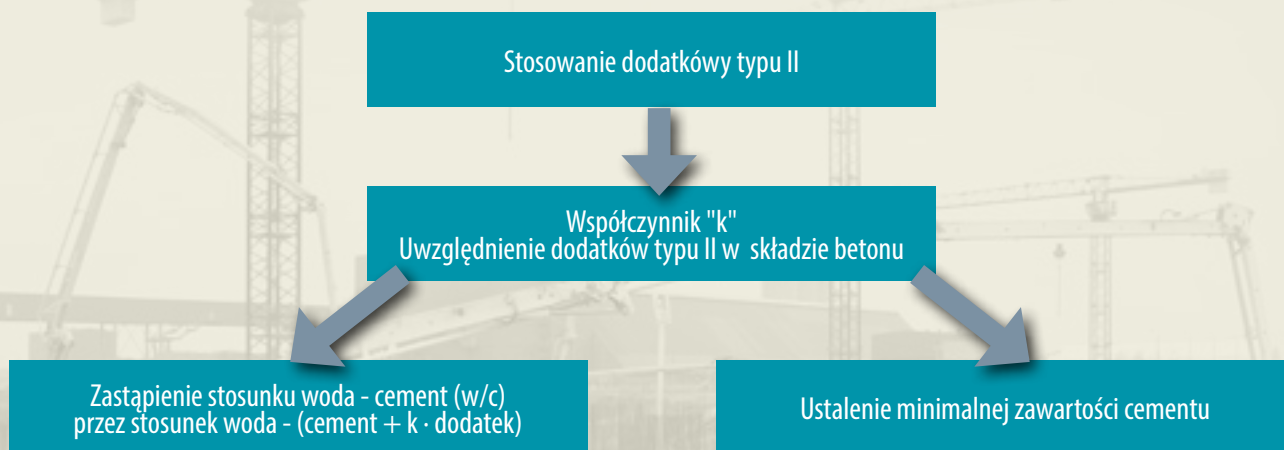


Według normy PN-EN 206:2014 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” popiół lotny może być stosowany do wytwarzania betonu, jeżeli spełni wymagania zawarte w normie PN-EN 450-1:2012 „Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności” Podział dodatków do betonu oraz wymagania w zakresie właściwości zdefiniowane w normie PN-EN 206:2014 znajdują się w karcie A3 Vademecum. W niniejszej karcie przedstawiono zasady stosowania popiołu lotnego w składzie betonu według koncepcji współczynnika „k” (rys.1; tabela 1).



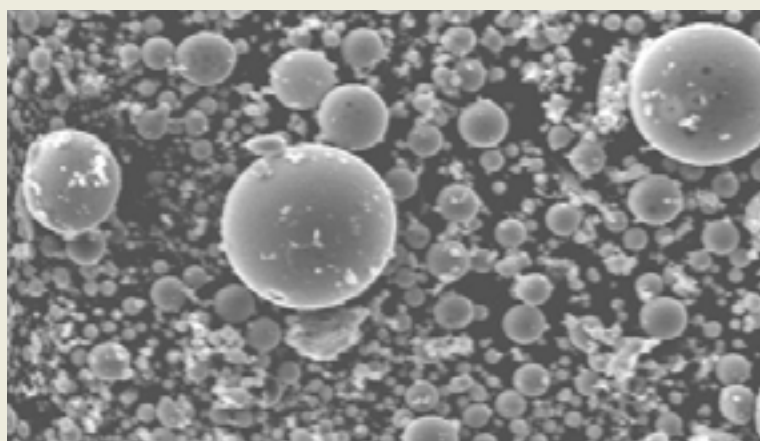
Rys. 1. Stosowanie koncepcji współczynnika k wg PN-EN 206

Tabela 1. Warunki stosowania popiołu lotnego jako dodatku typu II do betonu zawarte w normie PN-EN 206:2014

Rodzaj cementu zgodnie z PN-EN 197-1	Wielkość współczynnika „k”	Maksymalna ilość dodatku wliczana do $w/c_{eq}$
CEM I	0,4	popiół/cement $p/c \leq 0,33$
CEM II/A		popiół/cement $p/c \leq 0,25$

## DLACZEGO STOSUJEMY POPIÓŁ LOTNY W BETONIE?

**Popiół lotny** to drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymywany przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przede wszystkim  $SiO_2$  i  $Al_2O_3$ . Otrzymywany jest przez elektrostatyczne lub mechaniczne wydzielenie pylastych cząstek z gazów odlotowych z elektrowni. Na rysunku 2 przedstawiono widok ziaren popiołu lotnego (mikroskop skaningowy SEM).



