



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Rodzaj i jakość spoiw a trwałość i bezpieczeństwo konstrukcji

Artur Łagosz

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

Katedra Technologii Materiałów Budowlanych



Rodzaje spoiw - „cementów” oferowanych na rynku

- Cementy „powszechnego użytku” zgodne z PN-EN 197-1:2012
 - CEM (I-V) klas wytrzymałości 32,5; 42,5; 52,5
 - Cement „biały” zgodny z PN-B 30010:2016-01
 - Cementy „specjalne” zgodne z PN-B 19707:2013-10
 - CEM (II, III, V) HSR klas wytrzymałości 32,5; 42,5; 52,5
 - CEM (I-V) NA klas wytrzymałości 32,5; 42,5; 52,5
 - Cementy „specjalne o bardzo niskim cieple hydratacji” zgodne z PN-EN 14216:2015-01
 - VLH (III-V) klasy wytrzymałości **22,5**
 - Cementy „murarskie” zgodne z PN-EN 413-1:2011
 - MC klas wytrzymałości **5; 12,5; 22,5**
 - MC X klas wytrzymałości **12,5; 22,5**
- (niski poziom zawartości klinkieru)

Rodzaje spoiw - „cementów” oferowanych na rynku

- Mieszanki cementowo-popiołowe → oferowane jako materiał zawierający w nazwie własnej słowo „CEMENT” (zawierają popiół lotny krzemionkowy i/lub wapienny w ilości nawet ponad 50% masy)

Spoiwo dostępne w sprzedaży na podstawie aprobaty technicznej.

Z uwagi na **nazwę własną i kanały dystrybucji**, często mylony z przez ekipy budowlane i remontowe z „cementami powszechnego użytku”

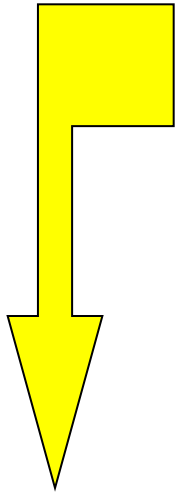
Czynniki mające wpływ na trwałość i bezpieczeństwo konstrukcji

- Jakość **spoiwa** (prezentacja p. Piotra Kijowskiego „Nieprawidłowości na rynku wyrobów cementowych”)
- Brak właściwej pielęgnacji betonu – szczególnie **niedostosowanie czasu** jej realizacji **do właściwości (i jakości) użytego spoiwa/betonu**
- Nieodpowiedni dobór RODZAJU spoiwa do rodzaju wykonywanego elementu i klasy ekspozycji betonu (norma PN-B-06265:2004 przewiduje brak możliwości stosowania niektórych rodzajów cementów do klas ekspozycji XC3 i 4, XD1-3, XS1-3, XF1-4, XA1-3, XM1-3)
- Ilość cementu, w/c i klasa wytrzymałości betonu niedostosowane do wyspecyfikowanych właściwości betonu

Jakość „cementów”

- **Czynniki wpływające na nieodpowiednią jakość cementów:**
 - Udziały składników głównych niezgodne z wymaganiami np. normy PN-EN 197-1 – ponadnormatywny udział składników nieklinkierowych:
 - efekt przypadku
 - działanie celowe – poprawa „konkurencyjności”

Spodziewane efekty zastosowania w produkcji betonów i zapraw cementów o „nadmiarowej” zawartości składników nieklinkierowych



- Wydłużenie czasu wiązania
- Spowolnienie szybkości narastania wytrzymałości jako efekt mniejszej intensywności hydratacji składników cementu
- Nieuzyskanie wytrzymałości normowej

Narażenie betonów (szczególnie otuliny zbrojenia) i zapraw na przesuszenie, a w konsekwencji na:

- przerwanie hydratacji cementu
- przyspieszenie karbonatyzacji
- zwiększenie podatności betonu i stali zbrojeniowej na zjawiska korozji

Wymagania dotyczące pielęgnacji betonu w zależności od rozwoju wytrzymałości (w/c oraz składu i właściwości użytego spoiwa) dla przykładowej klasy pielęgnacji

	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 2	Klasa pielęgnacji 3	Klasa pielęgnacji 4
Czas (godziny)	12 ^a	NA	NA	NA
Procent wymaganej wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie po 28 dniach	Nie stosuje się (NA)	35 %	50 %	70 %

