

# WSPÓLNE ODDZIAŁYWANIE DODATKU POPIOŁU LOTNEGO I DOMIESZKI NAPOWIETRZAJĄCEJ NA KINETYKĘ HYDRATACJI KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

Valeriy EZERSKIY, Małgorzata LELUSZ\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki eksperymentu laboratoryjnego wpływu ilości popiołu lotnego i domieszki napowietrzającej, współczynnika wodno-cementowego oraz czasu dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie (odpowiedź  $Y$ ) próbek zaprawy cementowej. W eksperymencie rozpatrywano następujący zakres zmienności czynników: czynnik  $X_1$  ( $PI/C$ ) – od 0 do 0,33; czynnik  $X_2$  ( $d/C$ ) – od 0 do 0,003;  $X_3$  ( $W/C$ ) – od 0,5 do 0,6; czynnik  $X_4$  (czas dojrzewania) – od 28 do 180 dni. Na podstawie wyników opracowano model matematyczny zależności  $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  oraz przeanalizowano charakter i stopień wpływu poszczególnych czynników. Przestrzeń czynnikową zbadano na występowanie ekstremum. Ustalono, że maksymalne wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskuje się przy następujących wartościach czynników:  $X_1 = +1$ ;  $X_2 = -1$ ;  $X_3 = -0,1$ ;  $X_4 = 0,9$ , tj. przy ilości popiołu  $PI/C = 0,33$ ; bez domieszki napowietrzającej; dla  $W/C = 0,54$  z oraz po 169 dniach dojrzewania

**Słowa kluczowe:** kompozyty cementowe, popiół lotny, domieszka napowietrzająca, wytrzymałość na ściskanie, kinetyka narastania wytrzymałości.

## 1. Wstęp

Jedynym skutecznym sposobem zapewnienia wysokiej odporności betonu na destrukcyjne działanie mrozu jest jego napowietrzanie. Normy stosowane w krajach europejskich o zbliżonym do Polski klimacie podają wymagania dotyczące napowietrzania betonu w klasach ekspozycji XF1–XF4. Normy te nakazują uzyskanie minimalnej zawartości powietrza w mieszance betonowej na poziomie od 2,5% do 5% w zależności od kraju, klasach ekspozycji i przeznaczenia betonu.

Celowo wprowadzone do mieszanki betonowej pęcherzyki powietrza o średnicy 10-300  $\mu\text{m}$  kompensują naprężenia powstające wskutek przyrostu objętości wody w wyniku zamrażania. Czynniki materiałowe, które wpływają na jakość napowietrzania, to rodzaj i ilość środka napowietrzającego, konsystencja mieszanki i wskaźnik  $W/C$ , ilość i rodzaj cementu, dodatki mineralne, kruszywo, woda zarobowa oraz inne domieszki chemiczne (Glinicki, 2004 i 2005; Lelusz i Ezerskiy, 2010a; Rusin, 2002).

Stosowanie drobnoziarnistych dodatków mineralnych oraz innych domieszek chemicznych znacząco wpływa na rozmieszczenie, wymiary i ilość pęcherzyków powietrza w napowietrzonym betonie (Rusin, 2002; Fagerlund,

1997; Glinicki, 2004). Zalecany poziom napowietrzania mieszanki betonowej może być zaburzony przez popiół lotny (Bastian, 1980; Fagerlund, 1997; Łażniewska, 2006; Rusin, 2002). W przypadku mieszanek betonów zwykłych bez stosowania superplastyfikatorów napowietrzanie powoduje obniżenie granicy płynięcia i lepkości plastycznej mieszanki, co w konsekwencji wpływa na upłynnienie mieszanki betonowej powodując poprawę jej urabialności. Taki wpływ domieszek umożliwia częściową redukcję spadku wytrzymałości spowodowanego napowietrzaniem poprzez obniżenie  $W/C$  (Gołaszewski i Szwabowski, 2004).

Stosowanie popiołu lotnego jako dodatku do kompozytów cementowych umożliwia ograniczenie zużycia coraz bardziej deficytowego klinkieru cementowego oraz pozwala uzyskać tworzywo cementowe o podwyższonych właściwościach (Neville, 2000; Giergiczyński, 2006). Używając popiołu lotnego jako jednego ze składników betonu należy liczyć się z możliwością wystąpienia niepożądanych skutków, takich jak zwiększenie wodożądności mieszanki czy zmniejszenie skuteczności działania domieszek chemicznych (Bastian, 1980; Łukowski, 2003).