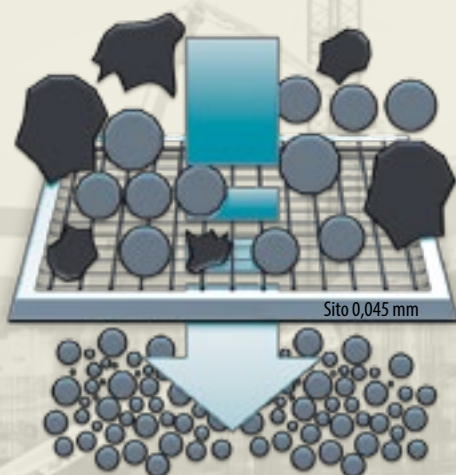
Rys. 2. Ziarna popiołu lotnego

Krajowe popioły lotne spełniające wymagania normy PN-EN 450-1 pochodzą ze spalania pyłu węglowego z węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych w elektrowniach lub elektrociepłowniach. Z praktycznego punktu widzenia najważniejsze właściwości popiołu lotnego to **miałkość i zawartość straty prażenia**.

## MIAŁKOŚĆ POPIOŁU LOTNEGO

Miałość popiołu lotnego mierzona jest jako pozostałość na sicie o boku oczka 0,045 mm. Przesiew wykonywany jest na mokro zgodnie z normą PN-EN 451-2:1998 „Metoda badania popiołu lotnego. Oznaczanie miałości przez przesiewanie na mokro” lub na sucho zgodnie z normą PN-EN 933-10:2009 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek – Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)”.

Drobne frakcje popiołu lotnego zawierają znacznie więcej ziaren kulistych. Dlatego ważne jest, aby stosować popiół lotny o możliwie niskiej pozostałości na sicie (wysokiej miałości). Norma PN-EN 450-1 wyróżnia 2 kategorie miałości popiołów lotnych (rys. 3).



### Kategorie popiołu lotnego ze względu na miałość:

$N \leq 40 \%$

$S \leq 12 \%$

Warunek dodatkowy  
- wodożądność:  $\leq 95 \%$   
wodożądności cementu  
porównawczego (CEM I)

Rys. 3. Kategorie popiołu lotnego ze względu na miałość zgodnie z normą PN-EN 450-1:2012

## STRATA PRAŻENIA POPIOŁU LOTNEGO

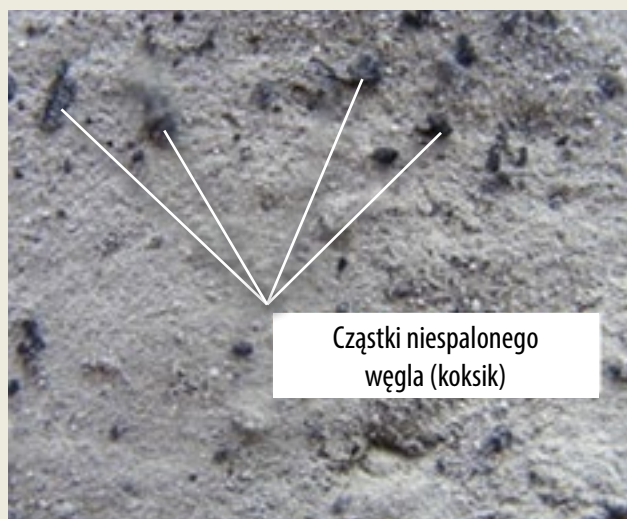
Stratę prażenia popiołu lotnego oznacza się zgodnie z normą PN-EN 196-2:2013 „Metody badania cementu – Część 2: Analiza chemiczna cementu” poprzez prażenie próbki w temperaturze 950 °C w wydłużonym czasie do 1 godziny. Norma PN-EN 450-1 wyróżnia 3 kategorie popiołów lotnych ze względu na stratę prażenia (rys.4). Na stratę prażenia popiołu lotnego składają się przede wszystkim cząstki niespalonego węgla w postaci koksiku. Są to głównie bezkształtne, porowate ziarna o dobrze rozwiniętej powierzchni właściwej, przez co są bardzo niepożądane. Ich niekorzystną morfologię potwierdzają zdjęcia z elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) przedstawione na rysunku 5. Efektem dużej porowatości jest zwiększona wodożądność popiołu z wysoką zawartością strat prażenia. Skutkuje to pogorszeniem urabialności mieszanki, zmniejszeniem efektywności domieszek chemicznych oraz obniżeniem mrozoodporności betonu. Istnieje także ryzyko wypływanego niespalonych cząstek węgla (niska gęstość) na powierzchnię betonu. Prowadzi to do pogorszenia wyglądu powierzchni betonu oraz może utrudnić proces powierzchniowego utwardzania betonu, np. przy wykonywaniu posadzek betonowych. Na podstawie wieloletnich doświadczeń oraz danych literaturowych zaleca się stosowanie do betonu popiołów lotnych kategorii A.

