalnih razloga, pa je zato potrebno proveriti učinak svake eventualne kombinacije cementa i aditiva.

U okviru fizičkih metoda ubrzanog očvršćavanja betona kao najefikasniji postupci primenjuju se postupci termičke obrade. Od metoda koje tretiraju termičku obradu najčešće primenjujane su hidrotermalne metode, ma da se beton može grejati i putem električne struje, infra grejalicama, ili na neki drugi način.

Koja će se od navedenih metoda primeniti zavisi od konkretnih okolnosti, pri čemu prilikom odlučivanja o izboru određene metode uvek mora da se vodi računa o celokupnom kompleksu tehničko-tehnoloških i ekonomskih uticajnih faktora. Moguće je izvršiti i kombinaciju ovih metoda. Tako, na primer može se upotrebiti ubrzivač očvršćavanja u malom procentu, a zatim beton izložiti hidrotermalnoj obradi.

## 2 METODE SA HEMIJSKIM DODACIMA

Dodaci smanjuju vreme do početka i kraja vezivanja. Po svom dejstvu dodaci se dele na ubrzivače vezivanja – gde spadaju  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , i ubrzivače vezivanja i očvršćavanja – gde spadaju  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{C}_4$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Pozitivan uticaj dodatka javlja se u onim slučajevima kada je vreme do početka vezivanja skraćeno, a interval vezivanja sačuvan neizmenjen u poredjenju sa masom betona bez dodataka.

## 3 METODE TERMIČKE OBRADJE BETONA

### 3.1 Metoda zaparivanja betona pri atmosferskom pritisku

Nominalna čvrstoća betona pri očvršćavanju u prirodnim uslovima dobija se posle 28 dana. Prirodni uslovi podrazumevaju temperaturu sredine cca  $20^\circ\text{C}$ , relativnu vlažnost oko 60% i uobičajenu negu betona, što znači sedam dana kvašenja betona vodom više puta u toku dana. Ako je iz nekih razloga potrebno da beton dobije veću čvrstoću u starosti od svega nekoliko sati ili nekoliko dana, nego što je to moguće uobičajenom negom, onda se mora primeniti neka od metoda ubrzanog očvršćavanja. Ovo je slučaj kod izrade betonskih elemenata za montažnu gradnju. Za odvijanje tehnološkog procesa montažne gradnje rane čvrstoće betona su neophodne. Očvršćavanje betona može se

ubrzati primenom povišenih temperatura, pri čemu osim u uslovima povišene temperature, proces očvršćavanja betona mora da se odvija u dovoljno vlažnoj sredini, kako bi se sprečilo isparavanje vode iz betona i omogućio nesmetan proces hidratacije cementa bez negativnih posledica. Ako se svež beton izloži povišenoj temperaturi proces hidratacije cementa se ubrzava uz vidne razlike u ponašanju minerala portland cementnog klinkera. S.A.Mironov proučavao je ovaj problem i izvršio ispitivanja čvrstoća uzoraka od minerala portland cementnog klinkera pri očvršćavanju u različitim uslovima i u različitim starostima. U tabeli 3.1 prikazani su rezultati njegovog istraživanja.

Sveža betonska masa može se izložiti zaparivanju, pri normalnom atmosferskom pritisku i pri temperaturi od oko 80°C, kao i u uslovima povišenog pritiska i na temperaturama većim od 100°C. Zaparivanje pri povišenom pritisku vrši se u specijalnim komorama - autoklavima – pa se otuda i metoda naziva autoklavi-ranje. Temperatura vodene pare u autoklavima obično iznosi 180°C dok je pritisak najčešće oko 10 bara.

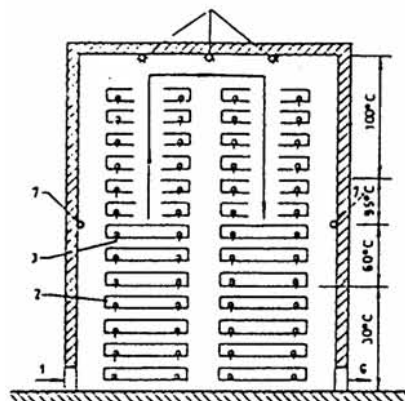
Svakako jedna od najstarijih metoda ubrzanog očvršćavanja betona je metoda zaparivanja pri normalnom atmosferskom pritisku. Optimalnim režimom zaparivanja mogao bi se smatrati onaj režim koji za najkraće vreme, bez štetnih posledica, daje potrebna svojstva betonu. Pri izboru optimalnih režima zaparivanja treba nastojati da pad čvrstoće usled zaparivanja bude minimalan, a da dužina režima zaparivanja omogući i zadovolji osnovni uslov prefabrikacije, korišćenje kalupa više puta u toku 24 časa.

U toku toplotne obrade u betonu se odvijaju fizičko-hemijske transformacije, formira se struktura, teku procesi transporta toplote, a nastaju i napregnuta stanja. Na formiranje strukture cementnog kamena utiču kvalitet cementa, sastav i konzistencija betona, temperatura i dužina očvršćavanja. Na veličinu destruktivnih procesa najveći uticaj ima brzina podizanja temperature i vreme odležavanja betona u kalupima do početka zaparivanja. U procesu formiranja strukture i prelaska betonske mase u čvrsto telo, veliku ulogu ima hemijski sastav cementne paste i fizičko stanje svih minerala od kojih se ona sastoji.

U toku toplotne obrade u betonu nastaju procesi vezani sa razmenom toplote koji su posledica promena temperature sredine, kretanja tečne i gasovite faze, koncentracije pojedinih komponenata, pritisaka i drugih faktora koji izazivaju promene u betonu za vreme

njegovog izlaganja uslovima ubrzanog očvršćavanja. Postupak hidrotermalne obrade omogućuje da se zadrži vlaga koja je prisutna u betonu i na taj način stvore uslovi za ubrzano odvijanje hemijskih reakcija koje dovode do promena u strukturi betona odnosno njegovih osobina. U toku hidrotermalne obrade odvija se niz fizičkih, fizičko-hemijskih i hemijskih procesa koji, u većoj ili manjoj meri, utiču na formiranje strukture betona. Od uslova uzajamnog dejstva zasićene pare i sveže betonske mase zavise i efekti toplotne obrade.

Za zaparivanje betona koristi se nekoliko tipova postrojenja kao što su komore, tuneli ili haube. Često je u primeni jedan relativno primitivan postupak u okviru koga se elementi pokrivaju odredjenim pokrivačima koji sprečavaju gubitak pare. Pokrivači mogu biti cirade, PVC folije ili drugi, a dovod pare se vrši savitljivim cevima. Komore za zaparivanje koriste se u pogonima za proizvodnju montažnih elemenata. Mogu biti sa elementima smeštenim u horizontalne ili vertikalne baterije sa dobrim mogućnostima za kontrolu režima zaparivanja. Na sl. 3.1 prikazana je komora za zaparivanje sa neprekidnim dejstvom.



