

U našim klimatskim uvjetima oko 40 - 50% kalendarskog vremena ima prikladne temperature za betoniranje, a u drugim uvjetima potrebno je poduzimanje različitih odgovarajućih mjera i postupaka

BETONIRANJE U EKSTREMNIM TEMPERATURNIM UVJETIMA

napisao: mr.sc. Držislav Vidaković, dipl.ing.građ.

Problemi betoniranja pri ekstremnim temperaturama

Dobre temperature za betoniranje i očvršćavanje betona su između 10 i 25°C, a za proces hidratacije idealna je 13°C. Jasno je da se betoniranja često moraju izvoditi i pri višim i nižim temperaturama, koje će obzirom na klimatske oscilacije vjerovatno biti sve ekstremnije.

Ekstremnim vremenskim uvjetima za betoniranje smatraju se temperature zraka veće od 30°C i manje od 5°C, a posebno je problematično betoniranje kod temperatura ispod 0°C.

Američki institut za beton (ACI) definira hladno vrijeme kao period u kojem više od tri dana:

- prosječna dnevna temperatura zraka (gledano od ponoći do ponoći) je manja od 40°F (– 5°C)
- temperatura zraka svakog dana nije veća od 50 °F (10°C) duže od 12 sati.

Već i velike temperaturne razlike između dana i noći, snažne izmjene vlage u zraku, kiša, vjetar, snijeg koji se topi uvelike se mogu negativno odraziti na beton. Betonirani elementi s većim modulom površine (MP = omjer vanjskog oplošja i zapremnine, izražen u m⁻¹), odnosno vitkiji elementi (razvedenog presjeka) više su izloženi djelovanju vanjskog, hladnog zraka od masivnih, unutar kojih se i razvija veća temperatura uslijed hidratacije.

Kod nekih vrsta betona dolazi do izbijanja vode na površinu na kojoj je oplata, a taj efekt dodatno pojačava hladnoća oplate i niske temperature svježeg betona. Posljedica toga je da se na vanjskoj površini betona i ispod oplate naziru tamne i neugledne mrlje.

Niske temperature pri ugradbi i očvršćavanju betona su najopsanije kada se voda u betonu (dio vode) pretvori u led zbog njegovog većeg volumena (9%), te nastanu unutarnja naprezanja koja razaraju strukturu betona (što je više vode u sastavu betona problemi su veći). Uslijed toga na površini se može uočiti ljuskanje betona, a u unutrašnjosti beton može ostati i očuvan zbog povećane temperature hidratacije. Beton kod kojeg je došlo do smrzavanja prije početka vezanja još može biti upotrebljiv nakon odmrzavanja. Najgore je kada smrzavanje nastupi u vrijeme vezanja cementa.

Što su temperature niže, proces hidratacije cementa sve se više usporava, sve do zaustavljanja (mirovanje kemijskog procesa, tzv. anabioza). Što je niža temperatura betona, sporiji je prirast njegove tlačne čvrstoće (zato se mora duže čekati za skidanje oplate), a sporije djeluju i dodatci betonu. Ako se svježe ugrađen beton u periodu od nekoliko sati nakon ugradbe smrznuo i nakon toga bio izložen ponavljanim ciklusima smrzavanja njegova tlačna čvrstoća može se umanjiti i do 50 %. Mladi beton koji je samo jednom smrznuo, a nakon toga je propisno njegovan, još može postići dobru tlačnu čvrstoću nakon 28 dana, ali ona će uvijek biti bitno manja u odnosu na beton koji nije smrznuo.

Beton je osjetljiv na niske temperature sve dok ne postigne čvrstoću otpornu na mraz, a pri temperaturi od 5°C, beton postaje otporan na mraz u roku od 35 - 70 sati. Oplata se s okomitih površina betona može skidati kada dostigne tlačnu čvrstoću od 5 N/mm² (mada je bolje da je 7 N/mm²). Za horizontalne i sve važne konstrukcije potrebno je da beton postigne 70% projektirane čvrstoće kako bi smjele biti izložene višekratnom djelovanju mraza. No, treba voditi računa da betonska masa uslijed smrzavanja može postići i znatnu prividnu čvrstoću.

