

WPLYW DOMIESZEK REDUKUJĄCYCH ILOŚĆ WODY ZAROBOWEJ NA WŁAŚCIWOŚCI BETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO

Małgorzata Woleń, Łukasz Turostowski,
Agnieszka Grzybowska¹, Łukasz Mrozik

1. WPROWADZENIE

Betony wysokowartościowe dają dużo większe możliwości w porównaniu z betonami zwykłymi. Ich produkcja wiąże się jednak ze stosowaniem wysokich klas cementów, kruszyw o odpowiedniej jakości i ilości, dodatków, domieszek chemicznych, a także specjalnych metod zagęszczania. Ważne jest także osiągnięcie niskiego stosunku wodno-spoiwowego, dzięki czemu beton jest mniej porowaty, maleje jego nasiąkliwość, wzrasta mrozoodporność i przede wszystkim wytrzymałość na ściskanie (będąca jedną ze składowych charakterystyki betonu wysokowartościowego). Niska wartość współczynnika w/s wiąże się z problemami urabialności mieszanki betonowej, stąd wynika konieczność stosowania plastyfikatorów czy superplastyfikatorów.

2. ANALIZA WYBRANYCH ZAGADNIĘŃ Z TECHNOLOGII BETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO

Technologia betonu na przestrzeni ostatnich lat rozwija się bardzo dynamicznie. Zauważyć można zależność między wielkością produkcji a wzrostem demograficznym. Analizując krzywą rozwoju betonu, sądzić można, że mechanizm wzrostu wytrzymałości mechanicznej betonu uległ już wyczerpaniu. Trend ten prawdopodobnie zostanie utrzymany, jeśli uda się uzyskać poprawę trwałości oraz powstaną nowe odmiany betonu o właściwościach odpowiednio dobranych do danego zastosowania [Nocuń-Wczelik 2005].

Zwiększenie wytrzymałości i trwałości betonu wysokowartościowego osiąga się dzięki obniżeniu jego porowatości, czyli uszczelnieniu struktury matrycy betonowej, powodując także podwyższoną odporność na agresję chemiczną. Wymaga to zredukowania stosunku wodno-spoiwowego oraz stosowania dodatków mineralnych uszczelniających strukturę zaczynu i domieszek upłynniających zapewniających odpowiednią urabialność [<http://www.inzynierbudownictwa.pl/drukuj,7262>].

Domieszki chemiczne są substancjami modyfikującymi, dodawanymi podczas wykonywania mieszanki betonowej w ilości nieprzekraczającej 5% masy cementu [PN-EN 934-1:2009]. Powodują zmianę cech technologicznych mieszanki betonowej lub zaprawy przed jej zawiązaniem lub modyfikują cechy użytkowe stwardniałego betonu. Najobszerniejszą grupą są domieszki upłynniające (superplastyfikatory) i uplastyczniające (plastyfikatory), które poprawiają urabialność zaprawy i mieszanki betonowej przy stałym wskaźniku wodno-spoiwowym lub umożliwiają wykonanie ich

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-769 Bydgoszcz, e-mail: agngru001@utp.edu.pl

z mniejszą ilością wody, ale przy zachowaniu stałej konsystencji. Przyjmuje się, że plastyfikatory zmniejszają ilość wody od 8-18%, natomiast superplastyfikatory aż do 30% [Łukowski 1998].

Domieszki uplastyczniające są substancjami organicznymi, powierzchniowo czynnymi, hydrofobowymi, które częściowo zobojętniają ładunki elektryczne na powierzchni ziaren cementu, przez co ułatwiają ich wzajemne przemieszczanie i zwiększają płynność zaczynu cementowego. Zdyspergowany zaczyn jest bardziej jednorodny i wykazuje lepszą urabialność. Plastyfikatory dodawane są do wody zarobowej w ilości od 0,2 do 0,5% masy cementu. Nadmiar domieszki spowodować może znaczne opóźnienie wiązania [Łukowski 1998].