Istnieje zatem konieczność uściślenia danych o współzależności składników kompozytów cemento-

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.lelusz@pb.edu.pl

wych, takich jak popiół lotny, domieszka napowietrzająca oraz woda na narastanie wytrzymałości próbek w czasie (Lelusz i Ezerskiy, 2010 a i b). Spowolnienie procesu hydratacji kompozytów cementowych zawierających popiół lotny, a także możliwe przyspieszenia tego procesu przy napowietrzaniu mieszanki betonowej wymaga przeprowadzenia specjalistycznych badań laboratoryjnych nad kinetyką twardnienia napowietrzonych kompozytów cementowych zawierających popiół lotny.

Celem opisanych w artykule badań było wykrycie prawidłowości przebiegu w czasie procesu hydratacji napowietrzanej zaprawy cementowej z dodatkiem popiołu lotnego oraz ocena charakteru i stopnia wpływu wybranych czterech czynników: ilości dodatku popiołu lotnego, ilości domieszki napowietrzającej, współczynnika wodno-cementowego oraz czasu dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej wraz z opracowaniem modelu matematycznego wyżej wymienionej zależności.

## 2. Sformułowanie problemu i wybór planu eksperymentu badawczego

Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych  $f_c$ , MPa (odpowiedź  $Y$ ), zgodnie z przyjętym celem, zdecydowano się zbadać w zależności od: ilości dodatku popiołu lotnego  $Pl/C$  (czynnik  $X_1$ ), ilości domieszki napowietrzającej  $d/C$  (czynnik  $X_2$ ), współczynnika wodno-cementowego  $W/C$  (czynnik  $X_3$ ) oraz czasu dojrzewania próbek  $\tau$  (czynnik  $X_4$ ).

Przy przeprowadzeniu badania zastosowano metody statystyczne planowania eksperymentu. Zgodnie z tymi metodami został uzasadniony wybór zakresów zmienności oraz poziomów czynników. Każdy z czynników rozpatrywano na trzech poziomach. Zakresy zmienności oraz poziomy czynników podano w tablicy 1.

W planach eksperymentów zamiast naturalnych wartości czynników ilościowych stosuje się wartości unormowane, przejście do których od wartości naturalnych wykonuje się według zależności (1):

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \frac{\tilde{X}_{i\max} + \tilde{X}_{i\min}}{2}}{\frac{\tilde{X}_{i\max} - \tilde{X}_{i\min}}{2}} \quad (1)$$

Tab. 1. Zakresy zmienności rozpatrywanych czynników  $X_1, X_2, X_3, X_4$

Czynniki zmienne	Jednostka miary	Poziom zmienności		
		-1	0	+1
Ilość popiołu lotnego ( $Pl/C$ ), $X_1$	-	0	0,165	0,33
Ilość domieszki napowietrzającej ( $d/C$ ), $X_2$	-	0	0,0015	0,0030
Współczynnik wodno-cementowy ( $W/C$ ), $X_3$	-	0,5	0,55	0,6
Czas dojrzewania ( $\tau$ ), $X_4$	dni	28	90	180

gdzie:  $\tilde{X}_i, \tilde{X}_{i\max}, \tilde{X}_{i\min}$  są to odpowiednio bieżące, maksymalne i minimalne wartości naturalne  $i$ -tego czynnika.

Unormowując wartości czynników zwrócono uwagę, że jeden z nich, a mianowicie czynnik czwarty ( $X_4$ ) zmieniał się nierównomiernie. W związku z tym, unormowaną wartość tego czynnika określono z poniższej zależności (2), która pozwoliła wykonać linearyzację tego czynnika:

$$X_4 = -0,000033(\tilde{X}_4)^2 + 0,02\tilde{X}_4 - 15348 \quad (2)$$

Wartościom czynnika  $\tilde{X}_4 = 28, 90$  i  $180$  odpowiadały wartości czynnika  $X_4 = -1, 0, +1$ .

Do opisu przestrzeni czynnikowej  $Y_i = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  został wybrany wielomian drugiego stopnia (3), którego współczynniki należało obliczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów.

$$\hat{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{14}X_1X_4 + a_{23}X_2X_3 + a_{24}X_2X_4 + a_{34}X_3X_4 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{44}X_4^2 \quad (3)$$

gdzie:  $X_1, X_2, X_3, X_4$  są czynnikami zmiennymi (zgodnie z tab. 1), a  $a_1, a_2, \dots, a_{44}$  są natomiast współczynnikami równania regresji.