Sl.3.1 Komora za zaparivanje u kalupima sa horizontalnim baterijama

- 1 - ulaz, 2 - kalupi, 3 - nosači kalupa, 4 - dovod pare, 5 - temperaturne zone, 6 - izlaz, 7 - prikupljanje kondenzata

Tabela 3.1 Čvrstoće uzoraka od minerala portland cementnog klinkera pri očvršćavanju u različitim uslovima (S.A.Mironov)

Naziv minerala	Čvrstoća pri pritisku u MPa					
	Pri normalnom očvršćavanju betona u toku				Posle zaparivanja po režimu 2+6+2 č pri 80°C	
	7 dana	28 dana	180 dana	365 dana	3 časa	28 dana
C <sub>3</sub> S	32,20	46,60	51,20	58,40	19,80	40,90
C <sub>2</sub> S	2,40	4,20	19,30	32,50	1,90	15,40
C <sub>3</sub> A	11,80	12,40	0	0	0	0
C <sub>4</sub> AF	30,00	38,40	49,30	59,50	44,00	54,60

Tuneli za zavarivanje koriste se u fabrikama montažnih elemenata većeg kapaciteta. U njima se proizvodnja odvija kontinualno, tako da u toku prolaska kalupa kroz tunel, zahvaljujući zonama sa različitim intenzitetom grejanja, betonski elementi su izloženi projektovanom režimu zavarivanja. Na sl. 3.2 dat je shematski prikaz tunela za zavarivanje.

Haube za zavarivanje koriste se u manjim proizvodnim pogonima za izradu montažnih elemenata. Mogu biti metalne ili drvene, kao i prenosne, klizne ili obrtne.

Pokrivanje elemenata cirkadama i dovodjenje pare putem savitljivih cevi je relativno primitivan način ali je u upotrebi kod manjeg obima proizvodnje.

Bez obzira na koji se način vrši zavarivanje, elementi se izlažu pari temperature 60-90°C. Ovo izlaganje pari ne sme da bude naglo. Poznato je da ciklus zavarivanja ima nekoliko karakterističnih perioda:

- period prethodnog odležavanja sveže ugrađenog betona na temperaturi okolne sredine (A),
- period podizanja temperature do usvojenog najvišeg nivoa (B),
- period izotermičkog zagrevanja betona pri konstantnoj najvišoj temperaturi (C),
- period snižavanja temperature (D),
- period hladjenja betona (E).

Na sl. 3.3 dat je shematski prikaz režima sa pojedinim periodima (A, B, C, D i E) zavarivanja, a na sl. 3.4 prikazani su mogući režimi zavarivanja. Ako se primenjuje ubrzan ciklus zavarivanja, bez prethodnog odležavanja betona na temperaturi sredine u kojoj je spravljen, u elemente se mora ugraditi zagrejan svež beton, pri čemu temperatura ovog betona ne sme biti viša od 40°C. Ako se primenjuje normalan ciklus zavarivanja vreme odležavanja iznosi 1-4 časa.

Pozitivan uticaj negovanja sveže ugrađenog betona pre toplotne obrade je nesporan. S.A.Mironov je još 1936. utvrdio da je čvrstoća betona koji je podvrgnut zavarivanju posle negovanja u toku nekoliko časova na sobnoj temperaturi, viša nego čvrstoća betona koji je zavarivan odmah posle ugrađivanja.

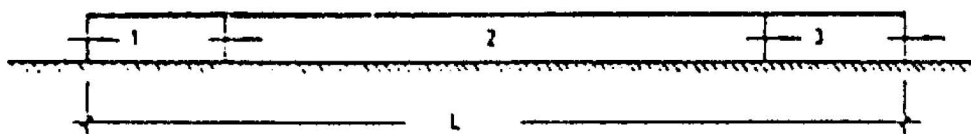
Bitan uticaj na dubinu i brzinu hidratacije, kao i na brzinu otvrdnjavanja cementa ima početno negovanje betona, pre zagrevanja, na nižim temperaturama. Temperaturni uslovi izražavaju se u izmeni faznog sastava i strukture cementnog kamena.

Istraživanja S.A.Mironova su pokazala da je optimalno vreme prethodnog odležavanja vreme do početka vezivanja cementa. Ono zavisi ne samo od sastava cementa, već i od temperature okolne sredine. Ustanovljeno je da se postepeno povećanje temperature za vreme odležavanja, čak i u uslovima koji isključuju mogućnost isparenja vode, nepovoljno odražava na konačnu čvrstoću betona. U periodu prethodnog odležavanja stvara se znatna količina novih jedinjenja, dok je u isto vreme privremeno povišenje temperature praćeno zbijanjem omotača novonastalih jedinjenja oko čestica cementa, što može dovesti do usporavanja hemijske reakcije između cementa i vode.

Optimalno prethodno odležavanje betona pre zavarivanja, po mišljenju mnogih istraživača, zavisi od niza faktora i utoliko je kraće, ukoliko je finije mleven cement i viša temperatura ambijenta u kome se beton nalazi pre zavarivanja.

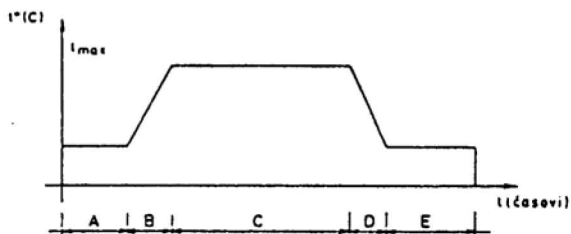
Mnogi autori su se bavili izučavanjem uticaja pojedinih činilaca u fazi odležavanja betona na čvrstoću pri pritisku zavarivanih betona. P.K.Malinovskij je istraživao uticaj prethodnog odležavanja betona, proizvedenog od cementa iz Poljske, i ta zavisnost je data na sl. 3.5. Z.Rajnsdorf je utvrdio da optimalno vreme odležavanja zavisi i od temperature zavarivanja, sl. 3.6.

Ispitivanjima u laboratorijama bivšeg SSSR-a zaključeno je da se optimalnim vremenom odležavanja betona može smatrati početak vezivanja betona. Ukoliko su vodocementni faktor i pokretljivost betonske mase veći, a temperatura okolne sredine niža, to je potrebno duže vreme prethodnog odležavanja betona. Optimalnim vremenom može se smatrati period u kome beton postiže čvrstoću 0,3-0,5MPa.