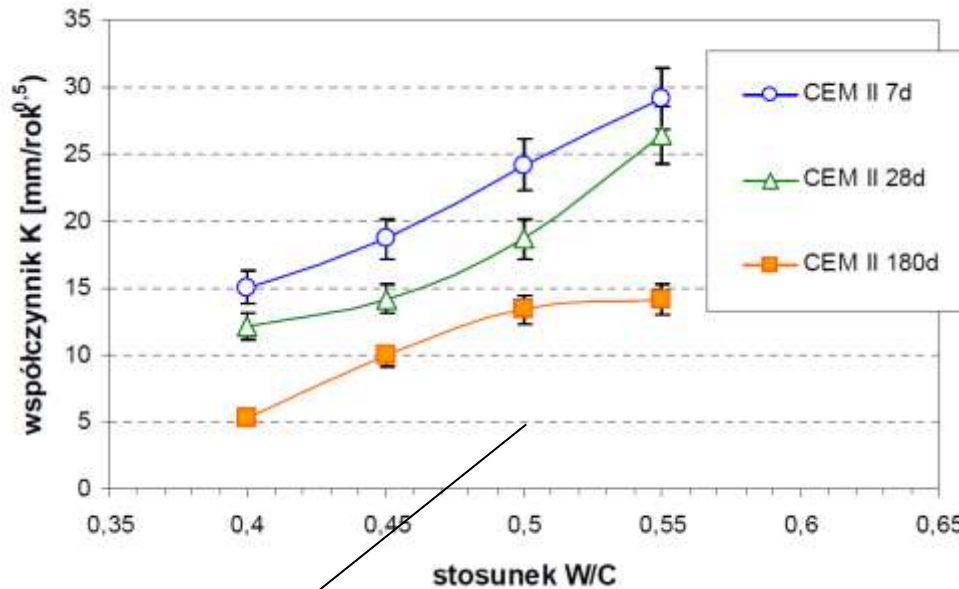
^a Pod warunkiem, że wiązanie nie trwa dłużej niż 5 godzin, a temperatura powierzchni betonu jest równa 5 °C lub wyższa.

Temperatura powierzchni betonu (t), °C	Minimalny okres pielęgnacji, dni ^a		
	Rozwój wytrzymałości na ściskanie ^{c,d}		
	$(f_{cm2}/f_{cm28}) = r$		
	szybki $r \geq 0,50$	średni $0,50 > r \geq 0,30$	wolny $0,30 > r \geq 0,15$
$t \geq 25$	1,0	1,5	2,5
$25 > t \geq 15$	1,0	2,5	5
$15 > t \geq 10$	1,5	4	8
$10 > t \geq 5^b$	2,0	5	11

^a Plus każdy okres wiązania przekraczający 5 h.
^b Zaleca się, aby w temperaturze poniżej 5 °C czas pielęgnacji był wydłużony o czas, w którym temperatura jest poniżej 5 °C.
^c Rozwój wytrzymałości betonu jest mierzony stosunkiem średniej wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach do średniej wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, wyznaczonych w badaniach wstępnych lub na podstawie znanych właściwości betonu o porównywalnym składzie (patrz EN 206-1).
^d W przypadku bardzo powolnego rozwoju wytrzymałości betonu, zaleca się, aby szczególne wymagania były podane w specyfikacji wykonawczej.

PN-EN 13670:
2011
Wykonywanie
konstrukcji z
betonu

Wpływ czasu dojrzewania na szybkość karbonatyzacji zapraw o różnym stosunku w/c



← Czas pielęgnacji wilgotnościowej



Z powyższego wynika również, że stały czas pielęgnacji + wolniejszy rozwój wytrzymałości betonu = szybsza karbonatyzacja → mniejsza trwałość konstrukcji

$$D = K \cdot t^{0.5}$$

gdzie: D – głębokość karbonatyzacji w mm;
K – współczynnik karbonatyzacji w mm/rok^{0.5}
t – czas ekspozycji w mm.

Spodziewane efekty zastosowania w produkcji betonów i zapraw cementów o „nadmiarowej” zawartości składników nieklinkierowych

- Wydłużenie czasu wiązania
- Spowolnienie szybkości narastania cech wytrzymałościowych jako efekt mniejszej intensywności hydratacji składników cementu