Domieszki upłynniające zwiększają ciekłość mieszanek betonowych bardziej intensywnie niż plastyfikatory. Dzięki superplastyfikatorom możliwe jest wytwarzanie betonów o bardzo niskim wskaźniku wodno-spoiwowym, pozwalającym na odpowiednią urabialność. Superplastyfikatory umożliwiają wytwarzanie betonu z ilością wody niezbędną tylko do hydratacji cementu. W porównaniu z plastyfikatorami są domieszkami z reguły droższymi, ale można stosować je w ilości nawet dziesięciokrotnie większej. Działanie superplastyfikatorów prowadzi do pełniejszej hydratacji przez dezagregację ziaren spoiwa. Zmniejszona zostaje lepkość mieszanki betonowej, co powoduje jej upłynnienie. Domieszka upłynniająca zastosowana w celu zmniejszenia ilości wody zarobowej powoduje wzrost wytrzymałości betonu już w pierwszych godzinach od wykonania. Superplastyfikatory powodują także m.in. zmniejszenie porowatości i zwiększenie szczelności betonu, co prowadzi do poprawienia odporności na działanie substancji agresywnych, lepszej mrozoodporności i odporności na środki odladzające [Łukowski 1998].

3. CEL, PLAN I METODYKA BADAŃ LABORATORYJNYCH

Zastosowano cement portlandzki klasy CEM I 42,5 R – według badań przedstawionych w tabeli 1. Uzyskane wyniki badań porównywać można częściowo z danymi producenta, bowiem autorzy dotychczas nie spotkali się w dostępnej literaturze przedmiotu ze zbliżonym zakresem badań dla zastosowanych domieszek (istotny jest producent domieszki, ponieważ wówczas różnią się one składem chemicznym). Cement ten stanowi podstawę, której skład jest modyfikowany przez domieszki i dodatki aplikowane w założonych ilościach. Wyniki mogą być powtarzalne ze względu na ich mniejszy rozrzut w porównaniu z uzyskanymi z użyciem cementów wieloskładnikowych, bowiem nie wykonano dodatkowej ingerencji w skład fazowy (brak dodatków, np. popiołu lotnego). Badano wpływ dodatku (pyłu krzemionkowego w ilości 5 i 15% masy cementu) oraz domieszek chemicznych (plastyfikatora CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5% i superplastyfikatora CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,3%, 0,8% i 3%) na właściwości fizyczne i mechaniczne zaczynów cementowych, zapraw (ponieważ osiągnięcie wysokich wyników ich wytrzymałości jest niezbędne do wykonania betonu wysokowartościowego) i betonu. Wykonane zostały badania zaczynów cementowych, zapraw oraz betonów, bowiem jak stwierdzono w pracy [Neville 2012] istnieją powiązania pomiędzy nimi – wytrzymałości zaczynów cementowych bezpośrednio przekładają się na wytrzymałość gotowego kompozytu.

Tabela 1. Zestawienie badań (opracowanie własne)

Oznaczenie	Rodzaj próbek	Liczba próbek wg rodzaju	Stosunek wodno- -spoiwowy
		szt.	-
Klasa wytrzymałościowa	bez domieszek i dodatków	3	0,5
	superplastyfikator w ilości 0,8%	3	0,5
	pył krzemionkowy 5%, 15%	6	0,5
Wodoządnosc normowa, czas wiązania	bez domieszek i dodatków	2	szukane
	superplastyfikator w ilości 0,8%	2	szukane
	pył krzemionkowy 5%, 15%	4	szukane
Gęstość pozorna zaczynu	bez domieszek i dodatków	18	9 różnych
	superplastyfikator w ilości 0,8% i 3%	36	9 różnych
Gęstość pozorna zaczynu stwardniałego	bez domieszek	27	9 różnych
	superplastyfikator w ilości 0,8% i 3%	54	9 różnych
Badanie właściwości mechanicznych zaprawy	bez domieszek i dodatków	27	9 różnych
	superplastyfikator w ilości 0,8%	27	9 różnych
	pył krzemionkowy 5%, 15%	54	9 różnych
Badanie właściwości mechanicznych betonu	bez domieszek i dodatków	54	9 różnych
	superplastyfikator w ilości 0,8%	54	9 różnych
	pył krzemionkowy 5%, 15%	108	9 różnych

3.1. Klasa wytrzymałościowa spoiwa

Celem badania jest sprawdzenie klasy wytrzymałości zaprawy bez domieszek i porównanie jej z wytrzymałością zadeklarowaną przez producenta oraz zestawienie z wytrzymałościami zapraw z dodatkami i domieszkami.