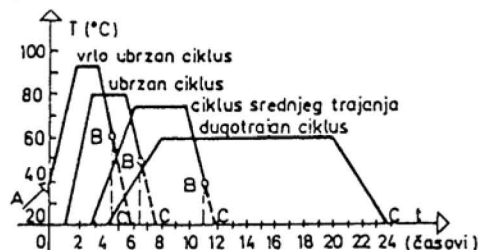


Sl.3.2 Shematski prikaz tunela za zavarivanje

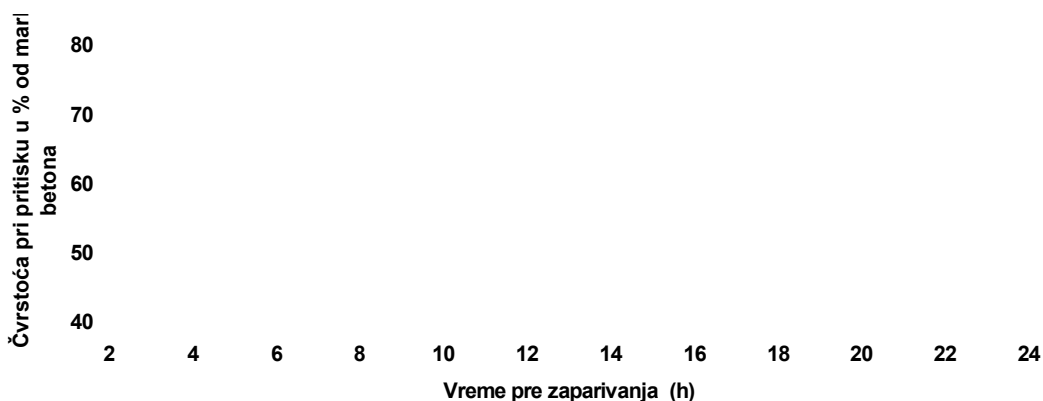
1 – zona porasta temperature, 2 – zona zavarivanja maksimalnom temperaturom, 3 – zona hladjenja



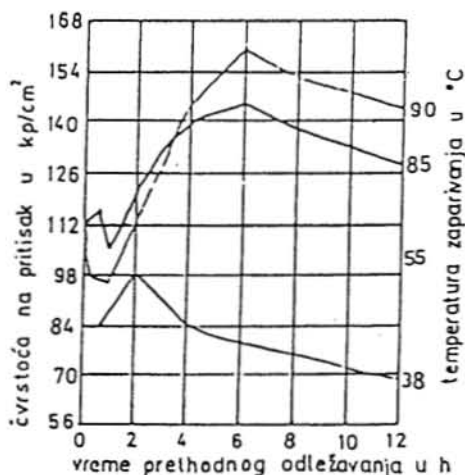
Sl.3.3 Dijagram režima zavarivanja



Sl.3.4 Režimi zavarivanja betona



Sl. 3.5 Uticaj prethodnog odležavanja betona na njegovu čvrstoću posle zaparivanja



Sl.3.6 Zavisnost optimalnog vremena odležavanja betona od temperature zaparivanja

U komori za zaparivanje beton se postepeno zagreva do temperature na kojoj se odvija proces toplotne obrade. Osim vodene pare, u komori za toplotnu obradu, nalazi se i vazduh normalnog atmosferskog pritiska. Sa porastom temperature u komori ubrzavaju se i reakcije formiranja strukture cementnog kamena. Ovaj period se naziva periodom podizanja temperature. Brzina podizanja temperature zavisi od masivnosti betonskih elemenata i konzistencije sveže betonske mase. Prema raznim autorima brzina podizanja temperature kreće se između 10-50°C/h. Kod tanjih elemenata ne bi trebalo da predje 25°C/h, a kod masivnijih 20°C.

Period podizanja temperature po svom značenju je primaran period od koga zavisi efikasnost otvrdnjavanja betona. Brzo podizanje temperature dovodi do oštećenja elemenata – pada čvrstoće, većeg skupljanja, vidljivih pukotina. Porast čvrstoće betona prilikom toplotne obrade može se podeliti u dve faze. U prvoj fazi očvršćavanje se odvija ubrzano, a temperatura se u komori povećava. Drugi period se odlikuje sporim prirastom čvrstoće, tj. odvijaju se reakcije koje dovode do sporijeg povećavanja čvrstoće betona koji se izlaže

toplotnoj obradi. U ovom periodu temperatura u komori se ne menja, period toplotne obrade se naziva periodom izotermičke obrade. Dužina izotermije je vreme zaparivanja elemenata pri maksimalno usvojenoj stalnoj temperaturi. Kao optimalna temperatura izotermije preporučuje se 80-85°C, a zavisi od vodocementnog faktora, vrste cementa i projektovane čvrstoće betona. Najčešće vreme izotermije za naše cemente iznosi 4-8 časova.

Prema istraživanjima Američkog instituta za beton, ACI, beton od lakih granulata može pri izotermiji da se zagreje između 82 i 88°C, a optimalni ciklus nema nikakve razlike u odnosu na ciklus za klasične betone.

U zavisnosti od uslova proizvodnje, stvrdnjavanje betona se može odvijati pri različitim temperaturama. Poznato je da se intenzitet stvrdnjavanja menja sa vremenom. Tako, pri normalnim uslovima stvrdnjavanja za prvih tri do pet dana, pri temperaturi od 20°C, beton umereno tvrde konzistencije dobija 50% marke betona, a ostalih 50% tokom narednih 23-25 dana. Analogna slika se javlja i pri zaparivanju. U prvim časovima dolazi do intenzivnog porasta čvrstoće betona koji se usporava sa produžavanjem zaparivanja. Na taj način čvrstoća raste neproporcionalno povišenju temperature i povećanju vremena zaparivanja. Mnogi istraživači su dokazali da temperatura utiče na brzinu porasta čvrstoće.

Poslednji period toplotne obrade u režimu zaparivanja je period hladjenja betona, koji počinje nakon prestanka dovoda pare u komoru. Ispitivanjima je ustanovljeno da se period izotermičkog zagrevanja može svesti na minimum ukoliko se period hladjenja produži, naravno ako to dozvoljava tehnološki ciklus proizvodnje. Ovo znatno povećava ukupan ciklus zaparivanja, što je u fabričkim uslovima neprihvatljivo zbog male iskorišćenosti kalupa. U mnogim fabrikama se posle završetka izotermičkog perioda prekida dovod pare u komoru, a elementi ostavljaju u zatvorenim komorama još 2-3 sata. Pri tome brzina hladjenja zavisi od stepena hermetizacije komore i od koeficijenta toplotne provodljivosti materijala od koga su izradjeni poklopci na komorama.

U periodu hladjenja element ima višu temperaturu od sredine komore usled čega iz betona počinje da isparava voda, njegova se površina isušuje i dobija svetliju boju. Osim toga, usled razlike temperatura u betonskom elementu, dolazi do pojave napona i to što je

element masivniji i što se brže hladi naprezanja su veća, tako da može doći i do obrazovanja pukotina. Dopuštena brzina hladjenja zavisi i od čvrstoće betona dobijene na kraju izotermijskog perioda. Usled toga što temperaturne razlike duž debljine elementa dovode do obrazovanja napona, ako je veća čvrstoća betona, beton može podneti i veća naprezanja bez razaranja i u tim uslovima se dozvoljava veći temperaturni pad odnosno nešto brže hladjenje.

Hladjenje betona treba da se odvija postepeno. Ovo je naročito potrebno pri zaparivanju gde su niske spoljne temperature; betoni koji su posle izotermije postigli veću čvrstoću mogu se brže hladiti. Sporije hladjenje treba sprovesti kod debljih elemenata kao i kod elemenata koji se zaparuju van kalupa. Ovakvi su režimi potrebni da bi se sprečila pojava prslina usled temperaturnih deformacija.