Przy wyborze planu eksperymentu uwzględniono konieczność uzyskania adekwatnego opisu matematycznego rozpatrywanej funkcji celu i możliwość skrócenia ilości prób. Wybrany został plan kompozycyjny symetryczny trójpoziomowy dla czterech zmiennych (Korzyński, 2006) zawierający  $N = 24$  próby (tab. 2). W każdej próbie przewidziano powtarne pomiary na 6 próbkach. Liczba powtórzeń została uzasadniona na podstawie wstępnych badań. Ilość pomiarów w eksperymencie przy sześciokrotnych powtórzeniach każdej próby wynosiła 144. Realizując plan eksperymentu uwzględniano zasady randomizacji kolejności badania próbek.

Tab. 2. Plan oraz wyniki eksperymentu do określenia wytrzymałości na ściskanie  $\bar{Y}_i$  ( $f_c$  [MPa]) zapraw cementowych w zależności od czynników  $X_1, X_2, X_3, X_4$ 

Nr serii	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$\bar{Y}_i$	$S_i^2$
1	-1	-1	-1	-1	39,2	6,9
2	+1	-1	-1	-1	40,8	4,9
3	-1	+1	-1	-1	27,4	3,7
4	+1	+1	-1	-1	36,2	4,8
5	-1	-1	+1	-1	34,8	7,1
...	...	...	...	...	...	...
22	0	0	+1	0	39,2	6,8
23	0	0	0	-1	38,1	3,9
24	0	0	0	+1	48,2	5,7

### 3. Metoda prowadzenia badania

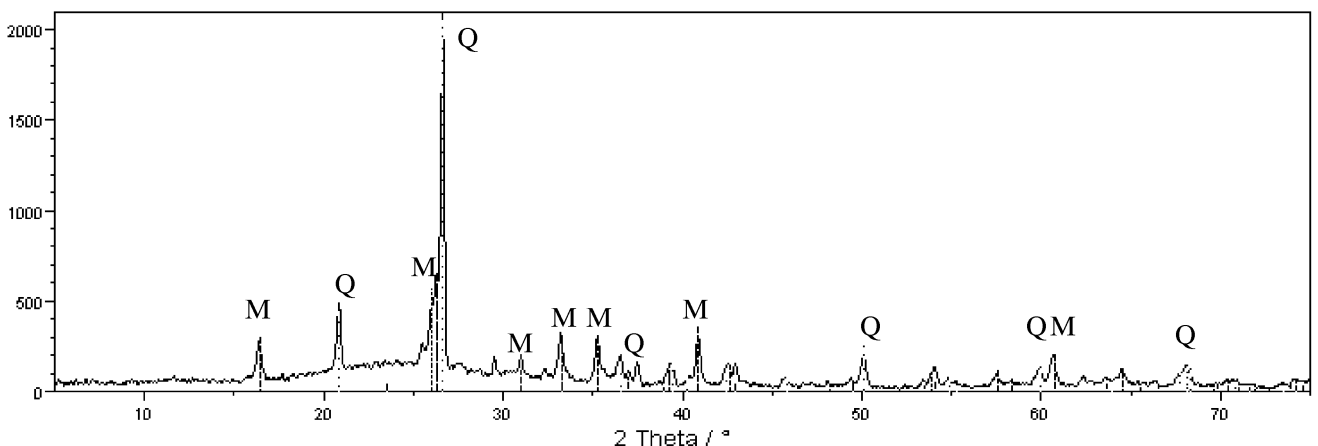
Eksperyment laboratoryjny został przeprowadzony na próbkach stwardniałych zapraw cementowych o składzie zgodnym z planem eksperymentu (tab. 2). We wszystkich składach zapraw ilość cementu była stała i wynosiła  $450 \text{ kg/m}^3$ . W eksperymencie stosowano cement portlandzki CEM I 42,5N-HSR/NA. Wybór rodzaju cementu został uzasadniony w badaniach wstępnych (Lelusz i Ezerskiy, 2010). Skład fazowy klinkieru cementowego był następujący:  $C_3S$  (56,6%),  $C_2S$  (18,3%),  $C_3A$  (1,5%) i  $C_4AF$  (16,4%). Cement wykazywał straty prażenia na poziomie 0,7%, części nierozpuszczalne stanowiły 0,3%, zawartość siarczanów (jako  $SO_3$ ) to 2,0%, zawartość chlorków – 0,003%, zawartość alkaliów (jako  $Na_2O_{eq}$ ) – 0,5%, zawartość  $Al_2O_3$  – 4,1%.

Do wykonania próbek stosowano popiół lotny uzyskany w wyniku spalania węgla kamiennego w elektrociepłowni w ilości zgodnej z planem eksperymentu. Na rysunku 1 przedstawiono dyfraktogram popiołu lotnego zastosowanego do wykonania próbek.