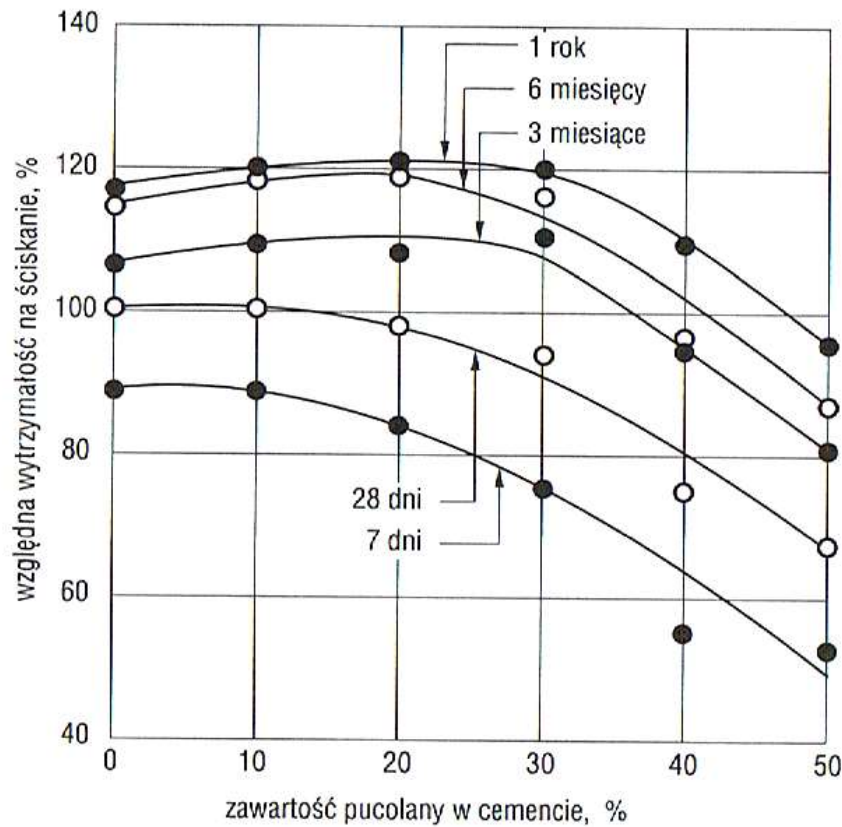
- **Nieuzyskanie wytrzymałości normowej**

XF1	XF2	XF3	XF4
0,55	0,55	0,50	0,45
C 30/37	C 25/30	C 30/37	C 30/37

Narażenie betonów i zapraw na nieuzyskanie przewidzianych klas wytrzymałości:

- Niespełnienie kryteriów trwałości dla wyszczególnionych klas ekspozycji
- Zwiększenie wyężenia przekrojów

Wpływ ilości pucolany na wytrzymałość betonu

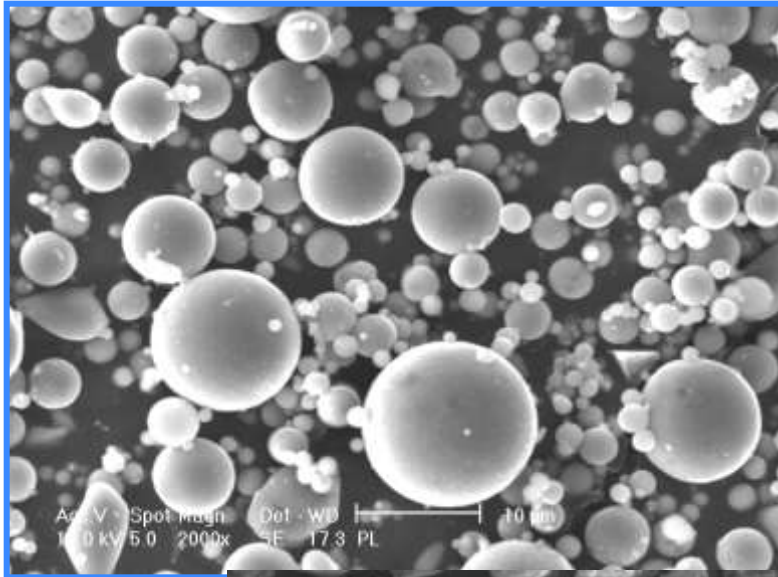


XF1	XF2	XF3	XF4
0,55	0,55	0,50	0,45
C 30/37	C 25/30	C 30/37	C 30/37

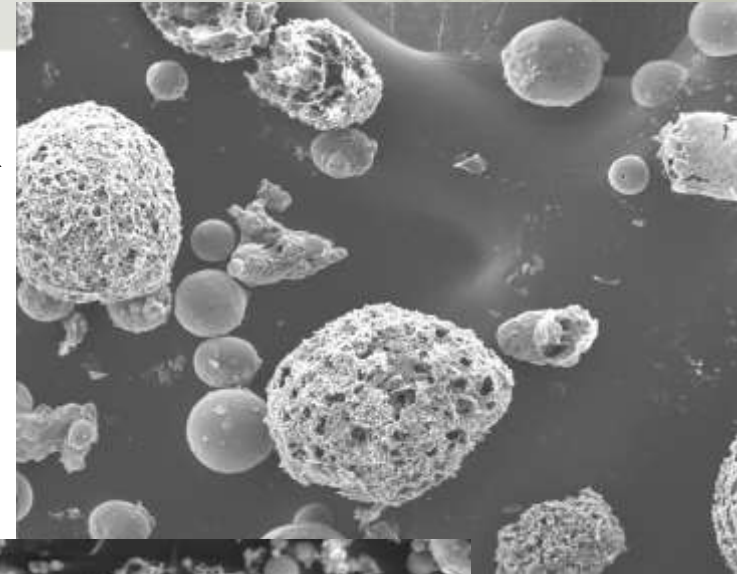
Jakość „cementów”