U priloženoj tablici dani su postotci tlačne čvrstoće betona u ovisnosti o srednjoj temperaturi i trajanju stvrdnjavanja. Temperatura spravljenog betona opada tijekom transporta i pretovarivanja do mjesta ugradbe, (ovisno o trajanju transporta i karakteristikama sredstva transporta – zapremnini i zatvorenosti spremnika za beton i dr.), tijekom privremenog skladištenja (ako se tada dodatno ne grije) i pri usipavanju u oplatu, odnosno ugradbi u konstrukciju, tim više što je vanjski zrak hladniji (izrazi za izračun gubitka temperature uračunavaju razliku temperature betona i vanjskog zraka). Početna temperatura betona ($t_{poč}$) dobiva se tako da se od temperature betona nakon spravljanja odbiju svi gubici temperature (t_{gubit}): $t_{poč} = t_{sprav} - t_{gubit}$

Srednja temperatura betona pri očvršćavanju (t_{sr}) određuje se prema izrazu koji ovisi o modulu površine (MP) elementa u koji je beton ugrađen :

- ako je $MP \leq 3$ a $t_{sr} = (t_{poc} + 5) / 2$
- ako je $3 < MP < 8$ a $t_{sr} = t_{poc} / 2$
- ako je $MP \geq 8$ a $t_{sr} = t_{poc} / (1,03 + 0,181 \times MP + 0,006 t_{poc})$

Vrsta CEMENTA	Broj dana stvrdnjavanja	Srednja temperatura betona pri stvrdnjavanju					
		1°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C
		Relativna čvrstoća betona u %					
Portland 30	3	12	17	24	33	40	44
	5	20	26	35	45	50	56
	7	27	35	42	52	59	66
	10	37	45	53	64	72	78
	15	47	57	68	77	85	92
	28	65	79	90	100	-	-
Portland 40	3	14	21	30	37	45	52
	5	21	30	38	47	56	63
	7	27	37	47	55	64	72
	10	36	47	57	67	75	83
	15	49	60	72	83	92	97
	28	70	80	91	100	-	-
Portland 50	3	17	22	29	34	47	52
	5	26	34	40	47	57	64
	7	35	43	52	61	68	75
	10	46	55	65	75	82	87
	15	57	70	80	89	99	-
	28	75	86	95	100	-	-

Tablica s postotcima čvrstoće betona prema njegovoj srednjoj temperaturi obzirom na broj dana stvrdnjavanja



Betonski radovi u zimskim uvjetima

Visoka temperatura okoline izrazito ubrzava proces vezivanja i očvršćivanja betona. Ako je to prebrzo nastaje pojačana poroznost sa svim svojim negativnim učincima. Pored gubitaka u čvrstoći i smanjenju vijeka trajanja betona, visoke temperature zbog nedostatka vode koji uzrokuju (hlapljenje) skraćuju period obrade svježeg betona. Najugroženiji su površinski slojevi betona koji štite armaturu i jezgru betona od prodora vode i agresivnih utjecaja iz okoline.

Mjere i postupci koji koji omogućavaju betoniranje pri niskim temperaturama betoniranja

Uvijek je poželjno isplanirati dinamiku izvođenja radova tako da temperatura što manje negativno utječe na tehnologiju rada i uzrokuje zastoje i povećanje troškova (pri čemu se gleda na statističke podatke hidrometeoroloških zavoda o mjesečnim temperaturama i drugim klimatskim uvjetima). Tako bi npr. kod zgrada

bilo idealno da se do konstruktivno završe do zimskog perioda, pda da se onda u zatvorenom odvijaju završni radovi.