Na podstawie dyfrakcyjnej analizy rentgenowskiej (rys. 1) ustalono, że podstawowe fazy występujące w popiele to mullit i  $\beta$ -kwarc. Popiół zawierał dużo fazy szklistej, anhydryt oraz tlenek wapnia i nieznaczne ilości minerałów wtórnych – kalcytu i gipsu. Zawartość wolnego CaO wynosiła 0,25%. Straty prażenia monitorowane przez 25 dni były mniejsze niż 4,8%. Gęstość właściwa popiołu wynosiła  $2,23 \text{ kg/dm}^3$ .

Do zapraw zastosowano bezchlorkową domieszkę napowietrzającą na bazie żywic naturalnych o gęstości  $1,06 \text{ kg/dm}^3$  i odczynie pH 12. Próbki wykonano z piaskiem rzeczny płukanym o następującym składzie granulometrycznym: frakcja 0/0,125 – 1,4%; frakcja 0,125/0,25 – 11,3%; frakcja 0,25/0,5 – 43,0% frakcja 0,5/1 – 29,9%; frakcja 1/2 – 12,8% i frakcja 2/4 – 1,6%.

Próbki-beleczki  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  zagęszczano na stoliku Vebe. Po rozformowaniu próbki umieszczano w wodzie, gdzie dojrzewały do momentu badania wytrzymałości zgodnie z planem eksperymentu (tab. 1, tab. 2). Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek przeprowadzono zgodnie z procedurą podaną w PN-EN 196-1:2005.

Rys. 1. Dyfraktogram popiołu lotnego użytego do badania laboratoryjnego (M – mullit, Q –  $\beta$ -kwarc)

#### 4. Wyniki badania i ich analiza

Przy wstępnej analizie uzyskanych wyników (tab. 2) ustalono, że istnieje rozrzut wartości w poszczególnych próbach, jak i przy powtórnych pomiarach. Na podstawie danych z powtórnych pomiarów obliczono wariancje dla każdej próby. Jednorodność rzędu wariancji poszczególnych prób  $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots, S_{24}^2$  sprawdzono za pomocą testu statystycznego Cochra. Test ten przewiduje porównanie wartości obliczeniowej kryterium Cochra  $G_{obl}$  z wartością krytyczną. Wartość obliczeniową  $G_{obl}$  określa się według wzoru (4):

$$G_{obl} = \frac{\max\{S_i^2\}}{\sum_{i=1}^{24} S_i^2} \quad (4)$$

Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów wykazało, że przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  obliczeniowa wartość kryterium Cochra  $G_{obl} = 0,1134$  okazała się mniejsza od wartości krytycznej  $G_{kr}^{0,05;5;24} = 0,1493$  (Korzyński, 2006). Wynika z tego, że wariancje prób są jednorodne. W takim przypadku wariancję generalną eksperymentu obliczono jako średnią wartość z wariancji poszczególnych prób według wzoru (5). Ustalono, że przy liczbie stopni swobody  $v = 120$  wyniosła ona 6,08. Wartość wariancji przyjęto jednakową w całym obszarze przestrzeni czynnikowej analizowanej funkcji celu.

$$S_0^2 = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^{24} S_i^2 \quad (5)$$

Ocenę istotności współczynników równania regresji przeprowadzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium t-Studenta (Korzyński, 2006). Przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . Wariancje współczynników regresji  $S_{a_i}^2$  obliczono według wzoru (6).

$$S_{a_i}^2 = c_{ii} \cdot S_0^2 \quad (6)$$

gdzie  $c_{ii}$  jest diagonalnym elementem macierzy kowariancyjnej.

Porównując obliczeniowe wartości  $t_i$  z wartością tabelaryczną  $t_{\alpha f}$  wykonano sprawdzenie hipotezy o istotności statystycznej współczynników regresji  $a_i$ . Wartość obliczeniowa kryterium  $t_i$  wyznaczano według wzoru (7). Z prawdopodobieństwem  $p = 1 - \alpha$ . Hipotezę o nieistotności współczynników  $a_i$  odrzucano, jeśli  $t_i > t_{\alpha f}$ .

$$t_i = \frac{|a_i|}{\sqrt{S_{a_i}^2}} \quad (7)$$

Na podstawie wyników eksperymentu przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów opracowano model matematyczny (8), który po usunięciu współczynników nieistotnych ( $a_{23}, a_{34}$ ) otrzymał postać:

$$Y = 46,74 + 4,96X_1 - 5,84X_2 - 2,31X_3 + 4,25X_4 + 2,27X_1X_2 + 0,98X_1X_3 + 0,88X_1X_4 - 1,38X_2X_4 + 0,61X_1^2 + 1,21X_2^2 - 6,39X_3^2 - 3,59X_4^2 \quad (8)$$