Trajanje pojedinih perioda može biti različito. Na primer, kod proizvodnje elemenata od lakog betona preporučuje se sledeći režim zaparivanja pri normalnom atmosferskom pritisku:

- dužina perioda u kome se povećava temperatura iznosi 1,5-4,5 časa; temperatura zaparivanja se može menjati od 60-95°C pri odgovarajućoj vlažnosti (blizu 100%); brzina povećanja temperature iznosi maksimalno 30°C na čas,

- dužina održavanja maksimalne temperature (izotermija) zavisi od dimenzija poprečnog preseka elementa, konstrukcije toplotne izolacije, vrste i kvaliteta cementa, temperature pare i može se kretati od 5-9 časova,

- dužina hladjenja komore (podrazumeva se od momenta prestanka dovodjenja pare) određuje se proračunom tako da se brzina snižavanja temperature može menjati brzinom 5-10°C/h.

Ovakvom organizacijom, dužina ciklusa termovlažne obrade lakobetonskih elemenata može se menjati u značajnom obimu. Za dobijanje visoke čvrstoće preporučuje se odležavanje lakobetonskih elemenata 4 sata do zaparivanja u sredini gde je temperatura 10-20°C, ili u zatvorenom komorama 2-4 časa pri temperaturi 30-40°C. Posle toga beton se bolje suprotstavlja unutrašnjim naprezanjima u momentu promene temperature i u njemu se pojavljuje manje zaostalih deformacija. Primenom brzovezujućih cementa može se značajno skratiti ciklus zaparivanja.

Pravilno izabranim režimom obavlja se proces ubrzanog očvršćavanja betona za kratko vreme, uz obezbeđivanje traženih čvrstoća i bez destruktivnih pojava u betonu. Izabrani režim treba pre obavljanja redovne proizvodnje proveriti, a u toku procesa proizvodnje i stalno kontrolisati.

### 3.2 Ubrzano očvršćavanje betona u kasetama

Proizvodnja krupnopanelnih elemenata za stambene i druge objekte obično se obavlja u vertikalnim baterijama. Proizvode se armirano betonski pregradni zidovi, fasadni paneli, međuspratne ploče. Tehnološke pogodnosti su što se proizvodnja obavlja na malom prostoru, moguće je dobiti elemente sa dve glatke strane i proizvodnja je sa malim utroškom časova rada. Prinudno očvršćavanje betona u vertikalnim baterijama obavlja se zagrevanjem betona preko metalnih stranica baterije. Ne postoji

direktan dodir pare i betona. Izuzev gornje stranice sve površine betonskog elementa su omedjene metalnim površinama pa se postupak prinudnog očvršćavanja može obavljati po posebnom metodu.

Zagrevanje betona u vertikalnim baterijama može se obavljati odmah po ugradjivanju betona. Period podizanja temperatura do maksimalno dozvoljenih je izuzetno kratak. Ovi ubrzani postupci su bez štetnih posledica po kvalitet betona jer se konstrukcijom baterije sprečavaju temperaturne deformacije betona. Postupak hladjenja obično duže traje jer se ovako zagrejan beton sporo hladi.

Za iznošenje betonskih elemenata iz baterije po očvršćavanju dozvoljena je čvrstoća od oko 8MPa. Vertikalne baterije sa deset do dvanaest listova se koriste u dobro organizovanim pogonima 1,5-2 puta na dan. Vršena su istraživanja u cilju pronalaženja optimalnih režima prinudnog očvršćavanja betona kako bi se ubrzali celokupni tehnološki procesi. Poboljšavanjem uslova zagrevanja elemenata u baterijama kao i dopunskim vibriranjem, dvostepenim zagrevanjem traže se putevi za poboljšanje efektivnosti proizvodnje u vertikalnim baterijama.

### 3.3 Ubrzano očvršćavanje betona prethodnim zagrevanjem komponenata

U proizvodnji betonskih elemenata najduži tehnološki proces je toplotna obrada betona. U cilju dobijanja potrebne čvrstoće u početnom vremenu otvrdnjavanja primenjuje se postupak toplog betona. Ispitivanjima je utvrđeno da se dužina termičke obrade betona može skratiti za 25-30%, bez pogoršanja kvaliteta gotovog proizvoda, ukoliko je temperatura betona oko 40°C. Ovaj efekat skraćivanja termičke obrade dobija se na račun isključenja iz opšteg ciklusa vremena prethodnog odležavanja i dela vremena za podizanje temperature.

Poznato je nekoliko načina za dobijanje toplog betona:

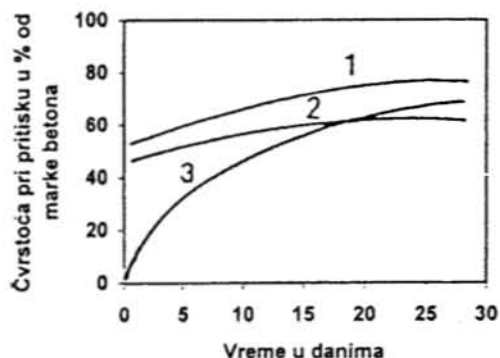
- granulata, a potom njihovo mešanje u betonskoj mešalici,
- zagrevanje betonske mase električnom strujom,
- zagrevanje betonske mase parom.

Način dobijanja toplog betona zagrevanjem vode i granulata odavno je poznat i ima široku primenu pri betoniranju u zimskim uslovima. Voda i granulati zagrevaju se pre unošenja u bubanj mešalice. Preporučuje se maksimalna temperatura zagrejanog vode 60-90°C, a granulata 50-60°C. Kod keramzit betona nepovoljno je zagrevati granulati jer se ovo zagrevanje vrši vodenom parom više temperature. Zbog porozne opne zrna granulata (keramzita) bi upila previše vlage, tako da bi se spravljanje betona vršilo vodom zasićenim zrnima. Radi toga u ovom slučaju treba spravljanje beton vrućom vodom, a potom topli beton zaštititi od hladjenja.

Zagrevanje betonske mase električnom strujom je metoda koja se poslednjih decenija primenjuje u bivšem SSSR-u za ubrzano očvršćavanje pri zimskom betoniranju i pri fabričkoj proizvodnji betonskih elemenata. Betonska masa se zagreva u specijalnim uređajima sa elektrodama u toku nekoliko minuta na temperaturi 80-95°C, zatim se ugradjuje u kalupe i drži u toplotnoj zaštiti.

Zagrevanje betonske mase parom prvi put je primenjeno u danskoj firmi »Tomas Šmit«. Poslednjih godina ovaj metod primenjuju neke firme u Danskoj, Švedskoj, Nemačkoj i drugim zemljama Evrope.

Specifičnost otvrdnjavanja toplog betona je brzi rast čvrstoće pri pritisku, odmah posle ugradjivanja i manji gubitak čvrstoće usled destruktivnih procesa, u odnosu na betone hidrotermalno obradjene. Za čuvanje toplote ugradjenih toplih betona potrebno je primeniti metalne kalupe uz obezbedjenje toplotne izolacije.