Wykonano zaprawy bez dodatków, z domieszkami: CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8% i CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5% oraz z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5 i 15%. Z każdej mieszanki wykonano po sześć beleczek (wg normy [PN-EN 196-1:2006]) i uzyskano sześć wyników po 7 dniach i sześć po 28 dniach. Wykonano łącznie trzydzieści próbek, otrzymując sześćdziesiąt wyników.

3.2. Wodoządnosc normowa i czas wiązania

Celem wykonania badań jest sprawdzenie wpływu badanego dodatku i domieszek chemicznych na zwiększenie lub obniżenie czasu wiązania oraz wodoządnosci.

Do oznaczenia czasu wiązania cementu przygotowano po dwie próbki (wg normy [PN-EN 196-3+A1:2011]) zaczynu bez dodatków, z domieszkami: CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8% i CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5% oraz z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5 i 15%. W celu oznaczenia wodoządnosci normowej przygotowano powyższe zaprawy oraz dodatkowo zaprawę z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 3%.

3.3. Gęstość pozorna świeżego zaczynu

Celem badania jest sprawdzenie zawartości powietrza w zaczynie. Badanie gęstości pozornej przeprowadzono na następujących zaczynach: bez dodatków, z superplastyfikatorem CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8%, 3% i 6% oraz z plastyfikatorem CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5%. Próbkę tę wykonywano z różnymi stosunkami wodno-spoiwowymi od 0,15÷0,50 i zważono po wykonaniu oraz po 28 dniach. Łącznie sporządzono 102 próbki różniące się składnikami i wskaźnikiem w/s, który dla zaczynów bez dodatków i z plastyfikatorem CHRYSO Plast 209 wynosił: 0,21; 0,24; 0,27; 0,30; 0,33; 0,36; 0,40; 0,45; 0,50, natomiast dla zapraw z superplastyfikatorem CHRYSO Fluid Premia 380 dodatkowo sporządzono 0,15 i 0,18.

3.4. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano w celu sprawdzenia i porównania wpływu zastosowanych domieszek oraz dodatku na tę właściwość zaprawy.

Przeprowadzono je na trzech beleczkach o wymiarach 40 × 40 × 160 mm (wg normy [PN-EN 196-1:2006]). Wykonano zaprawy bez domieszek, z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8% i 3% oraz z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5 i 15%. Wykonano łącznie 135 próbek, otrzymując 270 wyników. Każdy rodzaj zaprawy wykonano w dziewięciu różnych stosunkach w/s wynoszących: 0,21; 0,24; 0,27; 0,30; 0,33; 0,36; 0,40; 0,45; 0,50. Badanie wytrzymałości przeprowadzono po 28 dniach.

3.5. Wytrzymałość na ściskanie betonu

Celem badania było zestawienie i porównanie wpływu zastosowanych domieszek i dodatku na tę cechę. Przeprowadzono je na trzech kostkach sześciennych o wymiarach 100 × 100 × 100 mm (wg normy [PN-EN 206:2013]). Wykonano beton bez dodatków, z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,3%, 1% i 3% oraz z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5 i 15%. Wykonano łącznie 286 próbek. Badanie wytrzymałości przeprowadzono po 28 dniach.

