

*Tomasz Ponikiewski
Dawid Gieroń
Krzysztof Wrzecion
Jakub Augustyn*

Projektowanie betonów w technologii druku 3D, modyfikowanych wybranymi domieszkami chemicznymi

DESIGNING CONCRETE IN 3D PRINTING TECHNOLOGY, MODIFIED WITH
SELECTED CHEMICAL ADMIXTURES

Streszczenie

W artykule wyróżniono trzy cechy reologiczne mieszanek betonowych stosowanych w technologii druku 3D: łatwość pompowania, łatwość wbudowania oraz czas urabialności. W badaniach oceny powyższych parametrów dokonano za pomocą powszechnie dostępnej aparatury. Łatwość pompowania badano obserwując czy mieszanka umieszczona w zasobniku i poddana działaniu ciśnienia jest w stanie wydostawać się z niego poprzez dyszę o średnicy 16 mm bez przerw i blokowania. Łatwość wbudowania oceniano na podstawie pomiaru obciążenia powodującego odkształcenie świeżej mieszanki betonowej. Otrzymane wyniki pozwalają wstępnie ocenić przydatność mieszanki do procesu drukowania. Badania obejmują dobór optymalnego pod względem powyższych cech składu mieszanki betonowej, modyfikacje tych cech za pomocą stosowanych dotąd w budownictwie domieszek chemicznych oraz badania wytrzymałościowe stwardniałego betonu.

Abstract

The article distinguishes three rheological characteristics of concrete mixtures used in 3D printing technology: extrudability, buildability and open time. Evaluation of the above parameters was carried out using commonly available equipment. Extrudability was studied by observing whether the mixture placed in the container and subjected to pressure is able to escape from it through a nozzle with a diameter of 16 mm without

*dr hab. inż., prof. Pol. Śl. Tomasz Ponikiewski – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
mgr inż. Dawid Gieroń – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
mgr inż. Krzysztof Wrzecion – Mapei Polska
mgr inż. Jakub Augustyn – Mapei Polska*

interruption and blocking. Buildability was evaluated by measuring the load causing the deformation of the fresh concrete mix. The obtained results allow to pre-evaluate the suitability of the mixture for the printing process. Tests include the selection of the optimal concrete mix composition in terms of the above features, modifications of these features with the use of chemical admixtures used in construction until now, as well as strength tests of hardened concrete

1. Wprowadzenie

Rozwój technologii druku 3D betonu stawia pytania o techniczne możliwości kształtowania mieszanek, na które odpowiedzią mogą być badania laboratoryjne na poziomie ogólnym, niezwiązane z produkcją określonych elementów betonowych. Technologia druku 3D betonu polega na układaniu za pomocą dyszy drukarki kolejnych warstw mieszanki betonowej jedna na drugiej [1], [12], [13], [17].

Tego typu mieszanki powinny się charakteryzować tak zwaną łatwością pompowania. Ich konsystencja musi pozwalać na transport i wyciskanie z dyszy drukarki w sposób ciągły, jako jednorodny filament. Z tego powodu mieszanki przeznaczone do druku 3D są podobne do pompowalnych i natryskowych – również tutaj najistotniejsza jest obecność w mieszance bardzo drobnych ziaren, które poprawiają pompowalność i nie zawsze można osiągnąć ten sam efekt poprzez zwiększanie płynności superplastyfikatorem [2], [5], [6], [16], [20]. Dodatkowo, w obu tych technologiach, wymiary kruszywa są ograniczone przez wymiary aparatury.

Drugą ważną dla przeznaczonych do druku mieszanek cechą jest łatwość wbudowania. Mieszanka dość płynna, aby poruszać się w przewodach drukarki, nie może znacząco zmienić swojego kształtu po jej opuszczeniu i pod naciskiem kolejno układanych na niej warstw [2], [3], [16], [20]. Ocena łatwości wbudowania może się różnić dla różnych procesów drukowania – czym dłuższy będzie czas do ułożenia kolejnej warstwy i czym więcej filamentów ułożonych będzie obok siebie, tym mniejsze prawdopodobieństwo odkształcenia ułożonej mieszanki. Należy przy tym jednak pamiętać, że zbyt długi czas do ułożenia kolejnej warstwy może skutkować osłabieniem połączenia, które musi wytworzyć się między warstwami.

Utrata urabialności w przypadku technologii druku 3D betonu następuje w wyniku zmniejszania się płynności mieszanki i następującego w efekcie blokowania się mieszanki w drukarce. Jest to równoznaczne z utratą łatwości pompowania.

Autorzy badań wskazują zazwyczaj, że próbki drukowane posiadają mniejszą wytrzymałość mechaniczną, niż te pochodzące ze zwykłych form. Wpływ na to ma struktura powstała w wyniku łączenia się ze sobą układanych kolejno filamentów. Temat szerzej jest opisany w opracowaniach [7], [18], [19] i [21]. Podejmuje się także próby zbrojenia drukowanych elementów [14], [15].

Choć technologia druku 3D betonu jest ciągle rozwijana, to nie została ona jak dotąd zastosowana na skalę przemysłową [11]. Jedną z najnowszych prób jej użycia jest wykonanie w marcu 2017 roku eksperymentalnego domu w okolicach Moskwy (fot. 2). Powstał on w ciągu 24 godzin w temperaturze -35 stopni Celsjusza, pod osłoną ogrzewanego namiotu (Fot. 1) [8].



Fot. 1. Proces drukowania betonu [9].