Sl.3.7 Porast čvrstoće pri pritisku keramzit betona u panelima [30]

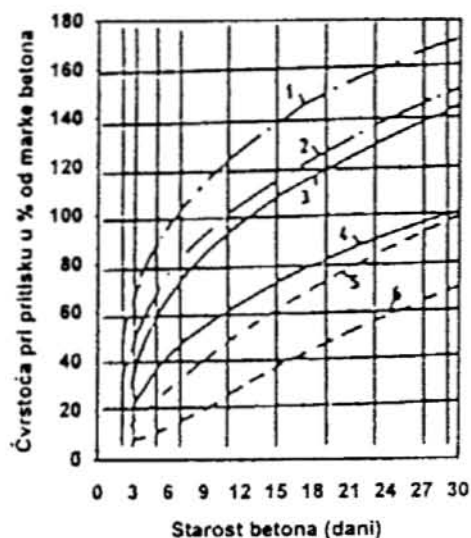
1 - topli beton, 2 – zaparen beton, 3 – nezaparen beton

Na sl. 3.7 prikazani su rezultati ispitivanja priraštaja čvrstoće pri pritisku keramzit betona u panelima posle skidanja oplata. Sa slike se zapaža da je najveću početnu i krajnju čvrstoću pri pritisku postigao topao keramzit beton u odnosu na zapareni i onaj koji je očvršćavao u uobičajenim uslovima nege. Osnovni razlog za to je visoka početna temperatura i temperaturna izjednačenost u masi betona što dovodi do umanjivanja destruktivnih procesa. Pri visokoj temperaturi toplog betona, kratkog održavanja toplote pri toj temperturi i laganim hladjenjem destruktivne promene su svedene na minimum. U takvim uslovima dostiže se maksimalna brzina rasta čvrstoće u prvim časovima otvrdnjavanja, a najveća čvrstoća posle 28 dana je bliska marki betona ili je nadmašuje. Rast čvrstoće toplih betona omogućuje brže oslobadjanje oplata kao i sniženje utroška cementa za 5-10% u odnosu na betone podvrgnute hidrotermalnom prinudnom očvršćavanju pod uslovom da se pravilno izabere vrsta cementa, tehnološki režim zagrevanja betonske mase i pravilna termoizolacija betona u kalupima.

#### 4 KOMBINOVANE METODE UBRZANOG OČVRŠĆAVANJA BETONA

Maksimalni efekti ubrzanog očvršćavanja mogu se postići primenom kombinovanih metoda, spajajući toplotnu obradu betona i primenu hemijskih dodataka. U tabeli 4.1 dat je prikaz uvećanja čvrstoće betona u procentima pri različitim temperaturama očvršćavanja sa dodavanjem 2% CaCl<sub>2</sub> u odnosu na masu cementa.

Na sl. 4.1 prikazani su rezultati ubrzanog očvršćavanja betona spravljenog sa čistim portland cementom u zavisnosti od temperature i hemijskog dodatka. Mešavine sa oznakama 1, 3 i 5 su sa dodatkom 2% CaCl<sub>2</sub>, a mešavine sa oznakama 2, 4 i 6 su bez hemijskih dodataka. Temperature pri kojima je vršeno očvršćavanje betona su 5, 15 i 25°C.



Sl. 4.1 Ubrzano očvršćavanje betona spravljenih sa čistim portland cementom u zavisnosti od temperature i dodataka

- 1 – sa 2% dodatka na t=25°C, 2 – bez dodataka na t=25°C, 3 – sa 2% dodatka na t=15°C,
- 4 – bez dodataka na t=15°C, 5 – sa 2% dodatka na t=5°C, 6 – bez dodataka na t=5°C

Autor je u sopstvenim istraživanjima posmatrao topao keramzit beton spravljen vodom temperature 60 i 80°C sa 2% ubrzivača očvršćavanja.

Tabela 4.1 Čvrstoća betona pri različitim temperaturama očvršćavanja uz dodatak 2% ubrzivača očvršćavanja

Starost betona (dani)	Procenat uvećanja čvrstoća betona pri t°C		
	5°C	15°C	25°C
2	85	65	45
3	70	50	35
7	50	30	20
28	30	15	10

## 5 ANALIZA SOPSTVENIH EKSPERIMENTATA

U eksperimentalnom programu posmatrani su keramzit betoni spravljani od tri frakcije granulata, 400kg cementa sa dodatkom 1% superplastifikatora i 2% ubrzivača očvršćavanja u odnosu na masu cementa. Frakcija 0/4 bila je rečni pesak, a frakcije 4/8 i 8/16 bile su zrna keramzita. Prema istoj recepturi spravljene su tri mešavine sveže betonske mase: A<sub>0</sub>, A<sub>I</sub> i A<sub>II</sub>. Beton A<sub>0</sub> spravljn je vodom čija je temperatura iznosila 20°C i negovan je sedam dana ispod mokre sargije, a zatim u laboratorijskim uslovima pri srednjoj temperaturi vazduha 23±2°C i prosečnoj relativnoj vlažnosti od oko 60%.

Uzorci keramzit betona A<sub>I</sub> spravljani su vodom temperature 60°C, a betona A<sub>II</sub> vodom temperature 80°C. Spravljanje je vršeno mašinskim putem u laboratorijskoj protivstrujnoj mešalici. Komponente keramzit betona su unošene u mešalicu saglasno čl. 26 Pravilnika o tehničkim normativima za beton i armirani beton spravljn sa prirodnom i veštačkom lakoagregatnom ispunom. Zbog toga što su zrna keramzita pokazala veće upijanje vruće vode u odnosu na upijanje vode sobne temperature, za spravljanje betona vrućom vodom upotrebljena je veća količina vode kako bi se održala ista konzistencija betona, kao i kod mešavina spravljanih vodom sobne temperature. Tako je, vodocementni, odnosno fluidocementni faktor, kod keramzit betona A<sub>0</sub> iznosio 0,52, kod betona A<sub>I</sub> i A<sub>II</sub> 0,58.

Pre spravljnja keramzit betona vrućom vodom izvršeno je merenje temperatura svih komponenata kao i sveže betonske mase na izlazu iz mešalice i vazduha u laboratoriji, tabele 5.1 i 5.2.

Merenje temperature vršeno je pomoću digitalnog termometra sa sondom, proizvođača »Iskra«, Ljubljana.

Probna tela su oblika kocke ivice 15cm i prizme dimenzija 12x12x36cm.

Ugradjivanje betona izvršeno je putem vibriranja na vibro stolu u trajanju od 45 sec. Kalupi sa svežim betonom A<sub>I</sub> i A<sub>II</sub> su odmah nakon ugradjivanja stavljeni u već unapred napravljen »sarkofag« od ploča stiropora gde su odležali 24<sup>h</sup>. U kontrolna tela ugradjene su cevčice koje su napunjene mašinskim uljem, a u kojima je kasnije merena temperatura. Na svaka dva sata merene su temperature vazduha u »Sarkofagu« i u probnim telima.