Adekwatność modelu sprawdzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium Fishera F (Korzyński, 2006). Obliczeniową wartość tego kryterium określono za pomocą wzoru (9):

$$F_{obl} = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{S_0^2 \cdot (N - (k + 1))} \quad (9)$$

gdzie:  $\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2$  jest sumą kwadratów odchyłeń wartości ( $\hat{Y}_i$ ) obliczonych z modelu (8) oraz uzyskanych jako średnie ( $\bar{Y}_i$ ) z pomiarów w eksperymencie;  $m$  jest liczbą powtórnych pomiarów w każdej próbie;  $N$  jest liczbą prób w eksperymencie;  $k+1$  jest liczbą istotnych współczynników w modelu (8).

Obliczeniową wartość  $F_{obl}$  dla uzyskanego modelu porównano z tabelaryczną wartością krytyczną  $F_{\alpha f, j, 2}$ , dla której:

$$f_1 = N - (k + 1) = 24 - 13 = 11;$$

$$f_2 = N(m - 1) = 24(6 - 1) = 120.$$

Sprawdzenie wykazało, że wartość obliczeniowa  $F_{obl} = 1,6941$  jest mniejsza od odpowiedniej wartości krytycznej kryterium Fishera  $F_{0,05;11;120} = 1,87$  (Korzyński, 2006). Potwierdza to, że model jest adekwatny i przydatny do dalszej analizy wpływu czynników.

#### 5. Interpretacja wyników badania

Na podstawie uzyskanego równania regresji (8) oceniono charakter i stopień wpływu rozpatrywanych czynników. Okazało się, że największy i jednocześnie ujemny wpływ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej wykazuje czynnik  $X_2$  – ilość domieszki napowietrzającej. Wykryto, że przy zmianie  $X_2$  od  $-1$  (bez domieszki) do  $+1$  ( $d/C=0,0030$ ) wytrzymałość  $Y$  maleje o 21,7%. Jednak spadek ten jest nierównomierny: przy zmianie  $d/C$  od 0 do 0,0015  $Y$  spada o 13,1%, natomiast przy zmianie  $d/C$  z 0,0015 do 0,0030 maleje o 8,6%. Wykryto również dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynników  $X_1X_2$  oraz ujemny efekt  $X_2X_4$ . Oznacza to, że wpływ czynnika  $X_2$  słabnie ze wzrostem czynnika  $X_1$ , natomiast wpływ  $X_2$  wzmacnia się ze wzrostem  $X_4$ .

Na drugim miejscu pod względem stopnia wpływu na wartość  $Y$  lokuje się czynnik  $X_1$  – ilość dodatku popiołu lotnego. Wykryto dodatni liniowy i niewielki dodatni kwadratowy efekt czynnika  $X_1$ . Oznacza to, że ze wzrostem  $PI/C$  wytrzymałość na ściskanie próbek  $Y$  wzrasta. Przy czym, przy wzroście  $PI/C$  od 0 do 0,165 wytrzymałość wzrasta o 10,3%, zaś przy zmianie  $PI/C$  od

0,165 do 0,33 wytrzymałość zwiększa się o 13,1%. Wykryto również trzy dodatnie efekty wspólnego oddziaływania czynników  $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$  oraz  $X_1X_4$ . Wynika z tego, że czynnik  $X_1$  wpływa tym mocniej, im większe wartości przyjmują czynniki  $X_2$  i  $X_3$ . W przypadku oddziaływania  $X_1X_4$  występuje zjawisko synergizmu wpływu czynników  $X_1$  i  $X_4$ . Oznacza to, że jednocześnie zwiększanie czynników  $X_1$  i  $X_4$  spowoduje mocniejszy wzrost, niż gdy każdy z nich działałby osobno.