Postoje krajevi (države na sjeveru) kod kojih je period temperaturno pogodan za betoniranje prekratak da bi se svi potrebni radovi mogli samo tada izvesti. Kod nas u zimskom periodu intenzitet radova opada ili se čak nekada potpuno obustavljaju (kolektivni godišnji odmor), ali ni u našoj kontinentalnoj klimi nije uvijek moguće izbjeći betonske radove pri niskim temperaturama. Danas zahtjevana dinamika realizacije građevinskih projekata uglavnom ne dozvoljava dugotrajnije prekide, a duži prekidi loše se odražavaju i na iskorištenost raspoložive građevinske mehanizacije. To stvara probleme kod njene amortizacije, jer kada se ne radi u poduzeću i dalje ostaju fiskalni troškovi, a ne zarađuje se.

Kako bi se osiguralo dovoljno brzo očvršćivanje i izbjeglo bilo kakva oštećenja betona uslijed djelovanja zime, potrebno je ugrađivati beton odgovarajuće temperature i omogućiti mu kvalitetnu njegu, tj. zaštitu od prijevremenog (naglog) gubitka topline i ciklusa smrzavanja. Naravno da uvijek kada se beton ugrađuje treba paziti da ne dolazi na podlogu, u oplatu ili na armaturu na kojima ima leda.

temperatura [°C]	relativna vlažnost [%]			
	0 - 25	25 - 50	50 - 75	75 - 100
40-45	6	5	4	3
35-40	7	6	5	4
30-35	6	5	4	3
25-30	5	4	3	Nije potrebna posebna njega betona
20-25	4	3		
15-20	3			
10-15	3	Nije potrebna posebna njega betona		
5-10	3	3		

Preporučljivo minimalno trajanje negovanja svježih betona spravljenih s portland cementima izraženo u satima (M, Muravljov "Osnovi teorije i tehnologije betona")

Ovisno o vrsti građevine, vrsti betoniranog elementa, njegovim karakteristikama i karakteristikama betona, temperaturi vanjskog znaka (predviđenoj veličini i periodu djelovanja) i raspoloživim resursima izvođača radova bira se jedna ili više usklađenih, nadopunjujućih mjera i postupaka koje će se poduzeti. U pravilu se nastoji zadovoljiti osiguranje zahtjevane kvalitete betona uz najmanje povećanje troškova pri izvođenju radova u datim uvjetima.

Predviđene mjere koje se trebaju poduzeti pri betonskim radovima planiraju se i definiraju prije izvedbe u *Projektu betona*. Taj elaborat izrađuje izvođač radova (mora ga prihvatiti nadzorni inženjer) i u njemu mora biti definirano sve što treba poduzeti za postizanje betona zahtjevanih svojstava i kvalitete. Uz ostalo (tehničke uvjete za svojstva betona, program kontrole kvalitete betona, kontrolu armature i završnu ocjenu kvalitete), on obvezno sadrži opis sastojaka (uključuje recepturu za svaku klasu betona) i načina proizvodnje i plan betoniranja (opisuje sve bitne radnje pri transportu i ugradbi betona, njegu betona, postupke koji se poduzimaju u slučaju prekida betoniranja i u slučaju nezadoovljavajuće kvalitete).

Već pri temperaturama vanjskog zraka nižim od 5°C potrebna je povećana pažnja, a posebne mjere su svakako potrebne na temperaturama ispod 0°C. Moguće je poduzimati sljedeće:

1. Prilagoditi sastav betonske smjese, što znači uporabu:

- cementa koji razvijaj veću temperaturu tijekom hidratacije (aluminatni cementi, cementi veće kvalitete, cementni finijeg mliva), kao i stavljanje veće količine cementa;
- različitih kompatibilnih aditiva za niske temperature koji se dodaju u vodu ili u mješalicu – plastifikatora i superplastifikatora koji smanjuju potrebnu količinu vode, ubrzivača vezanja i stvrdnjavanja (za postizanje ranih

čvrstoća), dodataka za zaštitu od smrzavanja (antifrizi - antimrazi) koji snižavaju točku smrzavanje vode (Svi oni ne utječu bitno na mehanička svojstva, a ne mogu ići jedino s aluminatnim cementima.);
 - agregata s manjim udjeom zrna promjera manjeg od 0,2 mm (svakako je poželjno da je na deponiji zaštićen od mraza).