- **Czynniki wpływające na jakość cementów:**
 - Udziały składników głównych niezgodne z wymaganiami np. normy PN-EN 197-1 – ponadnormatywny udział składników nieklinkierowych:
 - efekt przypadku
 - działanie celowe – poprawa „konkurencyjności”
 - Jakość składników głównych niezgodna z wymaganiami:
 - Stosowanie popiołów lotnych o wysokich stratach prażenia, nieodpowiedniej miąższości, zbyt niskiej aktywności pucolanowej, ze współspalania ponadnormatywnej ilości biomasy,
 - Stosowanie UPS podwyższających wodożądność

Przykład obrazów mikroskopowych różnych popiołów

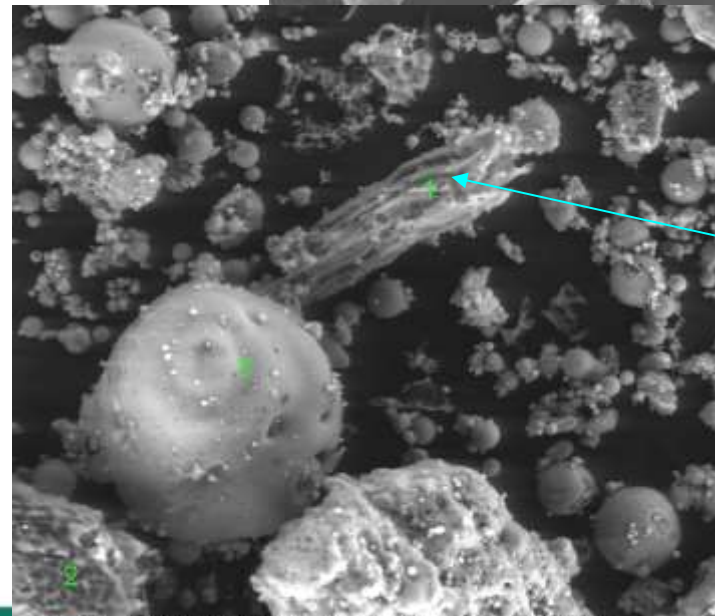
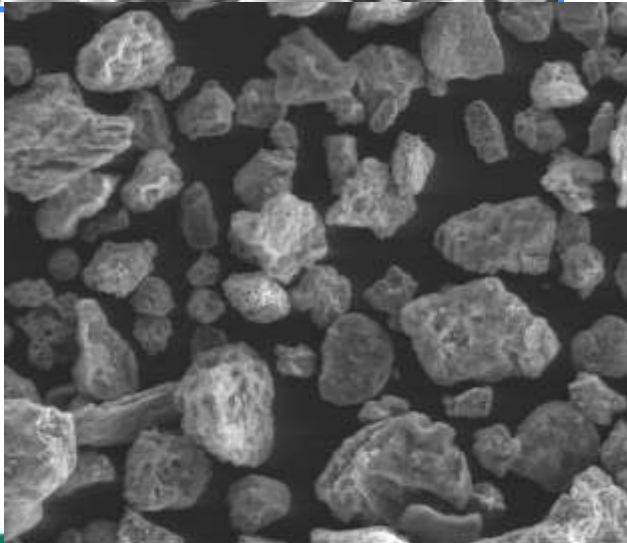


„koksik” –
niespalony
węgiel



*M. Gawlicki,
A. Rakowska*

popiół
fluidalny



niespalona
biomasa

Zanieczyszczenia spoiw niespalonym węglem – obserwacje makroskopowe



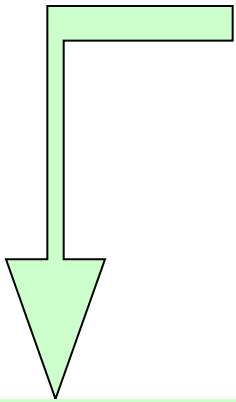
Zanieczyszczenia
spoiwa



Mieszanka betonowa

Spodziewane efekty zastosowania w produkcji betonów i zapraw cementów o nieodpowiedniej jakości składników głównych lub drugorzędnych

- Wzrost wodożądności cementu
- Wydłużenie lub skrócenie czasu wiązania
- Nieuzyskanie klasy wytrzymałościowej



- Wzrost kosztów produkcji betonów i zapraw poprzez wzrost zużycia domieszek dla uzyskania przewidzianych cech mieszanki betonowej i betonu stwardniałego → **gdy właściwości spoiwa zostały poznane i uwzględnione**
- Narażenie betonów i zapraw na nieuzyskanie przewidzianych klas wytrzymałości:
 - niespełnienie kryteriów trwałości dla wyszczególnionych klas ekspozycji
 - zwiększenie wyężenia przekrojów