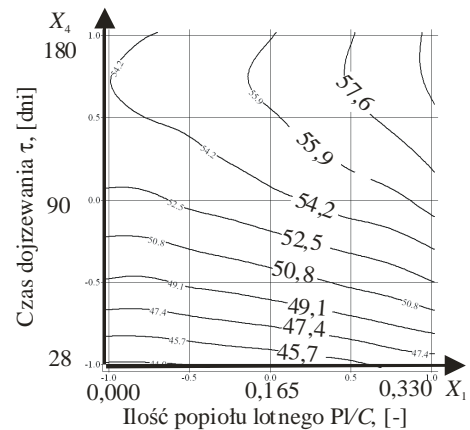
Na kolejnym miejscu znalazł się czynnik  $X_4$  – czas dojrzewania. Wykryto dodatni liniowy i ujemny kwadratowy efekt czynnika  $X_4$ . Oznacza to, że z wydłużeniem czasu dojrzewania wytrzymałość na ściskanie próbek  $Y$  wzrasta, jednak wzrost ten jest nierównomierny. Przy  $\tau = 138$  dni wytrzymałość osiąga maksymalną wartość równą 48,0 MPa. Wydłużenie czasu dojrzewania z 28 do 138 dni powoduje wzrost wytrzymałości  $Y$  o 23,4%, natomiast dalsze dojrzewanie nie powoduje już istotnego wzrostu wytrzymałości. Efekt wspólnego oddziaływania  $X_1X_4$  opisano wyżej. Efekt  $X_2X_4$  oznacza, że wpływ  $X_4$  słabnie ze wzrostem  $X_2$ .

Najmniejszy wpływ na wytrzymałość  $Y$  wykazał czynnik  $X_3$  – współczynnik wodno-cementowy. Wykryto, że wraz ze wzrostem wartości  $W/C$  wytrzymałość  $Y$  zmienia się bardzo nierównomiernie i zależność ma ekstremum przy  $W/C = 0,54$ . Przy zmianie  $W/C$  od 0,5 do 0,54  $Y$  wzrasta o 10,8% natomiast przy zmianie od 0,54 do 0,60  $Y$  spada o 20,9%. Przy  $W/C = 0,54$  uzyskano najwyższą wytrzymałość wynoszącą 46,9 MPa. Wykryto również dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynników  $X_1X_3$ , który świadczy o tym, że wpływ czynnika  $X_3$  słabnie ze wzrostem czynnika  $X_1$ .

Przestrzeń czynnikową zbadano na występowanie ekstremum. Okazało się, że wytrzymałość na ściskanie próbek osiąga maksymalną wartość 60,1 MPa przy następujących warunkach:  $X_1 = +1$ ;  $X_2 = -1$ ;  $X_3 = -0,1$ ;  $X_4 = 0,9$ , tj. przy ilości popiołu  $PI/C=0,33$ ; bez domieszki napowietrzającej; o  $W/C = 0,54$  z oraz po 169 dniach dojrzewania.

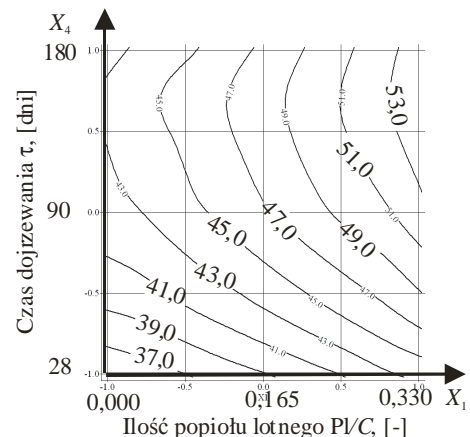
Graficzną interpretację wyników eksperymentu pokazano na rysunkach 2-4. Po wstępnej analizie wytrzymałość na ściskanie ( $Y$ ) rozpatrywano w zależności od ilości popiołu lotnego ( $X_1$ ) i czasu dojrzewania ( $X_4$ ) próbek przy zmiennej ilości domieszki napowietrzającej i stałej wartości  $W/C$ . Wartość  $W/C = 0,55$  została wybrana jako najbliższa wartości optymalnej.

Na rysunku 2, można zauważyć, że wraz ze wzrostem  $X_1$  wytrzymałość rośnie. Przy zmianie  $X_1$  od 0 do 33% wartość  $Y$  wzrasta o 8,3%. Inny charakter ma zależność wytrzymałości na ściskanie od czasu dojrzewania. Przy zmianie  $X_4$  od  $-1$  ( $\tau = 28$  dni) do 0,784 ( $\tau = 156$  dni) wartość  $Y$  wzrasta o 25,6% i osiąga 56,0 MPa. Dalszego wzrostu  $Y$  praktycznie nie wykazuje, to znaczy że po 156 dniu dojrzewania próbki zaprawy bez domieszki napowietrzającej nie wykazują już efektywnego wzrostu wytrzymałości.