4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ LABORATORYJNYCH WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI ZACZYNÓW, MIESZANEK I BETONÓW

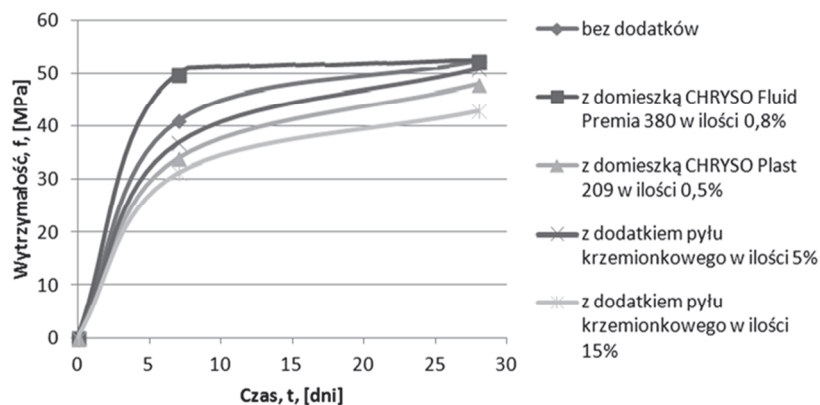
4.1. Klasa wytrzymałościowa spoiwa (f)

Na poniższym wykresie (rys. 1) porównano średnie wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach z badanymi domieszkami i dodatkami.

Wszystkie wyniki odniesiono do tych otrzymanych z beleczek bez domieszek (bez dodatków). Większą wytrzymałością charakteryzuje się tylko zaprawa z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8%; różnica wytrzymałości 7-dniowej wynosi 8,7 MPa, natomiast wytrzymałość 28-dniowa jest identyczna. Oznacza to zwiększenie tylko wytrzymałości wczesnej zaprawy.

Zaprawa z domieszką CHRYSO Plast 209 charakteryzuje się obniżeniem wytrzymałości wczesnej. Wytrzymałość 28-dniowa jest porównywalna z zaprawą bez domieszek. Wyniki te oznaczają, że domieszka CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości zalecanej powoduje możliwość szybszego rozformowania elementów betonowych, a domieszka

CHRYSO Plast 209 ten czas przedłuża. W przypadku zaprawy z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5% wytrzymałość 7-dniowa jest niższa o 4,1 MPa, a 28-dniowa o zaledwie 1,4 MPa, natomiast dodatek w ilości 15% znacznie pogarsza wytrzymałość.



Rys. 1. Porównanie wytrzymałości na ściskanie zapraw o stosunku w/s = 0,5 z danymi domieszkami i dodatkami (opracowanie własne)

Udział dodatków i domieszek nie powinien wpłynąć na zmianę 28-dniowej wytrzymałości zaprawy. Domieszka CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8% zwiększyła wytrzymałość wczesną, co pozwala na szybsze rozformowanie elementu betonowego, natomiast domieszka CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5% ten czas przedłużyła. Znaczne pogorszenie wytrzymałości zaprawy z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 15% świadczy o problemach z urabialnością.

4.2. Wodożądność normowa i czas wiązania

Wyniki badań wodożądności normowej zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wodożądności normowych badanych zaczynów (opracowanie własne)

Zaczyn	Wodożądność
Z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 3%	0,213
Z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8%	0,229
Z domieszką CHRYSO Plast w ilości 0,5%	0,274
Bez domieszek	0,294
Z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5%	0,300
Z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 15%	0,336

W badaniach uzyskano zaczyn bez domieszek o wodożądności przekraczającej wskazania producenta o 0,4%, co daje różnicę 2 g wody. Po zastosowaniu plastyfikatora i superplastyfikatora osiągnięto niższe wartości, do 8,1%, ze względu na uplastyczniające lub upłynniające działanie tych domieszek. Zaczyn z pyłem krzemionkowym wykazuje natomiast zastosowanie 21 g wody więcej przy ilości 15% dodatku.