### Kategorie popiołu lotnego ze względu na stratę prażenia:

Kategoria A  $\leq 5 \%$

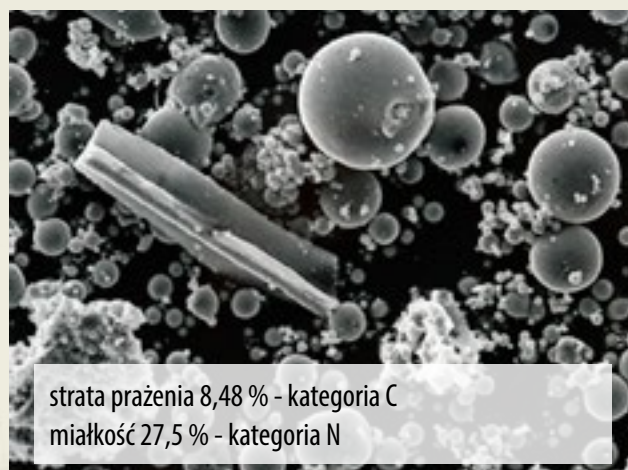
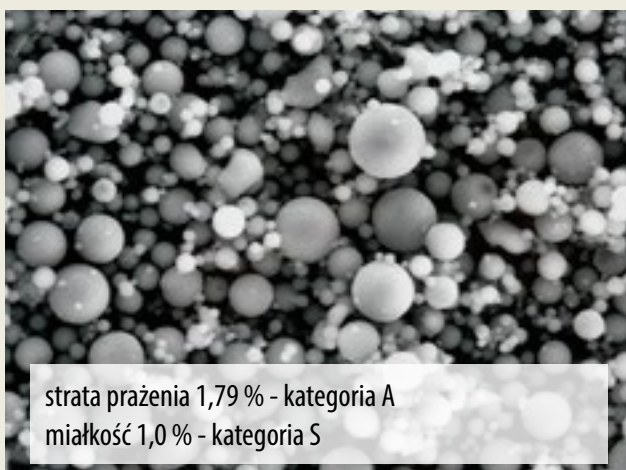
Kategoria B  $\leq 7 \%$

Kategoria C  $\leq 9 \%$



Rys. 4. Kategorie popiołu lotnego ze względu na stratę prażenia zgodnie z normą PN-EN 450-1



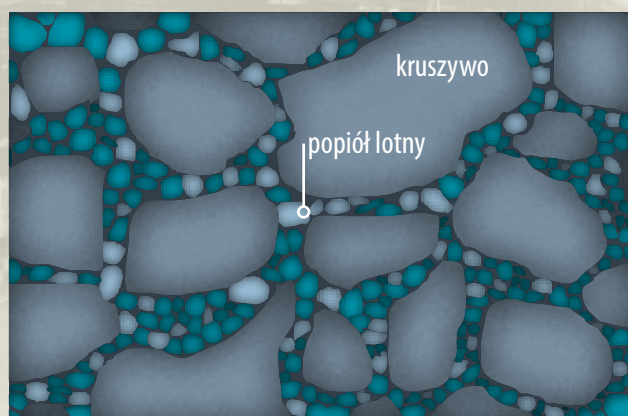


Rys. 5. Zdjęcie popiołów lotnych o różnej zawartości straty prażenia i różnej miałkości (SEM)

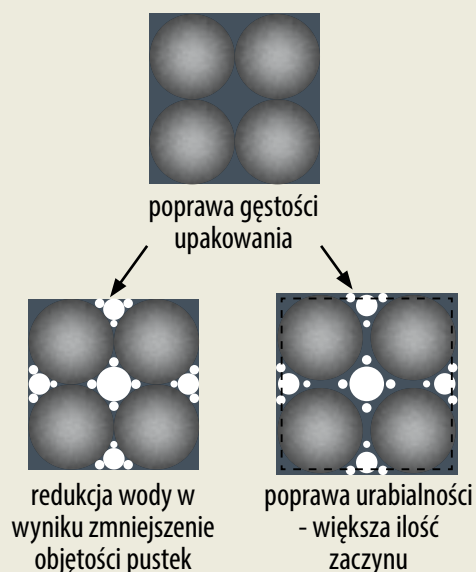
## WPŁYW DODATKU POPIOŁU LOTNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI BETONU