2. Zagrijavanje komponenti betona pri spravljanju:

- vode koja se dodaje (najjeftiniji postupak, a voda ima pet puta veću specifičnu toplinu od agregata) – moguće je zagrijavanje do granice isparavanja (obično do 85°C) i mora se izmješati s agregatom prije dodavanja cementa;

- kamenog agregata (zajedno s vlagom koja je vezana uz njega) – zagrijavanje s cijevima kroz koje prolazi topli medij (vodena para) – potrebna odgovarajuća oprema u sklopu betonare (kotlovnica, cjevovod) i zaštita od vanjskog zraka (ovisno o načinu skladištenja)

Potrebna temperatura zagrijavanja agregata određuje se iz izraza toplinskog bilansa u kojem je ona jedina nepoznanica:

$$t_{sprav} [^{\circ}C] = \frac{s_{ag} \times (q_{ag} \times t_{ag}^{gr} + q_{cem} \times t_{cem}) + s_{vod} \times (q_{vod} \times t_{vod}^{gr} + q_{vl} \times t_{vl})}{s_a \times (q_{agr} + q_{cem}) + s_{vod} \times (q_{vod} + q_{vl})}$$

gdje je:

t_{sprav} – tražena temperatura betona nakon spravljanja,

t_{ag} i t_{vl} – temperature agregata i vlage uz agregat prije zagrijavanja (jednake),

t_{vz} – temperatura vanjskog zraka,

t_{cem} – temperatura cementa (ne zagrijava se da se ne ošteti),

t_{vod} – temperatura vode prije zagrijavanja,

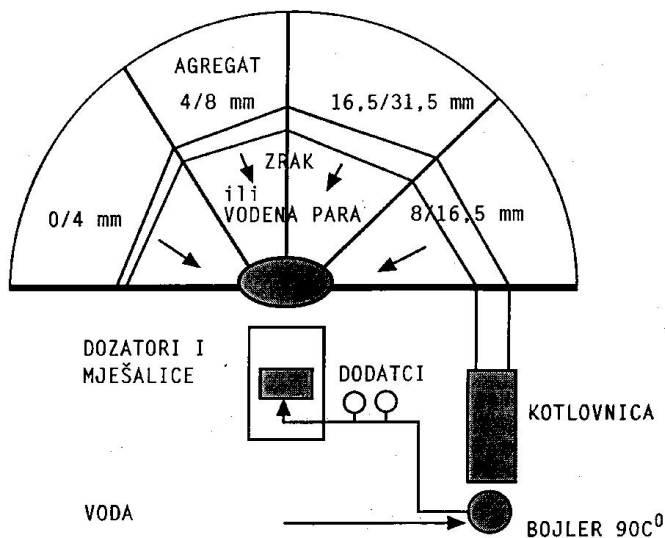
t_{vod}^{gr} – temperatura vode nakon zagrijavanja,

s_{ag} i s_{vod} – koeficijenti specifične topline (toplinski kapacitet) za agregat i vodu,

q_{cem} , q_{ag} , q_{vl} i q_{vod} – količine cementa, agregata, vlage s agregatom i vode koja se dodaje po 1 m³ spravljanog betona.

Laki betoni u odnosu bolje zadržavaju toplinu od običnih, pa njihove temperature nakon spravljanja, odnosno prije ugradbe mogu biti niže.

Prevelika početna temperatura betona (npr. iznad 20°C) nije poželjna jer se tada događa da beton naglo gubi svoju temperaturu i zbog toga nastaju pukotine.