Dijagrami sa zapisanim temperaturama prikazani su na slikama 5.1 i 5.2. Po isteku 24<sup>h</sup> tela su oslobodjena kalupa i stavljena pod mokru sargiju gde su odležala narednih šest dana, a zatim su do ispitivanja bila na vazduhu u laboratorijskim uslovima na srednjoj temperaturi 23±2°C i pri srednjoj relativnoj vlažnosti vazduha od oko 60%.

Sva probna tela koja su stavljana u »sarkofag« bila su zaštićena PVC folijom radi sprečavanja isparavanja vode iz sveže betonske mase.

Tabela 5.1 Temperature pojedinih komponenata betona, vazduha i sveže betonske mase za A<sub>I</sub>

Komp. betona	Pesak	Keramzit		Voda	Superplastifik.	Cement	Vazduh u laboratoriji	Sveža bet. masa
		4/8	8/16					
Temp.(°C)	22,50	23,70	23,50	60	23,40	23,40	24,40	31,20

Tabela 5.2 Temperature pojedinih komponenata betona, vazduha i sveže betonske mase za A<sub>II</sub>

Komponente betona	Pesak	Keramzit		Voda	Superplastifikator	Cement	Vazduh u laboratoriji	Sveža bet. masa
		4/8	8/16					
Temp.(°C)	23,40	23,80	23,80	80	24,10	24,10	25,20	35,60

Sl. 5.1 Temperaturni režim u sredini probnih tela za keramzit betone tipa A<sub>I</sub> spravljanih vodom temperature 60°C u vreme odležavanja u "sarkofagu"



Sl. 5.2 Temperaturni režim u sredini probnih tela za keramzit betone tipa A<sub>II</sub> koji su spravljeni vodom temperature 80°C u vreme odležavanja u "sarkofagu"

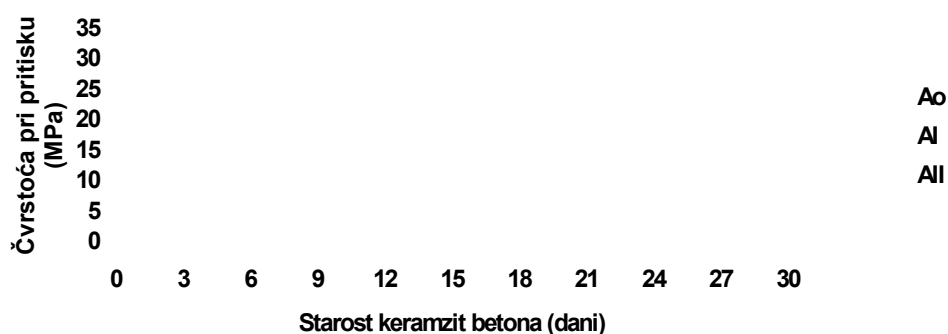
### 5.1 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku

U tabeli 5.3 prikazane su dobijene vrednosti čvrstoće pri pritisku u starosti 1, 3, 7 i 28 dana. Svaka vrednost u tabeli predstavlja srednju vrednost od tri rezultata merenja.

Iz tabele 5.3 može se videti da je beton A<sub>II</sub> spravljen vodom temperature 80°C, starosti jedan dan, dostigao najveću vrednost čvrstoće pri pritisku i da ona iznosi 59% od čvrstoće pri pritisku koju je pokazao beton, spravljen vodom sobne temperature, negovan u laboratorijskim uslovima, starosti 28 dana. U prva tri dana čvrstoća pri pritisku brže raste kod betona spravljenih vrućom vodom nego kod referentnog betona, odnosno kod onog koji je spravljen vodom sobne temperature. Tako, na primer, beton A<sub>I</sub>, starosti jedan dan, ima 53% veću vrednost

čvrstoće pri pritisku od betona A<sub>0</sub> koji je spravljen vodom sobne temperature, ili beton A<sub>II</sub>, starosti 3 dana, ima 33% veću čvrstoću od betona A<sub>0</sub>, iste starosti.

Vrednosti čvrstoća pri pritisku u zavisnosti od starosti betona za sve tipove betona, tip A<sub>0</sub>, A<sub>I</sub> i A<sub>II</sub> prikazane su na slici 5.3. Sa slike se zapaža da je čvrstoća pri pritisku za betone male starosti znatno veća kod betona koji su spravljeni vrućom vodom od onih za čije spravljanje je upotrebljena voda sobne temperature. Takodje, zapaža se da se čvrstoće svih betona izjednačavaju nakon 18 dana starosti, posle čega su krive, kod vrućom vodom spravljenih betona, u blagom usponu, dok je kod betona spravljenih vodom sobne temperature kriva strmija. Betoni spravljeni vrućom vodom dobijaju za oko 7%-10% manju čvrstoću pri pritisku, zavisno od temperature vode



Sl. 5.3 Vrednosti čvrstoća pri pritisku za keramzit betone tipova A<sub>0</sub>, A<sub>I</sub> i A<sub>II</sub> koji su spravljeni vodom temperature 20°C, 60°C i 80°C

Tabela 5.3 Vrednosti čvrstoća pri pritisku za keramzit betone tipova A<sub>0</sub>, A<sub>I</sub> i A<sub>II</sub>

Vrsta betona	Zapreminska masa (kg/m <sup>3</sup> )	W/C	Čvrstoća pri pritisku (MPa) posle dana			
			1	3	7	28
A <sub>0</sub>	1890	0,52	9,90	18,13	23,45	31,27
A <sub>I</sub>	1920	0,58	15,21	21,98	25,73	29,10
A <sub>II</sub>	1920	0,58	18,58	24,15	27,30	28,30

kojom su spravljeni, u odnosu na keramzit betone spravljene vodom sobne temperature, starosti 28 dana. Mladi betoni, starosti jedan dan, koji su imali najveću čvrstoću pri pritisku, pokazali su najmanju vrednost čvrstoće posle 28 dana.

Može se, zaključiti da mladi keramzit betoni koji su spravljeni vrućom vodom ( $T_w=60^\circ\text{C}$  i  $T_w=80^\circ\text{C}$ ), u prva tri dana starosti dobijaju znatnu vrednost čvrstoća pri pritisku, što je svakako posledica ubrzane hidratacije cementa na višim temperaturama. Ti isti betoni pokazuju manju marku betona u odnosu na betone koji su spravljeni vodom sobne temperature.

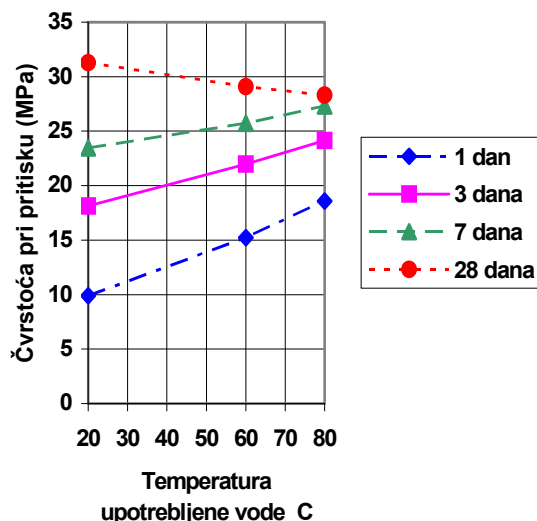
Prirast čvrstoće pri pritisku prikazan je na slici 5.4 za betone starosti 1, 3, 7 i 28 dana u zavisnosti od temperature vode kojom su spravljeni ( $20^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  i  $80^\circ\text{C}$ ). Može se zapaziti da prirast čvrstoća raste u prvih 7 dana, a nakon 28 dana opada kod betona koji su spravljeni vrućom vodom.