Stosowanie popiołu lotnego w betonie niesie ze sobą wiele korzyści związanych m.in. z miałkością ziaren, ich kulistym kształtem oraz aktywnością pucolanową. Dodatek popiołu lotnego umożliwia:

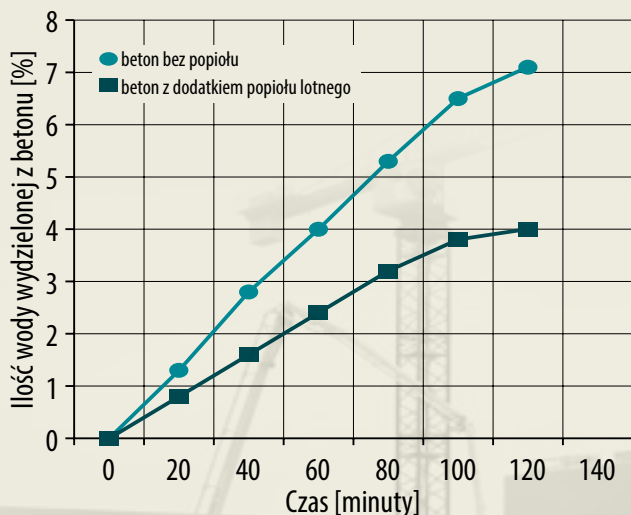
- doszczelnienie stosu okruszowego kruszywa (rys. 6), a w konsekwencji obniżenie wodożądności i porowatości kapilarnej – niska strata prażenia i wysoka miałkość poprawiają efekt wypełnienia,
- modyfikację ilości oraz właściwości zaczynu i mieszanki betonowej (rys. 7), np.: spoistość – przeciwdziałanie segregacji składników mieszanki (rys. 8), poprawa pompowności mieszanki betonowej; obniżenie wydzielonego ciepła w procesie hydratacji spoiwa – przeciwdziałanie spękanom termicznym,
- łatwiejsze przemieszczania ziaren kruszywa względem siebie - efekt „łożyskowania”,
- przyspieszenie hydratacji cementu we wczesnym etapie (ziarna popiołu jako zarodki krystalizacji) oraz zwiększenie ilości wody związanej w fazie C-S-H (zmniejszenie porowatości kapilarnej betonu),
- wzrost wytrzymałości końcowej betonu jako efekt aktywności pucolanowej popiołu lotnego (rys. 9),
- zagęszczenie mikrostruktury - zmiana rozkładu porów w kierunku porów drobnych, co zwiększa trwałość betonu (rys. 10),
- ograniczanie zawartości  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – składnika podatnego na czynniki korozyjne,
- zmniejszenie grubości strefy kontaktowej zaczyn-kruszywo i przerwanie jej ciągłości - ze względu na wysoką porowatość, strefa kontaktowa (rys.11) jest preferowaną drogą migracji czynników korozyjnych.



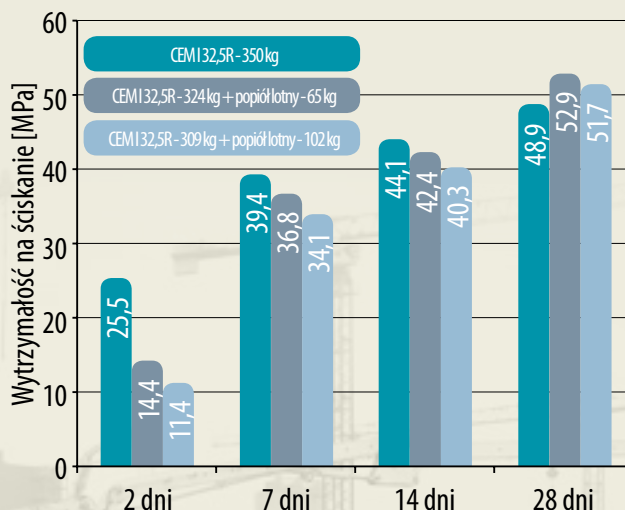
Rys. 6. Popiół lotny jako uzupełnienie frakcji