Wyniki czasów wiązania zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie czasów wiązania badanych zaczynów (opracowanie własne)

Zaczyn	Próbka	Początek wiązania [min]	Koniec wiązania [min]
Bez domieszek	1	190	256
	2	197	272
Z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,8%	1	189	250
	2	195	262
Z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5%	1	191	243
	2	198	236
Z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 15%	1	193	236
	2	185	232
Z domieszką CHRYSO Plast w ilości 0,5%	1	239	293
	2	229	287

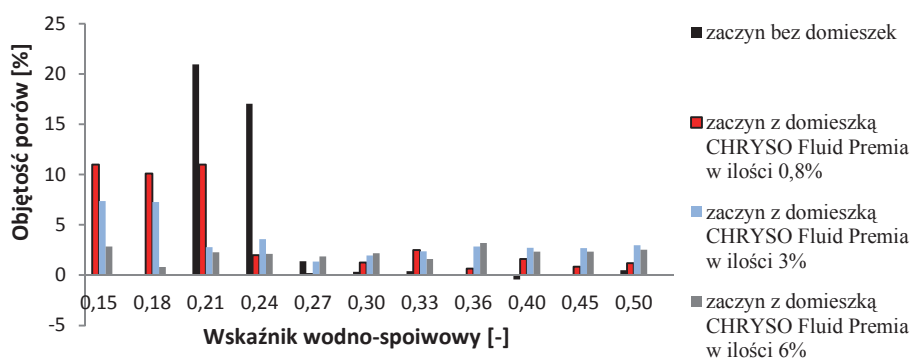
Początek i koniec czasu wiązania badanego zaczynu bez domieszek mieści się w danych producenta, jedyną różnicą jest dłuższy o 12 min koniec czasu wiązania próbki nr 2. Domieszka CHRYSO Plast 209 spowodowała wydłużenie czasu wiązania o ok. 30 min. Pozostałe domieszki i dodatki nie spowodowały zmian w badanym czasie.

Zaobserwowaną prawidłowością jest dłuższy czas wiązania zaczynu z domieszką CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5%, co wiąże się z niższą wczesną wytrzymałością na ściskanie.

4.3. Gęstość pozorną świeżego zaczynu

Porowatość betonu ma bezpośredni wpływ na cechy fizyczne i mechaniczne betonu. Im objętość porów w kompozycie jest większa, tym więcej wody może się w nim znaleźć.

Porównano otrzymane wyniki gęstości zaczynu bez domieszek oraz z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilościach: 0,8%, 3% oraz 6% i przedstawiono na rysunku 2.



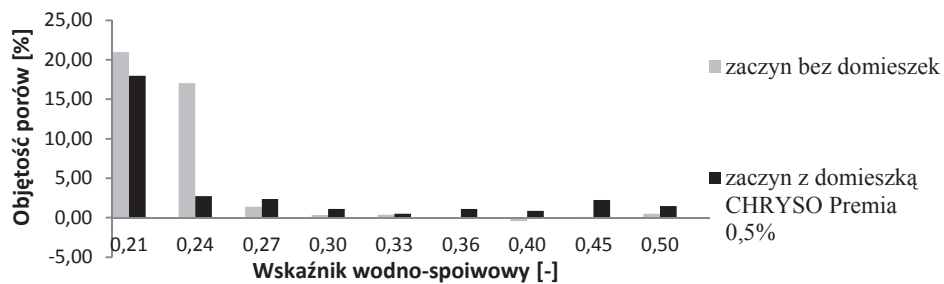
Rys. 2. Porównanie objętości porów zaczynu bez domieszek z objętościami porów zaczynów z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 (opracowanie własne)

Dla wskaźnika w/s niższego niż 0,24 objętość porów zaczynu bez domieszek jest kilkakrotnie wyższa od zaczynów z domieszką. Oznacza to, że dla niskiego stosunku wodno-spoiwowego obecność domieszki znacznie poprawia właściwości zaczynu dzie-

ki mniejszej porowatości, natomiast od $w/s = 0,27$ udział domieszki nie poprawia właściwości zaczynu.

W przypadku porównania gęstości zaczynu bez domieszek z zaczynem z domieszką CHRYSO Plast 209 występuje różnica poniżej wodożądności normowej zaczynu z domieszką.