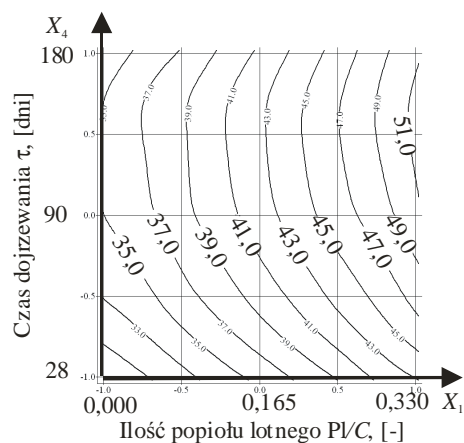
Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie  $Y$  ( $f_c$ , MPa) próbek nienapowietrzzonej zaprawy cementowej o  $W/C = 0,55$  wykonanej z cementu o klasie wytrzymałości 42,5 od ilości popiołu lotnego  $X_1$  i czasu dojrzewania  $X_4$

Na rysunku 3, widać że charakter zależności wytrzymałości na ściskanie  $Y$  próbek od  $X_1$  i  $X_4$  zmienił się nieznacznie przy zastosowaniu domieszki napowietrzającej w ilości 0,15% masy cementu. Jedynie przemieściły się ekstrema lokalne tej zależności a średnia wytrzymałość zmalała o 13,1%. Wytrzymałość próbek po 138 dniach dojrzewania ( $X_4 = 0,0,592$ ) wyniosła 48,0 MPa.



Rys. 3. Zależność wytrzymałości na ściskanie  $Y$  ( $f_c$ , MPa) próbek zaprawy cementowej o  $W/C = 0,55$  wykonanej z cementu o klasie wytrzymałości 42,5 i z domieszką napowietrzającą w ilości 0,15% masy cementu od ilości popiołu lotnego  $X_1$  i czasu dojrzewania  $X_4$

Przy zastosowaniu domieszki napowietrzającej w ilości 0,30% masy cementu zależności wytrzymałości na ściskanie od  $X_1$  i  $X_4$  ma zbliżony charakter, co przedstawiony na rysunku 4. Przy zmianie  $X_1$  od 0 do 33% masy cementu wytrzymałość na ściskanie rośnie o 44,2%. Natomiast czas efektywnego narastania wytrzymałości zmniejszył się do 121 dni. Zauważono również, że przy zwiększeniu domieszki napowietrzającej ma miejsce spadek wytrzymałości próbek o 21,7% w porównaniu z próbkami bez tej domieszki.



Rys. 4. Zależność wytrzymałości na ściskanie  $Y$  ( $f_c$ , MPa) próbek zaprawy cementowej o  $W/C = 0,55$  wykonanej z cementu o klasie wytrzymałości 42,5 i z domieszką napowietrzającą w ilości 0,3% masy cementu od ilości popiołu lotnego  $X_1$  i czasu dojrzewania  $X_4$

Podsumowując wyniki przeprowadzonego badania należy zaznaczyć, że dodawanie popiołu lotnego spowodowało podwyższenie wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej. Jednak przy wzroście ilości popiołu nie wykryto jego istotnego wpływu na czas efektywnego narastania wytrzymałości. Ponadto stwierdzono, że wraz z wprowadzeniem do zaprawy domieszki napowietrzającej wytrzymałość próbek istotnie spadła, natomiast efekt wpływu dodatku popiołu lotnego na wytrzymałość w tej sytuacji wzrósł nawet trzykrotnie. Stwierdzono także, że wprowadzenie domieszki napowietrzającej w istotny sposób skróciło czas efektywnego narastania wytrzymałości próbek.

## 6. Wnioski

Na podstawie wyników badania wytrzymałości na ściskanie próbek zaprawy cementowej od czterech czynników (ilości dodatku popiołu lotnego, ilości domieszki napowietrzającej, współczynnika wodno-cementowego oraz czasu dojrzewania) w założonych zakresach ich zmienności ustalono:

1. Największy i jednocześnie ujemny wpływ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej wykazuje czynnik  $X_2$  – ilość domieszki napowietrzającej. Przy zmianie  $d/C$  od 0 (bez domieszki) do 0,0030 wytrzymałość  $Y$  maleje o 22%.
2. Wraz ze wzrostem ilości popiołu lotnego  $PL/C$  wytrzymałość na ściskanie próbek wzrasta. Przy czym, przy wzroście  $PL/C$  od 0 do 0,33 wytrzymałość zwiększa się do 23%.
3. Z wydłużeniem czasu dojrzewania wytrzymałość na ściskanie próbek wzrasta, jednak wzrost ten jest nierównomierny. Po 138 dniach dojrzewania wytrzymałość osiągnęła maksymalną wartość równą 48,0 MPa. Wydłużenie czasu dojrzewania ponad 138 dni nie powoduje już istotnego wzrostu wytrzymałości.