Fot. 2. Wydrukowany w 24 godziny dom [8]

2. Zakres i metodyka badań

Celem badań było sprawdzenie możliwości kształtowania mieszanek betonowych przeznaczonych do stosowania w technologii druku 3D. Ich projektowanie wymaga starannego doboru składników, ze szczególnym uwzględnieniem odpowiedniej ilości drobnych cząstek, które znajdują się głównie w cemencie i dodatkach mineralnych. Dlatego postanowiono sprawdzić jak będą się zmieniały właściwości mieszanki betonowej w zależności od zmiany ilości zaczynu i pyłu krzemionkowego. Badane składy zawierają dużą ilość cementu, a technologia charakteryzuje się brakiem deskowania. Sprzyja to powstawaniu naprężeń skurczowych i dlatego zdecydowano się dodatkowo zabezpieczać beton przed zarysowaniem za pomocą włókien. Składy betonów, etapy badań i stosowane na wykresach oznaczenia opisano w tabelach 1, 2 i 3.

Tabela 1. Modyfikowane w toku badań składy betonów

Symbol składu betonu	Ilość na 1m ³ [kg]			
	B1	B2	B3	B4
Cement CEM I 42,5 R	919 52,73 278,09	866 2,18 1026,37	901	903
Pył krzemionkowy	49	96	100	101
Superplastyfikator SP	8,712	8,18	7,01	7,02
Woda	226	225	237	238
Piasek 0-2 mm	1178	1171	1105	1108
Włókna polipropylenowe 12 mm	2,35	2,34	2,77	0,60
dawka SP [% masy spoiwa]	0,90	0,85	0,70	0,70
masa cem. / masa pyłu krzem. [%]	95/5	90/10	90/10	90/10
masa kruszywa / masa spoiwa [%]	55/45	55/45	52,5/47,5	52,5/47,5
w/s	0,24	0,24	0,24	0,24

Tabela 2. Wykonane etapy badań

Nr	Zmienna	Skład	Wykonane badania
I	stosunek masy cementu do masy pyłu krzemionkowego	B1	<ul style="list-style-type: none"> • pomiar średniego rozplywu mieszanki po 8 minutach • łatwość pompowania po 10 min • łatwość wbudowania po 15 min
II	stosunek masy kruszywa do masy spoiwa	B2	
III	ilość włókien polipropylenowych NS12 [23]	B3	

Tabela 2. Cd. Wykonane etapy badań

Nr	Zmienna	Skład	Wykonane badania
IV	ilość domieszki przyspieszającej CF-1	B4	<ul style="list-style-type: none"> • pomiar średniego rozplywu mieszanki po 8 minutach • ocena łatwości pompowania po 10, 25, 40 i 55 minutach • ocena łatwości wbudowania po 15, 30, 45 i 60 minutach • wytrzymałość na ściskanie po 6h, 24h, 7 dniach • wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 7 dniach • w etapach V i VII skurcz
V	ilość domieszki przyspieszającej ULT	B4	
VI	ilość domieszki opóźniającej MPT	B4 z 4,8% Mapefast ULT	
VII	ilość domieszki przeciwskurczowej SRA		

Tabela 3. Oznaczenia stosowane na wykresach i źródła kart technicznych

Karta techniczna	[22]	[24]	[25]	[26]	[27]
Oznaczenie	SP	CF-1 52,73 278,09	ULT 2,18 1026,37	MPT	SRA

Przebadane domieszki chemiczne zostały wybrane tak, aby modyfikowały istotne ze względu na proces drukowania właściwości mieszanki betonowej. Po każdym etapie badań wybierano do dalszej pracy recepturę betonu o najlepszych parametrach.

Wykonanie mieszanki betonowej za każdym razem odbywało się wg następującej procedury:

- dozowanie suchych składników wraz z włóknami
- wstępne mieszanie przez 30 sekund
- dodanie wody z superplastyfikatorem
- mieszanie przez 2 minuty
- 1 minuta przerwy w mieszaniu, oczyszczenie łopat mieszalnika, ewentualne dodanie domieszek chemicznych
- 5 minut mieszania.

Po 8 minutach od dodania wody do mieszanki dokonywano testów stolikiem do badania rozplywu zapraw, zgodnie z normą [4]. Wynikiem badania był średni rozplyw mieszanki betonowej.

Kolejną badaną właściwością była łatwość pompowania. Podstawą oceny były próbki wykonywane za pomocą wyciskacza do mas (fot. 3). Kryterium łatwości pompowania była możliwość wyciśnięcia w sposób ciągły, z wnętrza wyciskacza o średnicy 50 mm, 0,5 dm³ mieszanki. Musiało się to odbyć bez przerw i blokowania przez okrągłą dyszę o średnicy 16 mm. Pomiaru tego dokonywano jednokrotnie, po 10 minutach od dodania wody do mieszanki, a w późniejszych etapach badań po 10, 25, 40 i 55 minutach, tak aby ocenić zmienność tej cechy wraz z upływem czasu.

Łatwość wbudowania była oceniana na podstawie, określonego na potrzeby badań, kryterium układania jedna na drugiej czterech warstw mieszanki betonowej. Jeśli było to możliwe bez występowania znaczących odkształceń wydrukowanych warstw (za znacznie odkształcenie przyjęto 20%), przyjmowano, że mieszanka tę cechę posiada. Wykonywanie pewnych elementów może jednak wymagać obciążania świeżych wydruków znacznie większą ilością warstw w krótkim czasie. Aby sprawdzić jak z czasem zmienia

się możliwość obciążania mieszanki, na przygotowanym wcześniej stanowisku (fot. 4), dokonywano obciążania świeżych próbek drukowanego betonu o długości 50 mm. Pomiaru wykonywano jednokrotnie po 15 minutach, a w późniejszych etapach badań po 15, 30, 45 i, 60 minutach od dodania wody do mieszanki. Dokonywano ich na specjalnie przygotowanym stanowisku. Składało się ono z cylindrycznego pojemnika, pod którym umieszczano próbkę i napełniano go stopniowo obciążeniem. Pojemnik miał swobodę ruchu w zamocowanej na stałe tulei, co umożliwiało obciążanie próbek siłą skierowaną pionowo w dół. Sprawdzano jakie obciążenie będzie powodowało znaczące odkształcenia próbki. Przyjęto, że pomiar będzie dokonywany w momencie osiągnięcia odkształcenia równego 20%.