## 5.2 Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti određen je indirektno, merenjem rezonantne frekvencije longitudinalnih talasa. Za sve betone ispitivanje je vršeno na po tri prizme starosti 1, 3, 7 i 28 dana. Srednje vrednosti dinamičkog modula elastičnosti prikazane su u tabeli 5.4.

Na slici 5.5 prikazane su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti u funkciji vremena u zavisnosti od temperature upotrebene vode. Prikazane su tri krive linije za tri različite temperature vode ( $20^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  i  $80^\circ\text{C}$ ). Kao što se vidi, vrednosti dinamičkog modula elastičnosti brzo rastu do starosti 7 dana, nakon čega je rast znatno sporiji. Naročito se zapaža sporiji rast kod betona spravljenih vodom temperature  $80^\circ\text{C}$ . Vrednosti

dinamičkog modula elastičnosti u prva tri dana su znatno veće kod betona spravljenih vrućom vodom.



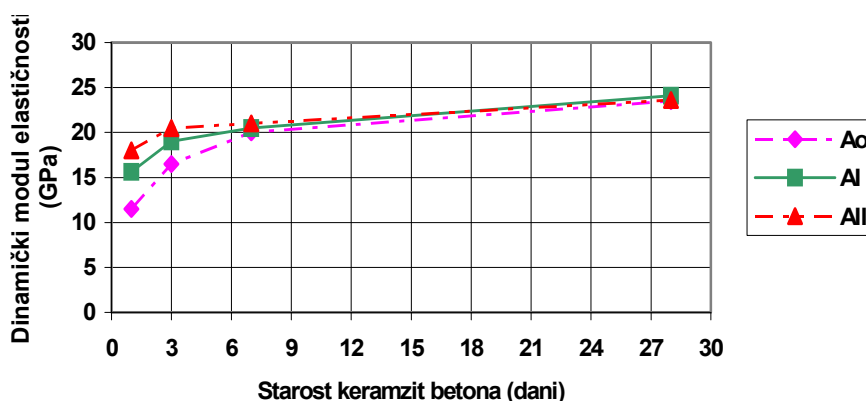
5.4 Prirast vrednosti čvrstoće pri pritisku za betone starosti 1, 3, 7 i 28 dana u zavisnosti od temperature vode ( $20^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  i  $80^\circ\text{C}$ ) kojom su spravljeni

Jedan dan stari betoni spravljeni vodom temperature  $60^\circ\text{C}$  uz dodatak 2% ubrzivača očvršćavanja dobijaju 22% veću vrednost dinamičkog modula elastičnosti u odnosu na betone spravljene vodom sobne temperature iste starosti.

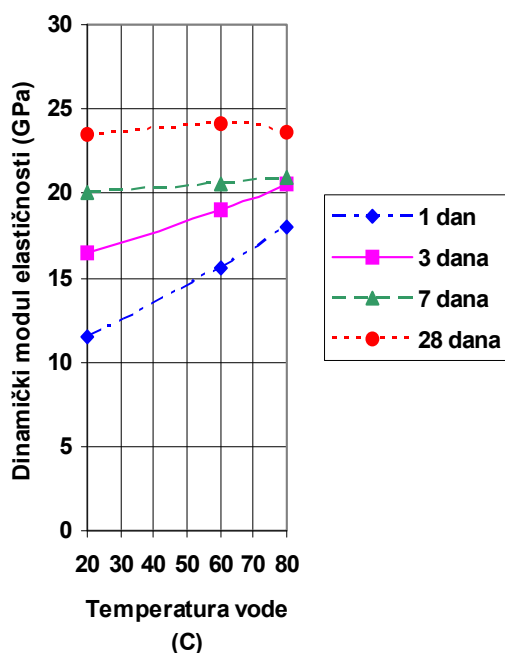
Betoni koji su spravljeni vodom temperature  $80^\circ\text{C}$  uz 2% ubrzivača očvršćavanja pokazali su veće vrednosti dinamičkog modula elastičnosti nego sa vodom  $60^\circ\text{C}$  uz isti procenat ubrzivača očvršćavanja.

Tabela 5.4 Vrednosti dinamičkog modula elastičnosti

Vrsta betona	Zapreminska masa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	W/C	Dinamički modul elastičnosti (GPa) posle dana			
			1	3	7	28
A <sub>o</sub>	1890	0,52	11,50	16,50	20,00	23,50
A <sub>I</sub>	1900	0,58	15,60	19,00	20,50	24,10
A <sub>II</sub>	1900	0,58	18,00	20,50	21,00	23,60



Sl. 5.5 Vrednosti dinamičkog modula elastičnosti za keramzit betone koji su spravljeni vodom temperature  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $80^\circ\text{C}$  uz dodatak 2% ubrzivača očvršćavanja



Sl. 5.6 Prirast vrednosti dinamičkog modula elastičnosti za betone starosti 1, 3, 7 i 28 dana u zavisnosti od temperature vode (20°C, 60°C i 80°C) kojom su spravljani

Kod betona spravljanih vrućom vodom zapaža se niža vrednost dinamičkog modula elastičnosti pri starosti 28 dana od vrednosti koju imaju betoni spravljani vodom sobne temperature iste starosti.

Betoni spravljani vodom sobne temperature imaju najveću vrednost dinamičkog modula elastičnosti pri starosti 28 dana, dok oni spravljani vrućom vodom (60°C i 80°C) imaju veću vrednost u prvih 7 dana.

Na slici 5.6 dat je prirast dinamičkog modula elastičnosti za različite starosti betona (1, 3, 7 i 28 dana) pri navedenim temperaturama upotrebljene vode.

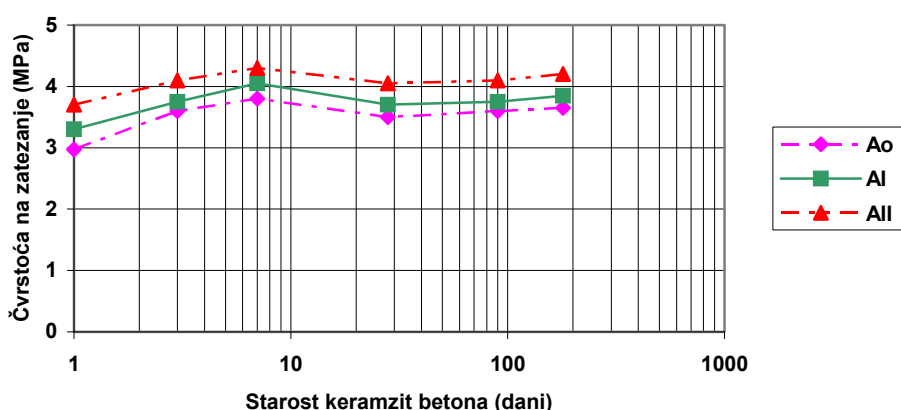
### 5.3 Rezultati ispitivanja čvrstoća na zatezanje pri savijanju

Čvrstoća na zatezanje pri savijanju ispitana je na prizmama dimenzija 12x12x36 cm. Srednje vrednosti čvrstoća na zatezanje, određene na osnovu ispitivanja tri uzorka, za sve starosti keramzit betona, prikazane su u tabeli 5.5.