Przykład użycia popiołów lotnych krzemionkowych o różnych stratach prażenia

Właściwości betonów o ustalonych proporcjach spoiwa i kruszywa oraz wody, którą dodawano w ilości mającej zapewnić oczekiwaną konsystencję **w zależności od poziomu strat prażenia i miąłkości popiołów użytych do przygotowania spoiw na drodze homogenizacji (bez przemiału);**

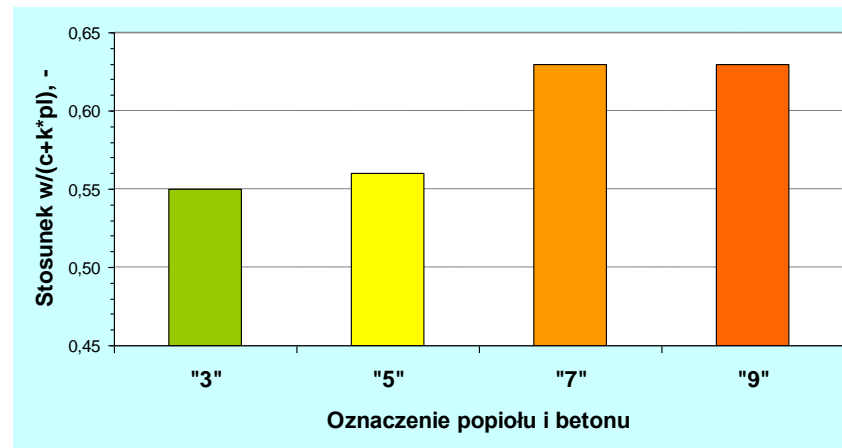
Spoiwo – 360 kg/m³ (w tym 270kg cementu CEM I 42,5R i 90kg popiołu lotnego); w/c oczekiwane = 0,55

Oznaczona cecha	Oznaczenie i wyniki badań popiołów lotnych			
	„3”	„5”	„7”	„9”
Strata prażenia, %	3,86	4,98	6,96	8,33
Gęstość, g/cm ³	2,14	1,96	2,06	1,90
Powierzchnia właściwa wg Blaine’a, m ² /kg	310	275	220	265
Miałkość , pozostałość na sicie 45 µm w przesiewaniu na mokro, %	36,9	54,8	49,9	60,1

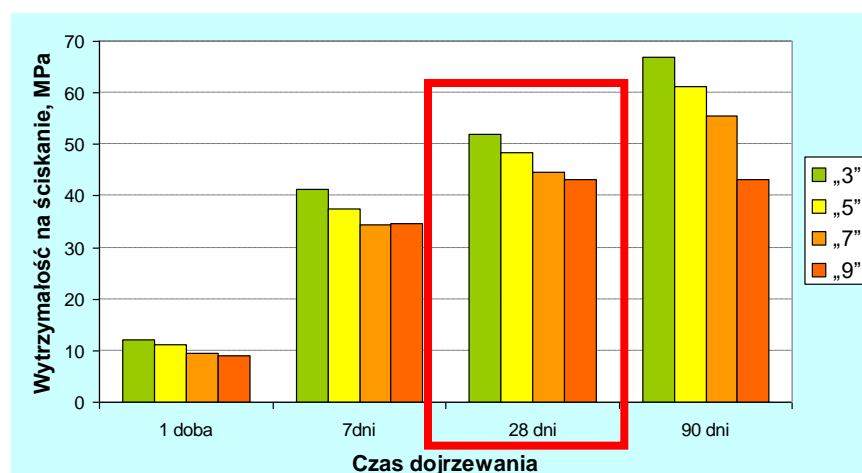
Zmienne w/c dla stałej zawartości domieszki!

Przykład użycia popiołów lotnych krzemionkowych o różnych wartościach strat prażenia

Oznaczona cecha	Oznaczenie i wyniki badań popiołów lotnych			
	„3”	„5”	„7”	„9”
Strata prażenia, %	3,86	4,98	6,96	8,33
Gęstość, g/cm ³	2,14	1,96	2,06	1,90
Powierzchnia właściwa wg Blaine’a, m ² /kg	310	275	220	265
Miałość, pozostałość na sicie 45 µm w przesiewaniu na mokro, %	36,9	54,8	49,9	60,1

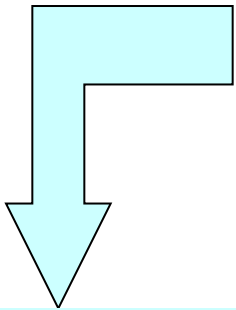


Kryteria oceny mrozoodporności betonu wg PN-B-06250:1988	Parametry uzyskane dla przygotowanych betonów			
	„3”	„5”	„7”	„9”
Ubytek masy, %	0,07	0,04	- 0,13	- 0,49
Spadek wytrzymałości, %	4,7	15,7	29,3	33,4
Wygląd próbek po 50 cyklach	brak pęknięć	brak pęknięć	brak pęknięć	pęknięcia
Ocena mrozoodporności w zakresie F50	pozytywna	pozytywna	negatywna	negatywna