Fot. 3. Wyciskacz do mas



Fot. 4. Stanowisko do obciążania próbek

Przedmiotem badań były także właściwości stwardniałego betonu. Określano wytrzymałość betonu po 6 i 24 godzinach oraz po 7 dniach. Badano próbki sześciennie o wymiarze boku równym 100 mm. Kostki układano w prasie do badań wytrzymałości w pozycji obróconej o 90° w stosunku do kierunku ich formowania. Prędkość przyrostu przykładanego naprężenia była stała i wynosiła 0,5 MPa/s.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wykonywano po 7 dniach, na próbkach o wymiarach 160x40x40 milimetrów. Próbka ustawiana była na podporach oddalonych o 100 mm i obciążana w środku rozpiętości siłą z prędkością 50 N/s. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w zakresie prostej proporcjonalności liniowej można wyznaczyć według normy PN-EN 12390-5 [10], stosując poniższy wzór:

$$f_{cf7} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_2^2} \quad [10]$$

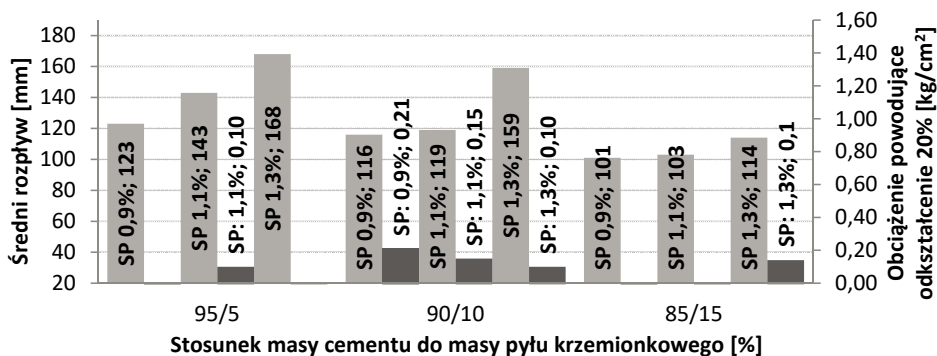
gdzie: f_{cf7} – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 7 dniach [MPa],
F – siła niszcząca [N],
L – rozpiętość belki [mm]
b – szerokość belki [mm]
h – wysokość belki [mm]

3. Wyniki badań i ich omówienie

3.1. Projektowanie mieszanki betonowej

Pierwszy etap badań polegał na badaniu reologicznych właściwości mieszanek, w których pewną masę cementu zastępowano taką samą masą pyłu krzemionkowego. Punktem

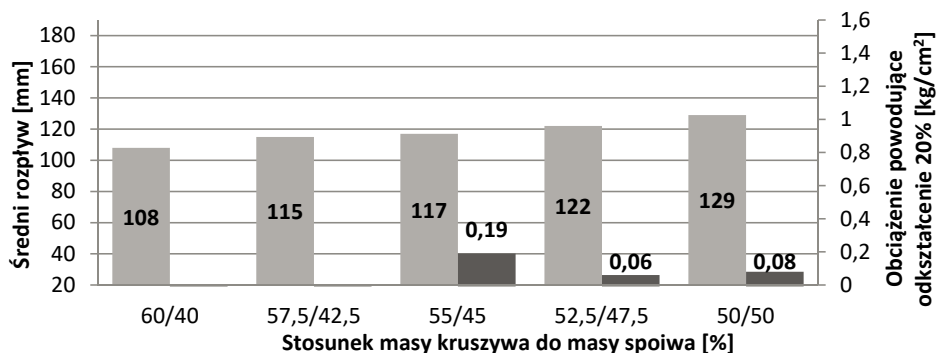
wyjścia do jego przeprowadzenia była mieszanka o składzie B1. Łączna masa spoiwa we wszystkich badanych w tym etapie mieszankach była stała. Zwiększanie ilości pyłu krzemionkowego powodowało zawsze zmniejszenie średniego rozptywu mieszanki. Efekt ten korygowano zwiększaniem ilości superplastyfikatora – jego stosowanie było jednak coraz mniej skuteczne wraz ze wzrostem ilości pyłu krzemionkowego. Mieszanki charakteryzujące się stosunkiem masy cementu do masy pyłu krzemionkowego 95/5 i zawartością superplastyfikatora poniżej 0,9% masy spoiwa, nie były możliwe do wyciskania za pomocą wyciskacza do mas. Zwiększanie ilości superplastyfikatora umożliwiało wyciskanie, uzyskane próbki miały jednak niewielką możliwość obciążania i pod własnym ciężarem znacznie się odkształcały. Zwiększenie udziału pyłu krzemionkowego, tak aby stosunek mas cementu i pyłu wynosił 90/10, sprawiło, że mieszanki z odpowiednią ilością superplastyfikatora (od 0,9% do 1,1% masy spoiwa) były możliwe do wyciskania, a próbki uzyskane z nich za pomocą wyciskacza do mas nie odkształcały się pod własnym ciężarem i bezpośrednio po wyciśnięciu posiadały możliwość obciążania. Blokowanie się mieszanki w wyciskaczu obserwowano sporadycznie. Dalsze zwiększanie ilości pyłu krzemionkowego w mieszance, do uzyskania stosunku masy cementu do masy pyłu wynoszącego 85/15, powodowało uzyskanie mieszanek z tendencją do blokowania się w wyciskaczu niezależnie od ilości superplastyfikatora. Na rysunku 1 przedstawiono najważniejsze wyniki badań tego etapu. Umieszczono na nim także informacje o procentowej zawartości superplastyfikatora w danej mieszance w odniesieniu do masy spoiwa. Do dalszych badań zdecydowano się wykorzystać mieszankę o stosunku mas cementu i pyłu krzemionkowego równym 90/10, której skład oznaczono jako B2.