Porównano także otrzymane wyniki gęstości zaczynu bez domieszek oraz z domieszką CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5% i przestawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Porównanie objętości porów zaczynu bez domieszek z objętościami porów zaczynów z domieszką CHRYSO Plast 209 (opracowanie własne)

Domieszka obniżyła ilość powietrza w zaczynie dla $w/s = 0,21$ oraz $w/s = 0,24$ zgodnie z informacją producenta, ponieważ plastyfikator ten dedykowany jest dla niskich współczynników wodno-spoiwowych. Dla wyższych wartości współczynnika domieszka nie spełnia swojego zadania.

Dążąc do zmniejszenia porowatości zaczynu oraz betonu, warto stosować zbadane domieszki, jednak opłacalne jest to tylko dla niskich wartości współczynnika wodno-spoiwowego od 0,15 do 0,24.

4.4. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy (f_c)

Zaprawa bez domieszek w zależności od stosunku w/s charakteryzuje się wolnym przyrostem wytrzymałości. Swoje maksimum osiąga dla $w/s = 0,45$ i wynosi 48,1 MPa. Porównano te wartości wytrzymałości z wynikami zaprawy z domieszkami i dodatkiem pyłu krzemionkowego.

Domieszka w ilości 0,8% jest wartością zalecaną wg producenta, natomiast 3% wartością graniczną. Wykresy zaprawy z tym superplastyfikatorem charakteryzują się gwałtownym wzrostem. Obie zaprawy mają zbliżone wartości wytrzymałości z zaprawą bez domieszek dla stosunku wodno-cementowego $w/s = 0,45$ oraz $w/s = 0,50$. Maksymalna i jednocześnie największa wartość wytrzymałości osiągnięta dla zapraw wynosi 75,7 MPa dla zaprawy z domieszką w ilości 0,8% przy stosunku $w/s = 0,30$. Dla 3% maksymalna wytrzymałość wynosi 67,4 MPa, ale przy $w/s = 0,27$. Dzięki zastosowaniu domieszki osiągnięto niższy współczynnik wodno-cementowy nawet o 18%, zyskując tym na wytrzymałości, która w porównaniu z zaprawą bez domieszek wzrosła o ok. 57%.

W przypadku zaprawy z dodatkiem pyłu krzemionkowego wykres wytrzymałości wzrasta jeszcze wolniej, maksymalne wartości osiągane są dla stosunku $w/s = 0,50$ i są mniejsze niż w przypadku zaprawy bez domieszek o prawie 9% dla ilości mikrokrzemionki 5% oraz ponad 63% dla 15% dodatku. Tak niskie wartości mogły spowodować

problemy z urabialnością takich zapraw, dlatego w badaniu betonu z dodatkiem pyłu krzemionkowego zdecydowano się zastosować także superplastyfikator w ilości pozwalającej ich uniknąć, jednak nie przekraczając maksymalnej ilości, czyli 3%.

Udział domieszki przyczynił się do znacznego zwiększenia wytrzymałości zapraw już dla niskich wskaźników wodno-spoiwowych. Niskie wartości wytrzymałości zapraw z dodatkiem pyłu krzemionkowego świadczą o jego niepożądanym działaniu, jakim jest problem z urabialnością.

4.5. Wytrzymałość na ściskanie betonu (f_c)

W poniższej tabeli (tab. 4) przedstawiono najwyższe wytrzymałości dla odpowiednich stosunków wodno-spoiwowych. Zauważyć można, że wytrzymałości te otrzymano dla niskich wartości w/s. Beton z kruszywem otoczkowym charakteryzował się maksymalną wytrzymałością równą 83,0 MPa dla w/s = 0,30 i domieszką w ilości 3%, natomiast z kruszywem łamanym największa wytrzymałość wyniosła 106,8 MPa dla w/s = 0,24 i domieszką w ilości 1%, czyli blisko wielkości zalecanej. Wartość tej wytrzymałości jednocześnie jest największą uzyskaną ze wszystkich próbek różnych składów betonu. W obu przypadkach wytrzymałości przekroczyły wartość betonu bez domieszek o ok. 21%.