Zavisnost čvrstoće na zatezanje i vremena prikazana je na slici 5.7

Tabela 5.5 Vrednosti čvrstoća na zatezanje pri savijanju za keramzit betone spravljene vrućom vodom

Vrsta betona	Zapreminska masa (kg/m <sup>3</sup> )	W/C	Čvrstoća na zatezanje pri savijanju (MPa) posle dana					
			1	3	7	28	90	180
A <sub>0</sub>	1890	0,52	2,97	3,60	3,80	3,50	3,60	3,65
A <sub>I</sub>	1920	0,58	3,30	3,75	4,05	3,70	3,75	3,86
A <sub>II</sub>	1920	0,58	3,70	4,10	4,30	4,05	4,10	4,20



Sl. 5.7 Vrednosti čvrstoća na zatezanje za keramzit betone koji su spravljani vodom temperature 20°C, 60°C i 80°C uz dodatak 2% ubrzivača očvršćavanja

## 6 ZAKLJUČAK

U radu su prikazane neke od metoda ubrzanog očvršćavanja. Kao ilustracija primene jedne od navedenih metoda prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoća keramzit betona koji su spravljani vodom sobne temperature i vrućom vodom uz dodatak 2% ubrzivača očvršćavanja.

Posmatrani su keramzit betoni tipova  $A_0$ ,  $A_1$  i  $A_{11}$ . Betoni tipa  $A_0$  spravljani su vodom sobne temperature,  $A_1$  vodom temperature 60°C i  $A_{11}$  vodom temperature 80°C. Pri spravljanju svake od ove tri vrste betona korišćen je ubrzivač očvršćavanja u količini 2% od mase cementa.

Analizom dobijenih rezultata ispitivanja čvrstoća pri pritisku za betone tipova  $A_0$ ,  $A_1$  i  $A_{11}$  može se zaključiti da su betoni tipa  $A_{11}$  u starosti od jednog dana dostigli najveću vrednost u odnosu na druga dva tipa betona i ona iznosi 66% od čvrstoće pri pritisku koju su pokazali betoni tipa  $A_0$  starosti 28 dana.

U prva tri dana čvrstoća pri pritisku brže raste kod betona spravljanih vrućom vodom u odnosu na betone spravljene vodom sobne temperature, iste starosti. Betoni  $A_1$  starosti jedan dan imaju 29% veću vrednost čvrstoće pri pritisku od betona tipa  $A_0$ .

Betoni  $A_{11}$  starosti tri dana imaju 23% veću čvrstoću od betona  $A_0$  iste starosti. Betoni tipova  $A_1$  i  $A_{11}$  u starosti 28 dana imaju nižu vrednost čvrstoće pri pritisku u odnosu na betone  $A_0$ .

Analizom rezultata ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti na ovim istim tipovima betona dolazi se do zaključka da vrednosti brzo rastu do starosti sedam dana kod sva tri tipa betona. Nakon tog perioda prirast je znatno sporiji. Naročito se zapaža spori prirast kod betona  $A_{11}$ . U prva tri dana vrednosti dinamičkog modula elastičnosti su znatno veće kod betona koji su spravljani vrućom vodom u odnosu na betone spravljene vodom sobne temperature, iste starosti.

Kod oba tipa betona koji su spravljani vrućom vodom zapaža se niža vrednost dinamičkog modula elastičnosti pri starosti 28 dana od vrednosti koju imaju betoni spravljani vodom sobne temperature.

## REZIME

### KORIŠĆENJE NEKIH METODA UBRZANOG OČVRŠĆAVANJA ZA DOBIJANJE RANIH ČVRSTOĆA BETONA

Andjelija STEFANOVIĆ-ILIĆ

U radu su prikazane neke metode ubrzanog očvršćavanja betona. Prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoća keramzit betona spravljanih vrućom vodom s dodatkom 2% ubrzivača očvršćavanja.

**Ključne reči:** rane čvrstoće betona, vruća voda, ubrzivač očvršćavanja

Analizom rezultata dobijenih ispitivanjem čvrstoće na zatezanje pri savijanju može se zaključiti da su betoni, u celini gledano, spravljani vodom temperature 80°C pokazali najbolje rezultate u odnosu na druga dva tipa betona u svim starostima.

Upoređivanjem dobijenih rezultata ispitivanja čvrstoća pri pritisku zapaža se da su topli betoni postigli bolju početnu i krajnju čvrstoću. Razlog za to je visoka početna temperatura i temperaturna izjednačenost u masi betona, što je dovelo do umanjivanja destruktivnih procesa. Pri visokoj temperaturi toplog betona, kratkog održavanja toplote pri toj temperaturi i laganim hladjenjem, destruktivne promene su svedene na minimum. U takvim uslovima dostignuta je maksimalna brzina rasta čvrstoća u prvim časovima otvrdnjavanja, a najveća čvrstoća posle 28 dana bliska je očekivanoj marki betona ili je nadmašuje.

## 7 LITERATURA

- [1] Бурлаков Г.С. – Технология изделий из легкого бетона, Москва, 1986.
- [2] Živković S – Beton u žarkim klimatima – svojstva, trajnost i tehnologija, Gradjevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1997.
- [3] Иванов И. А – Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях, Стройиздат, Москва, 1993.
- [4] Muravljev M – Osnovi teorije i tehnologije betona, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1991.
- [5] Neville A. M – Properties of Concrete, Longman, Edinburgh Gate, England, first published 1995., reprinted 1996.
- [6] Stefanović-Ilić A – Efekti primene nekih metoda ubrzanog očvršćavanja na fizičko-mehaničke karakteristike keramzit betona, doktorska disertacija, Gradjevinski fakultet, Beograd, 2000.
- [7] Stojiljković I, Denisenko I – Keramzit beton, Specijalni betoni i malteri – svojstva, tehnologija, primena – Beograd, 1999.

## SUMMARY

### SOME METHODS OF ACCELERATED HARDENING USING FOR OBTAINING EARLY STRENGTH OF CONCRETE

Andjelija STEFANOVIĆ-ILIĆ

In this paper has given some methods of accelerated hardening for the concretes. The paper presents experimental results of the ceramics concretes made using the hot water with adding 2% of the accelerating hardening admixture.

**Key words:** early strengths of the concrete, hot water, accelerating admixtur