Rys. 1. Wpływ zmiany stosunku masy cementu do masy pyłu krzemionkowego w masie spoiwa i ilości superplastyfikatora w mieszance o składzie B1 na jej właściwości reologiczne

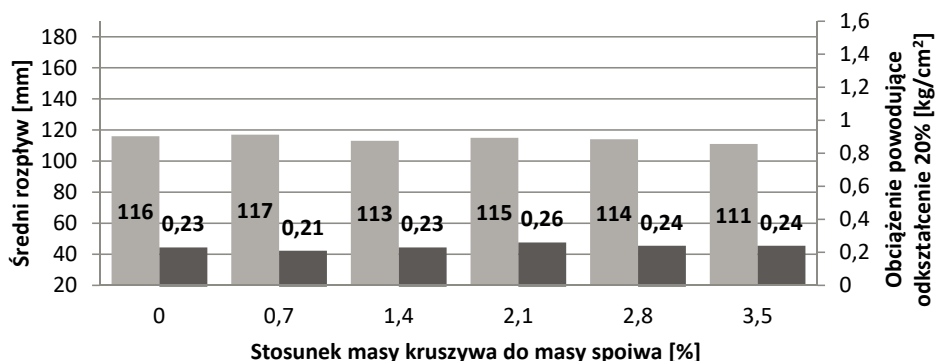
Kolejnym krokiem było przeprowadzenie prób zmiany stosunku masy kruszywa do masy spoiwa w mieszance betonowej B2, w której wynosił on 55/45. Niewielkie zwiększanie ilości kruszywa powodowało blokowanie się mieszanki w wyciskaczu i niemożność uzyskania próbek za jego pomocą. Zmniejszanie ilości kruszywa (i co za tym idzie zwiększanie ilości spoiwa w mieszance) powodowało zwiększanie średniego rozptywu i znaczne zmniejszanie możliwości obciążania wyciskanych próbek. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 2. Mieszanki o stosunku kruszywo/spoiwo równym 55/45 sporadycznie blokowały się w wyciskaczu. Dlatego do dalszych badań zdecydowano

się zastosować mieszankę, w której parametr ten wynosił 52,5/47,5 i w której obniżono zawartość superplastyfikatora do poziomu 0,7% masy spoiwa. Posiada ona oznaczenie B3.



Rys. 2. Wpływ zmiany stosunku masy kruszywa do masy spoiwa w mieszance o składzie B2 na jej właściwości reologiczne

Rysunek 3 przedstawia wyniki badań wpływu zmiany ilości włókien polipropylenowych NS12 na właściwości reologiczne mieszanki B3. Przedstawione wyniki badań wskazują na zmniejszanie się średniego rozptywu mieszanki oraz wzrost możliwości jej obciążania wraz ze wzrostem ilości włókien. Tendencja nie jest jednak wyraźnie widoczna i zachodzi przy dodatku włókien większym niż 2,1 kg/m³, co znacznie przekracza zalecaną przez producenta dawkę wynoszącą 0,6 kg/m³. Zdecydowano się nie uzależniać ilości włókien od parametrów reologicznych i stosować zalecaną ilość.



Rys. 3. Wpływ zmiany ilości i długości włókien polipropylenowych w mieszance o składzie B3 na jej właściwości reologiczne

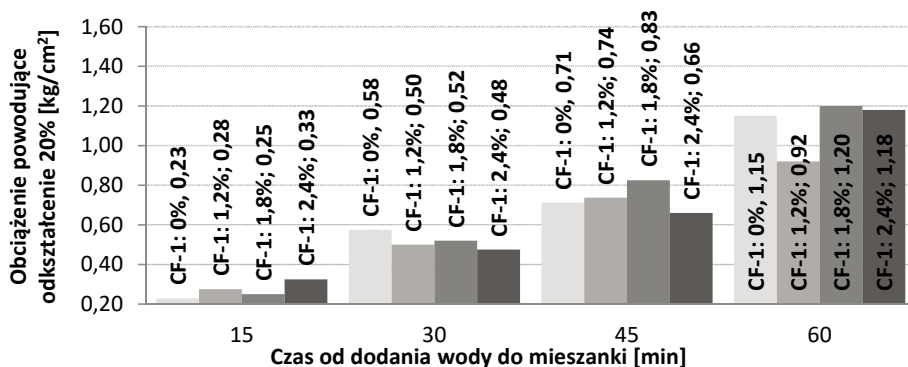
3.2. Stosowanie domieszek przyspieszających

Badano mieszanki z dwoma domieszkami przyspieszającymi: CF-1 i ULT. Ich stosowanie wiąże się z upłynnianiem mieszanki. Szukając odpowiedzi na to, jakie są realne możliwości modyfikacji mieszanek przeznaczonych do druku 3D, zdecydowano się na korekty ilości dozowanej wody, tak aby, o ile to możliwe, konsystencja pozostawała niezmienna. Korekt