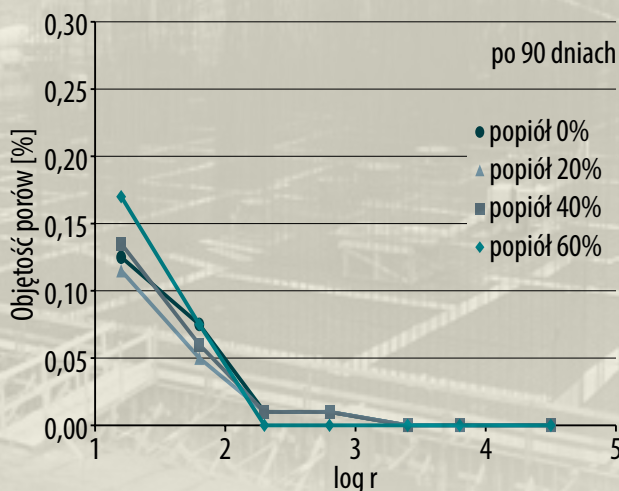
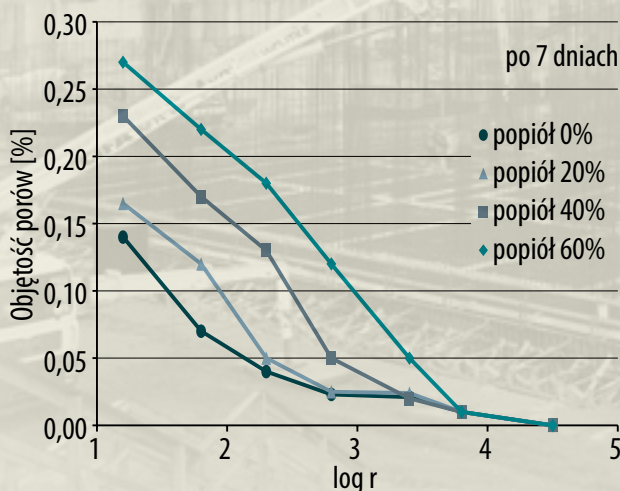
Rys. 7. Możliwości modyfikacji zaczynu za pomocą dodatku popiołu lotnego



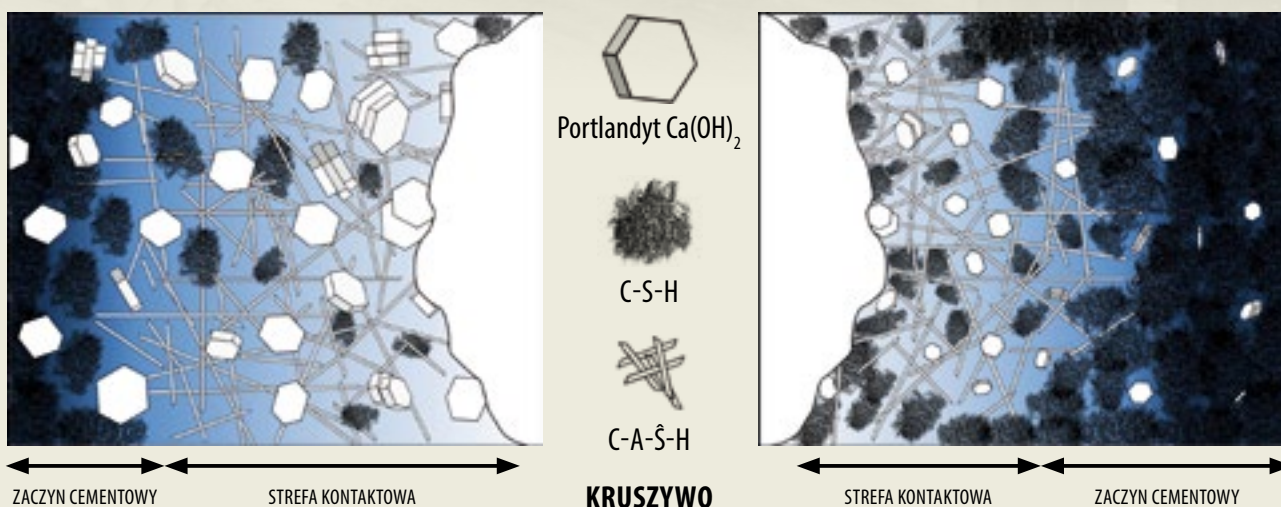
Rys. 8. Wpływ stosowania popiołu lotnego na ilość wody samoistnie wydzielanej z betonu