Tabela 4. Zestawienie najwyższych wartości wytrzymałości razem z wartościami stosunku w/s dla betonu z domieszką CHRYSO Fluid Premia (opracowanie własne)

Ilość domieszki CHRYSO Fluid Premia 380	Beton z kruszywem otoczkowym		Beton z kruszywem łamanym	
	w/s	wytrzymałość	w/s	wytrzymałość
0,3%	0,24-0,36	< 75 MPa	0,30-0,33	< 93 MPa
1%	0,24-0,36	< 80 MPa	0,21-0,24	< 106 MPa
3%	0,21-0,36	< 80 MPa	0,24-0,27	< 103 MPa

W tabeli poniżej przedstawiono najwyższe wytrzymałości dla odpowiednich stosunków wodno-spoiwowych. Otrzymano podobne wyniki dla różnej ilości mikrokrzemionki, jednak wyższe dla ilości 5%. Najwyższa wytrzymałość betonu z kruszywem otoczkowym wyniosła 85,2 MPa dla w/s = 0,33, co w porównaniu z betonem bez domieszek podniosło jego wytrzymałość o 24,5%, natomiast betonu z kruszywem łamanym 95,4 MPa dla w/s = 0,27, co zwiększyło wytrzymałość betonu bez domieszek zaledwie o 8%.

Tabela 5. Zestawienie najwyższych wartości wytrzymałości razem z wartościami stosunku w/s dla betonu z dodatkiem pyłu krzemionkowego (opracowanie własne)

Ilość pyłu krzemionkowego	Beton z kruszywem otoczkowym		Beton z kruszywem łamanym	
	w/s	wytrzymałość	w/s	wytrzymałość
5%	0,27-0,36	< 85 MPa	0,27	95,4 MPa
15%	0,30-0,33	< 83 MPa	0,30-0,33	< 92 MPa

Osiągnięte najwyższe wyniki wytrzymałości, tj. 106,8 MPa betonu z domieszką CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 1% o stosunku wodno-spoiwowym w/s = 0,24

oraz 95,4 MPa betonu z dodatkiem pyłu krzemionkowego w ilości 5% o stosunku wodno-spoiwowym $w/s = 0,27$, w obu przypadkach z kruszywem łamanym, pozwalają stwierdzić, że zastosowany skład mieszanki betonowej spełnia swoją rolę, jaką jest zwiększenie najważniejszej właściwości betonu. Dzięki zastosowaniu pyłu krzemionkowego oraz superplastyfikatora uszczelniono strukturę betonu i poprawiono urabialność mieszanki betonowej, spowodowano obniżenie wartości współczynnika w/s z wartości 0,36 na odpowiednio 0,27 i 0,24.

Tak jak w przypadku zapraw domieszka zwiększyła wytrzymałości betonu, jednak ze względu na otrzymane wyniki nie zaleca się stosowania większej ilości superplastyfikatora niż ilość zalecana przez producenta. Nie spowoduje to zwiększenia wytrzymałości, tylko wygeneruje dodatkowe koszty. Osiągnięto wzorcowy skład mieszanki betonowej w przypadku udziału domieszki w ilości 1% i kruszywa łamanego, o czym świadczą otrzymane wyniki. Prowadzić to może do osiągnięcia jeszcze niższego współczynnika wodno-spoiwowego. Wyniki obrazują także pozytywny wpływ pyłu krzemionkowego razem z domieszką upłynniającą na wytrzymałość betonu. Niższe wartości wytrzymałości betonu wskazują nieefektywną metodę zagęszczania dla betonów o niskim stosunku w/s – stolik wibracyjny.