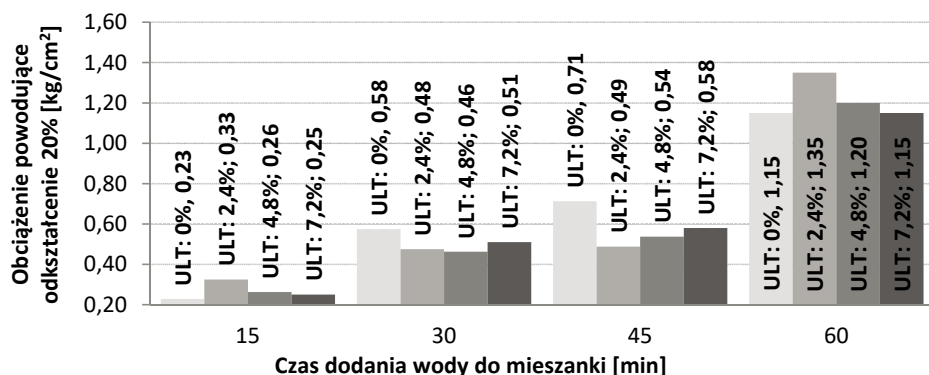
dokonywano tak, aby średni rozptył badanych mieszanek zawierał się w przedziale od 115 do 120 mm.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki badań możliwości obciążania mieszanek modyfikowanych domieszkami przyspieszającymi w pierwszych 60 minutach od momentu dodania wody do suchych składników. Umieszczono na nich także informacje o procentowej zawartości domieszki w danej mieszance, w odniesieniu do masy spoiwa. Ich zawartość zobrazowano także nadając słupkom na wykresach tym ciemniejszą barwę im więcej domieszki zawierała dana mieszanka.

Wraz z upływem czasu zawsze obserwowano znaczny wzrost możliwości obciążania mieszanek. Poszczególne wyniki różniły się od siebie, nie zaobserwowano jednak wyraźnej tendencji do wzrostu badanej cechy wskutek zastosowania domieszki. Wszystkie omawiane w tym podrozdziale mieszanki traciły łatwość pompowania pomiędzy 40 a 55 minutą od dodania wody do mieszanki.



Rys. 4. Wpływ domieszki przyspieszającej CF-1 na możliwość obciążania mieszanki o składzie B4; Procent domieszki w odniesieniu do masy spoiwa

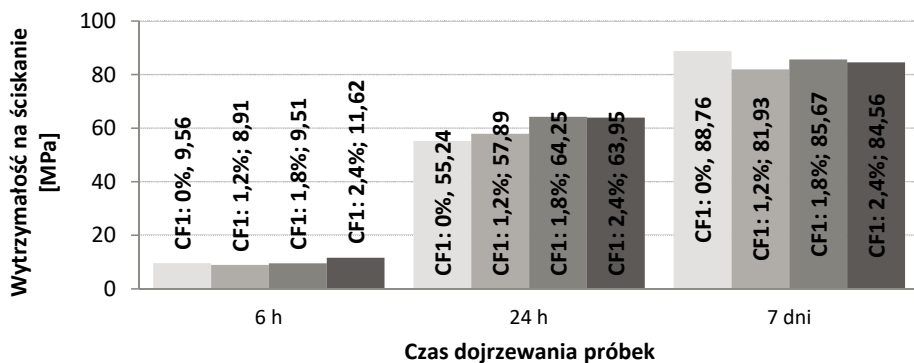


Rys. 5. Wpływ domieszki przyspieszającej ULT na możliwość obciążania mieszanki o składzie B4

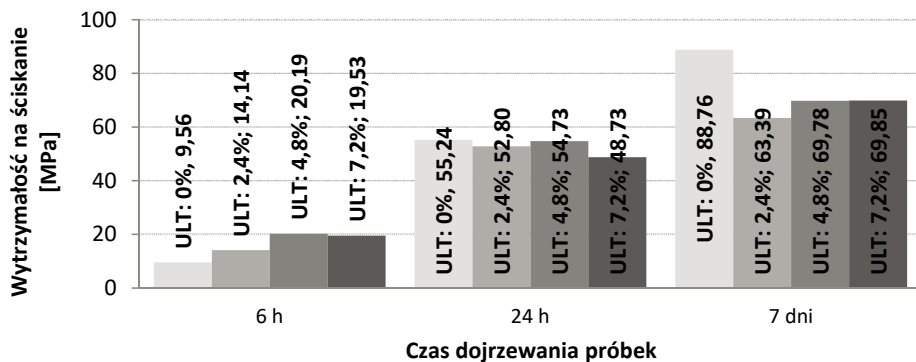
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wpływ domieszek przyspieszających CF-1 i ULT na wytrzymałość na ściskanie betonów o składzie B4.

Stosowanie domieszki Mapefast CF-1 pozwoliło na zwiększenie wytrzymałości po 24 godzinach, spowodowało jednak niewielkie zmniejszenie wytrzymałości siedmiodniowej. Najbardziej korzystne wyniki otrzymano w przypadku zastosowania domieszki w ilości 1,8% masy spoiwa. W tym przypadku przyrost wytrzymałości był większy o prawie 10 MPa niż w betonie bez domieszki.

Domieszka ULT pozwoliła na uzyskanie dwukrotnie większej wytrzymałości po 6 godzinach niż beton o tym samym składzie niezawierający domieszki. Domieszki ULT dodano wtedy w ilości 4,8% masy spoiwa. Po 24 godzinach dojrzewania poprawy wytrzymałości, w porównaniu z betonem bez domieszki, nie stwierdzono. Wytrzymałość po 7 dniach była natomiast znacząco obniżona – o prawie 20 MPa.