4. Czynniki  $W/C$  w badanej przestrzeni czynnikowej zapewnia maksimum wytrzymałości na ściskanie przy jednakowej wartości równej 0,54.
5. Maksymalną wytrzymałość na ściskanie równą 60,1 MPa zbadanych próbek uzyskano w przypadku przy braku domieszki napowietrzającej i maksymalnej ilości popiołu lotnego (33% masy cementu) oraz  $W/C = 0,54$  po 168 dniach dojrzewania. Ogólnie można stwierdzić, że dodawanie popiołu lotnego spowodowało podwyższenie wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej. Wzrost ilości popiołu nie spowodował istotnego wpływu na czas efektywnego narastania wytrzymałości. Po wprowadzeniu do zaprawy domieszki napowietrzającej wytrzymałość próbek istotnie spadła, jednak efekt wpływu dodatku popiołu lotnego na wytrzymałość wzrósł trzykrotnie. Wprowadzenie domieszki napowietrzającej w istotny sposób skróciło czas efektywnego narastania wytrzymałości próbek.

## Literatura

- Bastian S. (1980). *Betony Konstrukcyjne Z Popiołem Lotnym*. Arkady, Warszawa.
- Fagerlunf G. (1997). *Trwałość Konstrukcji Betonowych*. Arkady, Warszawa.
- Giergiczny Z. (2006). *Rola Popiołów Lotnych Wapniowych i Krzemionkowych W Kształtowaniu Właściwości Współczesnych Spoiw Budowlanych i Tworzyw Cementowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków.
- Glinicki M. A. (2004). Właściwe i patologiczne napowietrzanie betonu. *Budownictwo-Technologie-Architektura*, 2/2004, 37-40.
- Glinicki M. A. (2005). Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF. *Drogownictwo* 3/2005, 86-88.
- Gołaszewski J., Szwabowski J. (2004). Korygowanie wpływu domieszek napowietrzających na urabialność i wytrzymałość na ściskanie betonów wysokowartościowych. W: *Dni Betonu'2004*.
- Korzyński M. (2006). *Metodyka Eksperymentu. Planowanie, Realizacja i Statystyczne Opracowanie Wyników Eksperymentów Technologicznych*. WNT, Warszawa.
- Lelusz M., Ezerskiy V. (2010a). Kinetyka narastania wytrzymałości napowietrzonych zapraw cementowych z dodatkiem popiołu lotnego. W: *Dni Betonu'2010*, 243-251.
- Lelusz M., Ezerskiy V. (2010b). Ocena wpływu zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość zapraw cementowych. *Przegląd budowlany*, 11/2010, 35-38.
- Łaźniewska B. (2006) *Modelowanie mrozoodporności betonów samozagęszczalnych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice.
- Łukowski P. (2003). *Domieszki Do Zapraw i Betonów*. Wyd. Polski Cement, Kraków.
- Neville A. M. (2000). *Właściwości Betonu*. Wyd. Polski Cement, Kraków.
- Rusin Z. (2002). *Technologia Betonów Mrozoodpornych*. Wyd. Polski Cement, Kraków

**THE COMMON IMPACT OF FLY ASH ADDITION  
AND AIR-ENTRAING ADMIXTURE ON KINETICS  
OF HYDRATION PROCESS IN CEMENT COMPOSITES**

**Abstract:** The results of laboratory investigation concerning the influence of: the amount of fly ash and air-entraining admixture, the  $W/C$  ratio, and the time of curing is presented in the paper. The range of changeability factors was determined:  $X_1$  factor (the amount of fly ash) – from 0 to 33%;  $X_2$  factor (the amount of air-entraining admixture) – from 0 to 0,3%;  $X_3$  factor ( $W/C$  ratio) from 0.5 to 0.6;  $X_4$  factor (the time of curing) – from 28 to 180 days. On the basis of the results a mathematical model was elaborated  $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ , and the character and the grade

of influence of each factor were analysed. The factor space was examined for occurrence of extrema. The optimum factor values assuring maximum compressive strength were given. They are for the following factor values:  $X_1 = +1$ ;  $X_2 = -1$ ;  $X_3 = -0.1$ ;  $X_4 = 0.9$ , i.e.: with the amount of fly ash  $P/C = 0.33$ ; without the air-entraining admixture; with  $W/C = 0.54$  and after 169 days of curing.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiŚ/1/2010 finansowanej ze środków MNiSW w latach 2010-2011