Spodziewane efekty zastosowania w produkcji betonów i zapraw cementów o nieodpowiedniej jakości składników głównych lub drugorzędnych

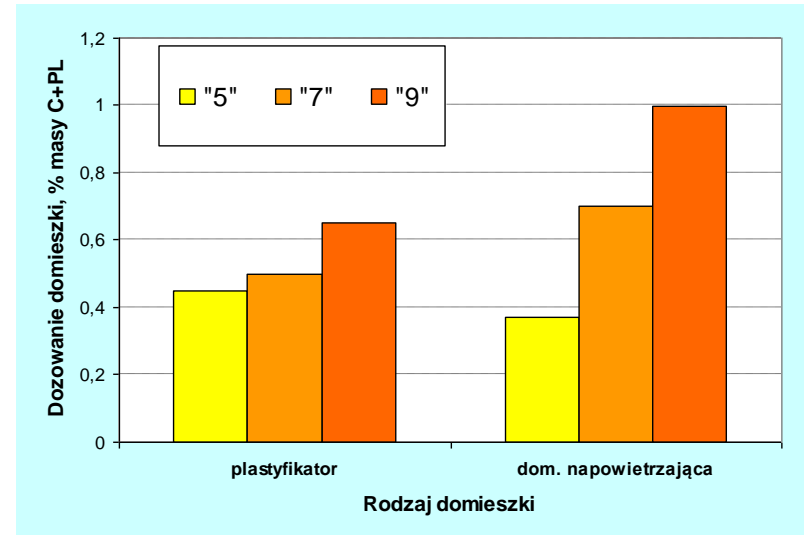
- Wzrost wodożądności cementu
- Wydłużenie lub skrócenie czasu wiązania
- Nieuzyskanie wytrzymałości normowej
- **Nieuzyskanie oczekiwanego poziomu napowietrzenia**



- **Narażenie betonów na zmniejszenie odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie**

Przykład użycia popiołów lotnych krzemionkowych o różnych wartościach strat prażenia do betonów z domieszkami napowietrzającymi

Oznaczona cecha	Oznaczenie i wyniki badań popiołów lotnych			
	„3”	„5”	„7”	„9”
Strata prażenia, %	3,86	4,98	6,96	8,33
Gęstość, g/cm ³	2,14	1,96	2,06	1,90
Powierzchnia właściwa wg Blaine’a, m ² /kg	310	275	220	265
Mialkość , pozostałość na sicie 45 µm w przesiewaniu na mokro, %	36,9	54,8	49,9	60,1



Zaniechanie korekty ilości domieszki napowietrzającej podczas stosowania popiołów „7” i „9” prowadzi do uzyskania mieszanki o zawartości powietrza < 3% → **OGRANICZENIE TRWAŁOŚCI**



Wpływ rodzaju spoiwa na właściwości betonów – wyniki badań laboratoryjnych

Wpływ rodzaju spoiwa na właściwości betonów

- Ocenie porównawczej poddano betony wykonane w taki sam sposób i tych samych kruszyw z zastosowaniem 4 rodzajów spoiw:
 - **SPOIWO 1:** CEM II/B-V 32,5R-HSR: PN-B-19707:2003 (spoiwo z cementowni)
 - **SPOIWO 2:** MC 12,5X:PN-EN 413-1:2011 - cement murarski o nazwie własnej „CEMENT” (spoiwo z „mieszalni”)
 - **SPOIWO 3:** CEM II/A-V 32,5R: PN-EN 197-1 (spoiwo z „mieszalni”)
 - **SPOIWO 4:** Mieszanka cementowo-popiołowa o nazwie własnej CEMENT 32,5 (wg opisu: cement portlandzki z dodatkami popiołu wapiennego) – dystrybucja na podstawie AT (spoiwo z „mieszalni”)

Właściwości spoiw – wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach twardnienia

	SPOIWO 1 (cement z cementowni)	SPOIWO 2 (cement murarski)	SPOIWO 3 (cement z mieszalni)	SPOIWO 4 (mieszanka cementowo-popiołowa)
Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach, MPa	32,0	10,9	24,2	16,9
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa	47,7	17,7	34,5	27,5
Konsystencja – rozptyw zaprawy normowej na stoliku rozptywu, mm	151	131	136	112

SPOIWO 1: CEM II/B-V **32,5R**-HSR (spoiwo z cementowni)

SPOIWO 2: MC **12,5X** - cement murarski (spoiwo z „mieszalni”)

SPOIWO 3: CEM II/A-V **32,5R** (spoiwo z „mieszalni”)