Rys. 6. Wpływ domieszki przyspieszającej CF-1 na wytrzymałość na ściskanie betonu o składzie B4

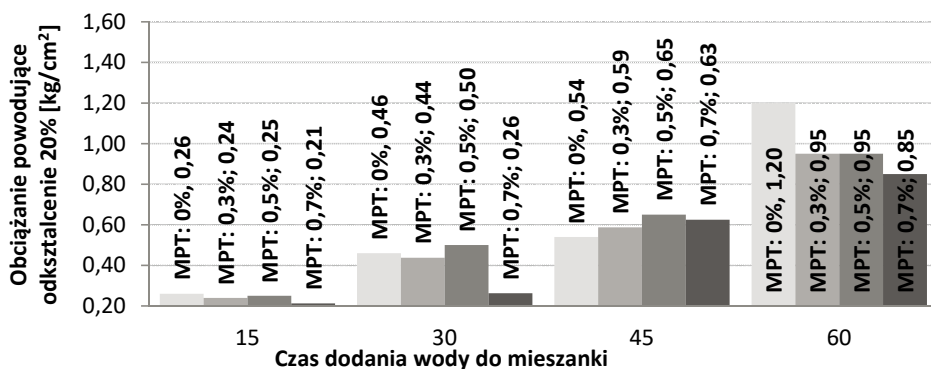


Rys. 7. Wpływ domieszki przyspieszającej ULT na wytrzymałość na ściskanie betonu o składzie B4

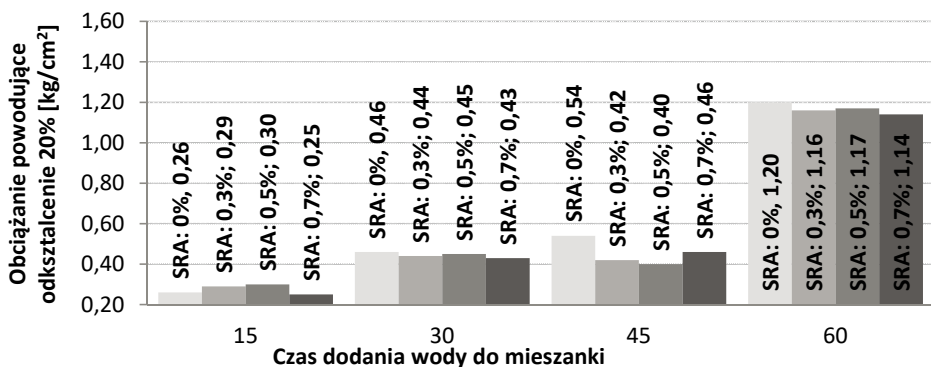
3.3. Stosowanie domieszki opóźniającej i przeciwskurczowej

Punktem wyjścia do opisanych w tym podrozdziale badań była mieszanka o składzie B4 zawierająca domieszki ULT w ilości 4,8% masy spoiwa. Modyfikowano ją dwoma domieszkami: opóźniającej i domieszką redukującą skurcz (SRA). Stosowanie domieszki opóźniającej wiązało się z upłynnieniem mieszanki i zdecydowano się na korygowanie ilości dodawanej do mieszanki wody tak, aby konsystencja wykonywanych zarobków była

zbliżona. Korekt dokonywano tak, aby średni rozplływ zawierał się w przedziale od 115 do 120 mm. W przypadku SRA korekta nie była potrzebna. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki badań możliwości obciążania mieszanek w pierwszych 60 minutach od momentu dodania wody do mieszanki. Umieszczono na nich informacje o procentowej zawartości domieszki w mieszance, w odniesieniu do masy spoiwa. Słupki na wykresach mają tym ciemniejszą barwę im więcej domieszki zawierała dana mieszanka. Stosowanie domieszki opóźniającej MPT powodowało spowolnienie przyrostu możliwości obciążania mieszanki. Co istotne, w przypadku stosowania go w ilości 0,7% masy spoiwa obserwowano wydłużenie czasu zachowania łatwości pompowania do 70 minut – był to jedyny obserwowany w badaniach taki przypadek.



Rys. 8. Wpływ domieszki opóźniającej MPT na możliwość obciążania mieszanki o składzie B4 z 4,8% przyspieszacza ULT



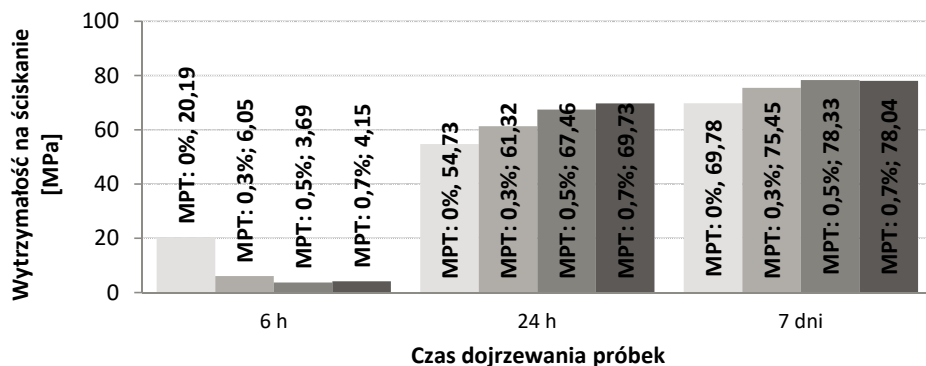
Rys. 9. Wpływ domieszki przeciwskurczowej SRA na możliwość obciążania mieszanki o składzie B4 z 4,8% przyspieszacza ULT

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wpływ domieszki przyspieszających MPT i SRA na wytrzymałość na ściskanie betonów o składzie B4 zawierających domieszki ULT w ilości 4,8% masy spoiwa.