Betonara sa zagrijavanjem vode (bojler) i agregata vodenom parom i vrelin zrakom (pri grijanju treba zvjezdoliku deponiju agregata treba prekriti folijom)

3. Grijanje betona – tijekom privremenog odlaganja (pretovarni silos za beton) i/ili nakon ugradbe (u oplati), što može biti preko armature (el. energijom) i grijalicama (oplati treba biti dobro provodljiva za toplinu). Treba paziti da se oplata ne skida prije nego razlika između najtoplije točke u betonu i vanjskog zraka bude manja od 25°C jer veća temperaturna razlika dovodi do nastanka pukotina u betonu. I to je jedan od razloga zbog kojih se mora pratiti temperaturu betona u konstrukciji.



Zagrijavanje betona u oplatama (Ukrajina)

U izrazu je (od oznaka koje nisu prije spominjane):

Z – vrijeme očvršćavanja betona do potrebne čvrstoće,

y_{bet} – zapremininska težina betona ($q_{vod} + q_{vl} + q_{ag} + q_{cem}$) u kg,

s_{bet} – koeficijent specifične topline za beton (1,05 KJ / kg °C),

E – kalorična moć (egzotermičnost) cementa u vrijeme od Z sati u kg/m³ (uobičajeno se očitava iz grafikona gdje su dane vrijednosti E u odnosu na broj dana očvršćavanja, a svaka vrsta cementa prikazana je različitom krivuljom),

K_U – koeficijent predaje topline preko oplata izražen u KJ / m² h °C (ili u W/m²°C).

Proračun za ovu metodu pretpostavlja da su jednaki uvjeti utopljavanja svih dijelova izvođene betonske konstrukcije, mada temperatura betona zapravo neće svuda biti ista, pogotovo ako je konstrukcija raščlanjena.

Obzirom da se vrijeme Z potrebno za postizanje potrebne čvrstoće određenog betona uz njegovu srednju temperaturu može očitati iz prije priložene tablice, iz prethodnog izraza može se izračunati veličina koeficijenta predaje topline. Za koeficijent predaje topline vrijedi da je:

$$K_U = \frac{\beta}{0,05 + \sum \frac{d_i}{\lambda_i}}$$

U izrazu je:

β – korekcijski koeficijent ovisan od jačine vjetra (slab vjetar s $v < 4$ m / s ili jak vjetar s $v > 4$ m / s) i vrsti oplata, odnosno njenoj propustljivosti (broj slojeva, vrsta materijala)

λ_i – koeficijent provodljivosti topline za materijal "i" u oplati

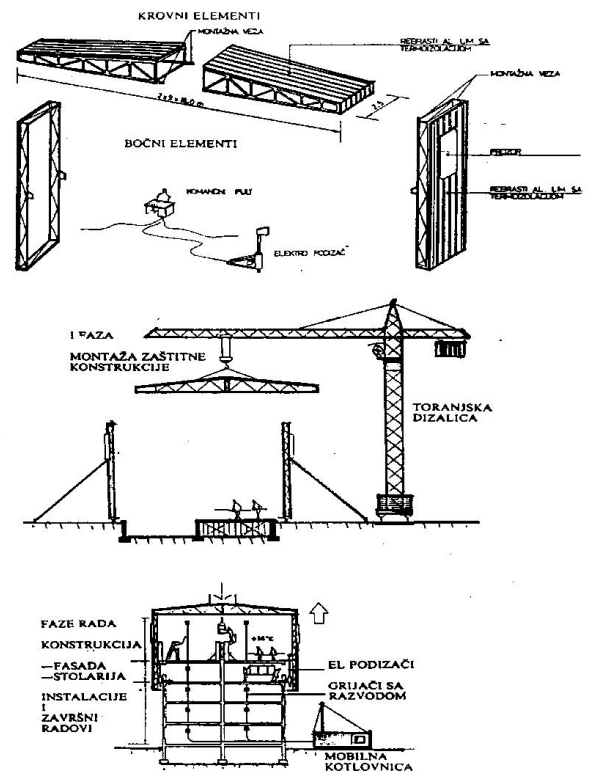
d_i – debljina "i"-tog sloja oplata izražena u m