SPOIWO 4: Mieszanka cementowo-popiołowa - CEMENT **32,5** (spoiwo z „mieszalni”)

Skład betonów przygotowanych do badań → **NBR 20** (normowy beton recepturowy wg PN-B-06265:2004)

- Stała proporcja spoiw do sumarycznej masy kruszyw
- Ilość wody odpowiednia do uzyskania takiej samej konsystencji mieszanki betonowej

	Beton I SPOIWO 1	Beton II SPOIWO 2	Beton III SPOIWO 3	Beton IV SPOIWO 4
<i>0/2 mm piasek, kg/m³</i>	584	572	574	567
<i>2/8 mm żwir, kg/m³</i>	529	518	519	513
<i>8/16 mm żwir, kg/m³</i>	529	518	519	513
<i>woda, kg/m³</i>	239	235	234	258
<i>spoiwo, kg/m³</i>	392	384	385	380
Właściwości mieszanki betonowej:				
gęstość, kg/m ³	2273	2226	2231	2231
konsystencja – opad stożka, mm	145	145	145	150
zawartość powietrza, % objętości	1,3	1,4	1,4	1,0
Stosunek W/S, -	0,61	0,61	0,61	0,68

Wytrzymałość na ściskanie betonów po 2 i 28 dniach twardnienia

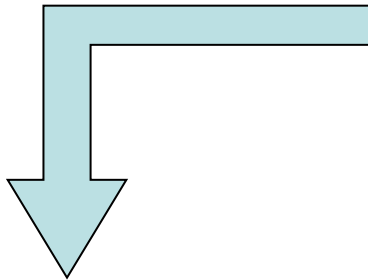
Oznaczona cecha betonu	Oznaczenie betonu / wyniki badań			
	Beton I SPOIWO 1	Beton II SPOIWO 2	Beton III SPOIWO 3	Beton IV SPOIWO 4
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach, MPa	12,6	3,5	6,7	6,5
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa	33,3	15,3	27,8	23,0
$f_{cm,2} / f_{cm,28}$, -	0,38	0,23	0,24	0,28
Rozwój wytrzymałości	Średni	Wolny	Wolny	Wolny
Klasa wytrzymałości betonu	C20/25	C8/10	C16/20	C12/15
Ocena zgodności klasy wytrzymałości betonu z oczekiwaną klasą wytrzymałości NBR 20	Zgodna, a nawet wyższa	Klasa niższa od oczekiwanej	Zgodna	Klasa niższa od oczekiwanej

Wytrzymałość na ściskanie betonów po 2 i 28 dniach twardnienia

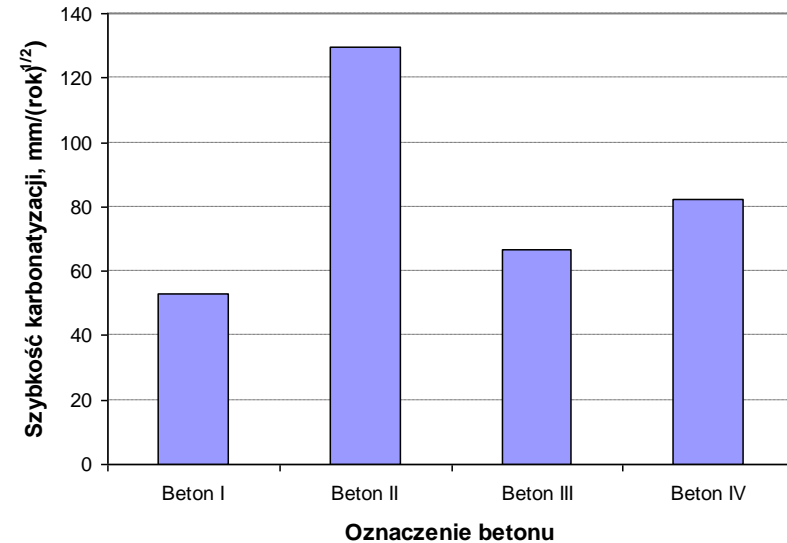
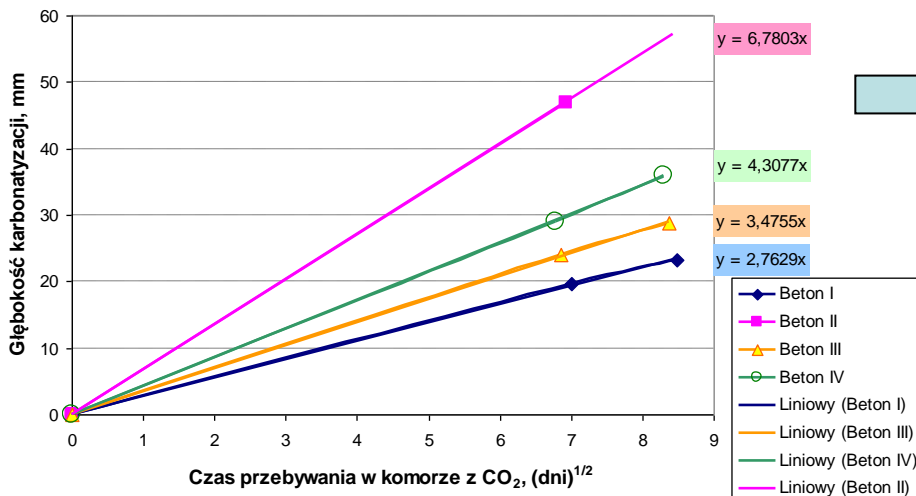
Oznaczona cecha betonu	Oznaczenie betonu / wyniki badań			
	Beton I SPOIWO 1	Beton II SPOIWO 2	Beton III SPOIWO 3	Beton IV SPOIWO 4
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach, MPa	12,6	3,5	6,7	6,5
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa	33,3	15,3	27,8	23,0
$f_{cm,2} / f_{cm,28}$, -	0,38	0,23	0,24	0,28
Rozwój wytrzymałości	Średni	Wolny	Wolny	Wolny
Klasa wytrzymałości betonu	C20/25	C8/10	C16/20	C12/15
Ocena zgodności klasy wytrzymałości betonu z oczekiwaną klasą wytrzymałości NBR 20	Zgodna, a nawet wyższa	Klasa niższa od oczekiwanej	Zgodna	Klasa niższa od oczekiwanej