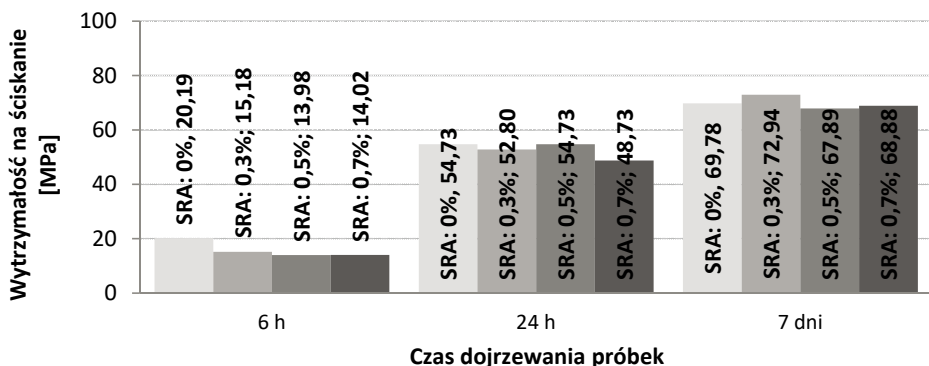
Zwiększanie ilości domieszki MPT skutkowało znacznym obniżaniem wytrzymałości po 6 godzinach. Jej rozwój po 24 godzinach i później w miarę zwiększania ilości MPT

stawał się coraz szybszy. Osiągane wytrzymałości były większe niż w przypadku betonu z samą tylko domieszką ULT.

Zwiększanie ilości domieszki przeciwskurczowej SRA powodowało obniżanie wytrzymałości po 6 godzinach i 24 godzinach. Wytrzymałość siedmiodniowa nie ulegała zmianie.



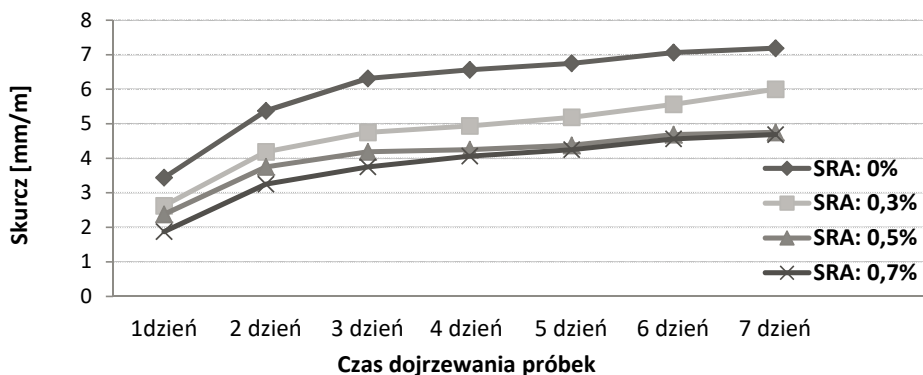
Rys. 10. Wpływ domieszki opóźniającej Mapetard na wytrzymałość na ściskanie betonu o składzie B4 z 4,8% przyspieszacza Mapefast ULTRA



Rys. 11. Wpływ domieszki przeciwskurczowej Mapecure SRA na wytrzymałość na ściskanie betonu o składzie B4 z 4,8% przyspieszacza Mapefast ULTRA

3.4 Wpływ domieszki przeciwskurczowej SRA na skurcz betonu

Badany skurcz od wysychania wzrastał gwałtownie w ciągu pierwszych trzech dni twardnienia betonu. Przyrost skurczu był wtedy większy niż 1 mm/m i w dniu trzecim osiągnął wartość ponad 6 mm/m. Po trzecim dniu skurcz nadal wzrastał, ale dzienne przyrosty nie przekraczały tej wartości i były z czasem coraz mniejsze. Zaobserwowano działanie domieszki przeciwskurczowej. Jej zastosowanie w ilości 0,3% masy spoiwa przynosi znaczące ograniczenie wartości skurczu od wysychania, bo o około 1,5 mm/m. Wartość ta najbardziej ograniczona została w trzecim dniu twardnienia betonu. Po nim redukcja skurczu jest coraz mniejsza. Zwiększanie ilości domieszki powoduje, że ograniczenie skurczu jest wzmożone. Wyniki dla ilości 0,5 i 0,7% masy spoiwa są jednak podobne, co stawia pod znakiem zapytania opłacalność stosowania domieszki w ilości większej niż 0,5% masy spoiwa dla tego składu betonu. Wyniki przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Wpływ domieszki przeciwskurczowej SRA na skurcz betonu o składzie B4 z 4,8% przyspieszacza ULT

3.5. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Wytrzymałość na zginanie przy rozciąganiu nie zmieniała się znacząco w wyniku stosowania domieszek chemicznych. W przypadku dwóch z nich można jednak zauważyć jednoznaczny ich wpływ na otrzymane wyniki. Domieszka ULT powodowała obniżenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu z 14,27 MPa do nawet 11,42 MPa, przy zawartości domieszki wynoszącej 2,4% masy spoiwa. Domieszka SRA natomiast powodowała obniżenie siedmiodniowej wytrzymałości na zginanie przy rozciąganiu do poziomu 12,95 MPa, przy zawartości domieszki wynoszącej 2,4% masy spoiwa. W pozostałych przypadkach wyniki nie różnią się o więcej niż 1 MPa. W tabeli 4 przedstawiono wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.