Rys. 9. Wpływ zastosowania popiołu lotnego jako zamiennika cementu na wytrzymałość na ściskanie



Rys. 10. Wpływ dodatku popiołu lotnego na objętość porów w betonie po 7 i 90 dniach



Rys. 11. Schemat budowy strefy kontaktowej zaczyn-kruszywo w betonie

Zgodnie z normą PN-EN 206 stosowanie popiołu lotnego w składzie betonu pozwala obniżyć minimalną zawartość cementu. Ograniczenia w tej kwestii zawarte są w projekcie normy PN-B-06265 „Krajowe uzupełnienie PN-EN 206:2014 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”. Minimalne zawartości cementu z udziałem popiołu lotnego w poszczególnych klasach ekspozycji zawarte są w tabeli 2.



Tabela 2. Zalecane wartości graniczne dotyczące składu oraz właściwości betonu w klasach ekspozycji.

Klasy ekspozycji																					
Brak zagrożenia korozją lub agresją	Korozyja spowodowana chłorkami						Korozyja spowodowana karbonatyzacją						Środowiska agresywne chemicznie		Agresja wywołana ścieraniem						
	Woda morska			Chlorki nie pochodzące z wody morskiej			Agresja spowodowana zamrażaniem/rozmarzaniem														
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
Maksymalne w/c <sup>a)</sup>	-	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,45	0,55	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Minimalna klasa wytrzymałości	C8/10	C16/20	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	
Minimalna zawartość cementu <sup>b)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	-	260	280	280	300	300	320	300	320	320	340	300	300	320	300	320	360	300	300	320	
Minimalna zawartość CEM I lub CEM II/A przy stosowaniu dodatku mineralnego (kg/m <sup>3</sup> )	-	250	260	260	280	280	300	280	300	300	310	280	280	300	280	300	330	280	280	300	
Minimalna zawartość powietrza (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9)	9)	-	-	-	-	-	-	
Inne wymagania	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	F <sub>2</sub> '	F <sub>1</sub> '	F <sub>1</sub> '	F <sub>red</sub> 6')	-	Cement odporny na siarczany <sup>e)</sup>	M <sub>DE</sub> wartości deklarywana <sup>g)</sup>	- dla 2/8 M <sub>DE</sub> ≤ 25 - dla 8/16 M <sub>DE</sub> ≤ 20 M <sub>DE</sub> ≤ 15 <sup>g)</sup>	- dla 2/8 M <sub>DE</sub> ≤ 20 - dla 8/16 M <sub>DE</sub> ≤ 15 <sup>g)</sup>	-

a) W przypadku stosowania koncepcji współczynnika k maksymalnego współczynnika w/c oraz minimalną zawartość cementu modyfikuje się zgodnie z PN-EN 206 p.5.2.5.2.

b) Dopuszcza się stosowanie dodatków typu II do produkcji betonu, lecz nie jako ekwiwalent części zawartości cementu oraz bez możliwości uwzględnienia tego dodatku przy określaniu w/c

c) Zawartość objętościowa powietrza w mieszance betonowej przed jej wzbudowaniem zależy od maksymalnego wymiaru ziaren zastosowanego kruszywa i musi wynosić dla kruszywa: do 8 mm ≥ 5,5%; do 16 mm ≥ 4,5%; do 32 mm ≥ 4,0%; do 64 mm ≥ 3,5%.

d) Beton o konsystencji V0 (≥ 31 s) oznaczonej wg PN-EN 12350-3 i w/c ≤ 0,4 może być produkowany bez dodatkowego napowietrzenia.

e) W przypadku, gdy zawartość siarczany (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) w środowisku pracy betonu wskazuje na klasy ekspozycji XA2 lub XA3 należy zastosować cement odporny na siarczany (SR) zgodny z EN 197-1 lub cement odporny na siarczany (HSR) zgodny z normą PN-B 19707.

f) Kruszywo o mrozoodporności odpowiadającej kategorii (F) wg EN 12620.

g) Kruszywo o mrozoodporności odpowiadającej kategorii (M<sub>DE</sub>) wg EN 12620.

h) Wymagana właściwa pielęgnacja i obróbka powierzchni.

i) Kruszywo o mrozoodporności w roztworze NaCl (F<sub>red</sub>)<sup>e)</sup> odpowiadającej wartości deklarowanej, określonej na podstawie badania wg EN 13667-6.