Ako je K prije određeno (u proračunu hlađenja betona) uz poznavanje debljine slojeva oplata kojima se dodaje termizolacijski materijal, iz prethodnog izraza može se kao jedina nepoznanica debljina izolacije (uračunava se odgovarajuća vrijednost l_i za planiranu vrstu TI drugih oplatah slojeva i koeficijent β prema konstrukciji oplata i očekivanoj jačini vjetra). Za debljinu termizolacije na oplati, ako se radi o tvornički proizvedenim pločama (kao stiropor), bira se jednaka ili prva deblja od izračunate dimenzije.

U slučaju prethodno pripremljene oplata s TI, ako u vrijeme betoniranja nastupe temperature zraka veće od očekivanih i uračunatih u ove proračuna, moguće je smanjiti potrebnu temperaturu spravljenog betona (proračuna se reducirana veličina), odnosno tako smanjiti energiju i troškove zagrijavanja.

5. Zaštita cijelog prostora u kojem se odvijaju betonski radovi s nekom privremenom konstrukcijom (može se pomicati kako napreduju radovi – u visinu ili dužinu)

Danas građevinari raspolažu s šatorima s grijačima kojima se prekrivaju gradilišta i koji štite od oborina i niskih temperatura, međutim, to iuma smisla primjenjivati samo na većim gradilištima, kod kojih je važna brzina gradnje.



Zaštita od niskih temperatura zraka i hladnog vjetra građevine koja se betonira s izolirajućom termo folijom (cijela zgrada, lijevo) i montažnom konstrukcijom (desno)

U krajnjem slučaju, kod dugotrajnih vrlo niskih temperatura može se prijeći na tehnologiju montažne gradnje koja osim što ne ovisi toliko o vremenskim uvjetima ima i drugih dobrih karakteristika..

Postupanje kod visokih temperatura zraka

Svježi beton potrebno je što je moguće prije obraditi i zaštititi od isušivanja, jer da bi beton mogao ispravno očvrnuti potrebna mu je vlaga. Pravovremenom sekundarnom obradom betona moguće je osigurati potrebnu količinu vlage. Njegu i zaštitu betona treba provoditi istovremeno. Ako izostanu potrebne mjere, mogu se kao posljedica snažnog djelovanja vjetra i sunca javiti tako snažna oštećenja koja stavljaju u pitanje uopće uporabnu valjanost i trajnost betona.

Neki standardi u zemljama članicama EU zahtijevaju da temperatura tijekom ugradbe betona ne smije prelaziti $+ 30^{\circ}\text{C}$ bez da su poduzete posebne mjere.

U slučaju betoniranja u danima s visokim temperaturama zraka može se:

- betonirati kasno poslijepodne ili predvečer,
- izabrati beton odgovarajuće konzistencije obzirom na vanjske vremenske prilike,
- dodavati u spravljeni beton usporivače vezanja (retardere),
- koristiti za beton cimente niske topline hidratacije cementa i letećeg pepela,
- vodu s kom se spravlja beton prethodno ohladiti, a može se stavljati i usitnjeni led u mješalicu,
- korišteni kameni agregat zaštititi od velikog zagrijavanja na deponiji,
- betoniranje obavljati u slojevima, tako da se sljedeći sloj betonira tek kad se prethodno ugrađeni beton dovoljno ohladi,
- intenzivno polijevati zgrađeni beton hladnom vodom,
- pokriti beton mokrim jutanim vrećama ili drugim prekrivačima koji zadržavaju vlagu (redovitim polijevanjem treba ih održavati vlažnima),
- duže zadržavati beton u oplati.

Djelatnici na gradilištu trebaju biti informirani o opasnostima koje prijete od eventualnog dodavanja vode betonu na gradilištu.

**Objavljeno u „m-Kvadrat“ Stručni časopis za građevinarstvo i arhitekturu,
listopad 2014., br. 72, str. 48-54.
Izdavač: „Sfera“d.o.o. Mostar**