Tabela 4. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Skład betonu	Rodzaj domieszki	Ilość domieszki [% z masy spoiwa]	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu
B4	- 52,73 278,09	-	14,27
B4	CF-1	1,2	13,42
B4	CF-1	1,8	13,78
B4	CF-1	2,4	14,01
B4	ULT	2,4	11,42
B4	ULT	4,8	11,62
B4	ULT	7,2	12,02
B4	ULT/MPT	4,8/0,3	15,06
B4	ULT/MPT	4,8/0,5	15,30
B4	ULT/MPT	4,8/0,7	15,45
B4	ULT/SRA	4,8/0,3	14,30
B4	ULT/SRA	4,8/0,5	12,95
B4	ULT/SRA	4,8/0,7	13,54

4. Wnioski

- Mieszanki betonowe posiadające zarówno łatwość pompowania, jak i zdolność do układania ich w warstwach tracą urabialność wskutek niewielkich zmian składu i konsystencji.
- W projektowaniu tego typu mieszanek kluczowa dla zdolności do wyciskania betonu z drukarki jest obecność odpowiedniej ilości materiałów drobnoziarnistych. Nie da się ich zastąpić superplastyfikatorem.
- Mieszanki o odpowiedniej dla druku 3D konsystencji nie są wrażliwe na zmiany ilości włókien polipropylenowych.
- Kształtowanie łatwości w budowania w pierwszych 60 minutach od momentu dodania wody do mieszanki nie jest możliwe za pomocą badanych domieszek przyspieszających wiązanie i twardnienie.
- Stosowane domieszki przyspieszające wiązanie i twardnienie miały istotny wpływ na wytrzymałość betonu po 6 i po 24 godzinach. Ich stosowanie może się wiązać z obniżeniem wytrzymałości po 7 dniach.
- Czas urabialności mieszanek przeznaczonych do druku 3D został wydłużony wskutek stosowania domieszki opóźniającej. Jej stosowanie wiąże się jednak ze znacznym obniżeniem wytrzymałości po 6 godzinach.
- Domieszka przeciwskurczowa SRA powoduje prawie dwukrotne zmniejszenie skurczu betonu o największym przyroście wytrzymałości w czasie. Przedstawione wyniki stawiają pod znakiem zapytania opłacalność stosowania SRA w ilości większej niż 0,5% masy spoiwa.
- Wytrzymałość na zginanie przy rozciąganiu nie ulegała znaczącym zmianom wskutek stosowania domieszek. Domieszka ULT i SRA powodowały jednak zauważalne obniżenie wytrzymałości.

Literatura

- [1] Buswell R.A., Soar R.C., Gibb A.G.F., Thorpe A.: Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, nr 16, 2007, pp 224–231
- [2] Le T. T., et al: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, nr 45, 2012, pp 1221–1232.
- [3] Neralla V. N., et al: Technologia druku przestrzennego dla placu budowy. *Zakłady Betonowe International*, nr 4, 2016, pp 30-35.
- [4] PN-EN 1015-3:2000: Metody badań zapraw do murów. Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)
- [5] Austin S. A., Robins P, Goodier C. I.: The rheological performance of wet-process sprayed mortars. *Mag Concr Res*, nr 51, 1999, pp 341–352
- [6] Austin S.A. et al: Construction and repair with wet-process sprayed concrete and mortar. Technical Report 56, 2002, The Concrete Society UK
- [7] Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T.: Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, nr 42, 2012, pp 558–566.
- [8] geekeweek.pl
- [9] trojwymiarowo.pl
- [10] PN-EN 12390-5 Badania betonu – wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [11] Wu P., et al.: A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, nr 68, 2016, pp 21-31
- [12] Buswell R.A., et al: Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction component. *Additive Manufacturing*, 2016
- [13] Khoshnevis B., et al: Mega-scale fabrication by contour crafting. *Industrial and Systems Engineering*, nr 3, 2006

- [14] Asprone D. et al: 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*, nr 165, 2018, pp 218-231
- [15] Jian Hui Lim, Biranchi Panda, Quang-Cuong Pham: Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymer composites with in-process steel cable reinforcement. *Construction and Building Materials*, nr 178, 2018, pp 32-41
- [16] Soltan D. G., Li V.C.: A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites*, nr 90, 2018, pp 1-13
- [17] Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J.: Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*, nr 83, 2017, pp 247-258
- [18] Sanjayan J. G., Nematollahi B., Xia Ming, Marchment T.: Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, nr 172, 2018, pp 468-475
- [19] Zareiyan B., Khoshnevis.: Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete. *Automation in Construction*, nr 83, 2017, pp 212-221
- [20] Zhang Yu, et al: Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and Building Materials*, nr 174, 2018, pp 263-271
- [21] Al-Qutaifi, et al: Mechanical properties of layered geopolymer structures applicable in concrete 3D-printing. *Construction and Building Materials*, nr 176, 2018, pp 690-699
- [22] Karta techniczna http://www.mapei.com/public/PL/MSDS/PL_756_pl_9021897_201701300816581514.pdf
- [23] Karta techniczna <http://www.mapei.com/public/PL/products/751-mapefibrens12-pl.pdf>
- [24] Karta techniczna http://www.mapei.com/public/PL/MSDS/PL_6374_pl_9007612-POL_20180514080606W5TS.pdf
- [25] Karta techniczna http://www.mapei.com/docs/librariesprovider2/products-documents/ise_ce-dop_6857_en-934-2_pl_0.pdf?sfvrsn=81772b09_0
- [26] Karta techniczna http://www.mapei.com/public/PL/MSDS/PL_772_pl_900861_20170130081624QTOY.pdf
- [27] Karta techniczna http://www.mapei.com/public/PL/MSDS/PL_797_pl_901697_20170130081648F6A3.pdf