Wodoszczelność i odporność betonów na karbonatyzację

Dojrzewanie wstępne –
28 dni w wodzie + 7 dni
w laboratorium



Oznaczona cecha betonu	Oznaczenie betonu / wyniki badań			
	Beton I SPOIWO 1	Beton II SPOIWO 2	Beton III SPOIWO 3	Beton IV SPOIWO 4
Głębokość karbonatyzacji, mm (46-49 dni w 5% CO ₂)	19,6±1,2	47,0	24,0±1,1	29,0±1,9
Głębokość karbonatyzacji, mm (69-72 dni w 5% CO ₂)	23,3±1,4	50,0	28,9±1,3	36,0±2,2
Max głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, mm	32	43	30	37



Dojrzewanie wstępne
– 56 dni w wodzie

Badania przerwano po 132 i 130 cyklach i oznaczono obniżenie wytrzymałości na ściskanie

Ilość cykli zamrażania i rozmrażania	Ocena makroskopowa próbek po wskazanej ilości cykli zamrażania i rozmrażania			
	Beton I SPOIWO 1	Beton II SPOIWO 2	Beton III SPOIWO 3	Beton IV SPOIWO 4
25 cykli	Brak uszkodzeń	Brak uszkodzeń	Znaczne uszkodzenia powierzchni wszystkich próbek, ich krawędzi i rogów (badania przerwano po 37 cyklach)	Znaczne uszkodzenia powierzchni wszystkich próbek, ich krawędzi i rogów (badania przerwano po 34 cyklach)
50 cykli	Brak uszkodzeń	Brak uszkodzeń	-	-
75 cykli	Brak uszkodzeń	Brak uszkodzeń	-	-
100 cykli	Brak uszkodzeń	Brak uszkodzeń	-	-
125 cykli	Brak uszkodzeń	Znaczne uszkodzenie 1 próbki: złuszczenia powierzchni i krawędzi, ale brak pęknięć	-	-
Stopień mrozo-odporności	Szacowany – F100 (po 132 cyklach obniżenie wytrzymałości na ściskanie większe niż 20%)	Szacowany – F100 lub F75 (po 130 cyklach obniżenie wytrzymałości na ściskanie większe niż 20%)	Beton nie odporny na zamrażanie i rozmrażanie (po 37 cyklach nie można ocenić obniżenia wytrzymałości na ściskanie)	Beton nie odporny na zamrażanie i rozmrażanie (po 34 cyklach nie można ocenić obniżenia wytrzymałości na ściskanie)

Podsumowanie

- Niewłaściwe użycie części spoiw mineralnych dostępnych na rynku do wykonywania elementów konstrukcyjnych stanowi zagrożenie dla ich trwałości oraz bezpieczeństwa użytkowania
- Powszechne stosowanie słowa CEMENT do spoiw przewidzianych do znacząco różnych celów utrudnia wybór właściwego rodzaju spoiwa do wykonywania elementów konstrukcyjnych
- Ilość i właściwości dodatków mineralnych używanych do produkcji spoiw w „mieszalniach” istotnie kształtują właściwości betonów – brak wiedzy w tym względzie prowadzić może do uzyskania betonów o niedostatecznych cechach użytkowych



Dziękuję za uwagę