5. PODSUMOWANIE

Produkcja betonów wysokowartościowych wymaga zastosowania dodatków oraz domieszek chemicznych [Nocuń-Wczelik 2005]. Opisane powyżej badania wykonano z udziałem pyłu krzemionkowego w ilości 5 i 15%, plastyfikatora CHRYSO Plast 209 w ilości 0,5 oraz superplastyfikatora CHRYSO Fluid Premia 380 w ilości 0,3, 0,8 oraz 3%.

Domieszkę CHRYSO Plast 209 wykorzystano do badania klasy wytrzymałościowej, czasu wiązania oraz gęstości pozornej. Nie przeprowadzono pozostałych badań ze względu na nieefektywność plastyfikatora. Jedyne znaczące różnice w wynikach badań między mieszanką betonową z oraz bez domieszki otrzymano w czasie wiązania – plastyfikator ten opóźnia czas wiązania.

Najwyższe wytrzymałości osiągnęto przy zastosowaniu domieszki CHRYSO Fluid Premia 380, która obniżyła współczynnik wodno-cementowy. Superplastyfikator, nawet przy dozowaniu w ilości 0,3% masy cementu, spowodował wzrost wytrzymałości zapraw i betonu. Zauważono jednak, że maksymalne wartości osiągnięto przy dozowaniu w ilości zalecanej przez producenta, tj. 0,8% masy cementu. Maksymalny wzrost wytrzymałości w porównaniu z betonem bez domieszek wyniósł ok. 21%. Najwyższą osiągniętą wartością jest wytrzymałość równa 106,8 MPa dla stosunku wodno-cementowego wynoszącego zaledwie 0,24.

Technologia betonów wysokowartościowych rozwija się dynamicznie, dzięki czemu osiągane są coraz wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie elementów betonowych, a także polepszane są inne istotne właściwości w zależności od danego zastosowania. Należy pamiętać, że dodatki czy domieszki chemiczne zastosowane w ilościach przekraczających zalecenia producenta nie polepszają właściwości mieszanki betonowej czy betonu, w skrajnych przypadkach mogą je nawet pogorszyć w porównaniu z właściwościami betonu bez domieszek, generując tylko dodatkowe koszty.

LITERATURA

Aïtcin P.C., 2014. The problems with high strength and low w/c ratio concretes. *Cem. Wapno Beton* 2, 127-137.

Bentz D.P., Contway J.T., 2001. Computer modeling of the replacement of "coarse" cement particles by inert fillers in low w/c ratio concretes. *Cem. Concr. Res.* 31, 503-506.

Bhanja S., Sengupta B., 2003. Modified water-cement ratio law for silica fume concretes. *Cem. Concr. Res.* 33(03), 447-450.

Chen H., Wyrzykowski M., Scrivener K., Lura P., 2013. Prediction of self-desiccation in low water- to-cement ratio pastes based on pore structure evolution. *Cem. Concr. Res.* 49, 38-47.

Czarnecki L., Justnes H., 2012. Zrównoważony, trwały beton. *Cem. Wapno Beton* 6, 341-362.

Łukowski P., 1998. Domieszki chemiczne do zapraw i betonów. Wyd. Polski Cement Kraków.

Neville A.M., 2012. Właściwości betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków.

Nocuń-Wczelik W., 2005. Pył krzemionkowy – właściwości i zastosowanie w betonie. Wyd. Polski Cement Kraków.

PN-EN 196-1:2006. Metody badania cementu. Część 1: Oznaczenie wytrzymałości.

PN-EN 196-3+A1:2011. Metody badania cementu. Część 3: Oznaczenie czasów wiązania i stałości objętości.

PN-EN 206:2013. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

PN-EN 934-1:2009. Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 1: Wymagania podstawowe.

PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań.

Zhou J., Ge L., 2015. Effect of strain rate and water to cement ratio on compressive mechanical behavior of cement mortar. *J. Cent. South Univ.* 22, 1087-1095.

Zivica V., 2009. Effects of the very low water/cement ratio. *Constr. Build. Mater.* 29, 573-580.

<http://www.inzynierbudownictwa.pl/drukuj,7262> (dostęp: 31.08.2016).