KSZTAŁTOWANIE SAMOZAGĘSZCZALNOŚCI BETONÓW WYSOKOWARTOŚCIOWYCH

Aleksandra Kostrzanowska
Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

1 WPROWADZENIE

Beton samozagęszczalny wysokowartościowy (BSZWW) łączy w sobie cechy mieszanki betonu samozagęszczalnego (BSZ) i stwardniałego betonu wysokowartościowego (BWW). Charakteryzuje się zatem odpowiednimi właściwościami reologicznymi mieszanki, pozwalającymi na spełnienie warunków samozagęszczenia: płynności ze zdolnością przepływu przez zbrojenie, stabilności i samoodpowietrzenia. Ponadto BSZWW charakteryzuje się wytrzymałością na ściskanie przekraczającą 60 MPa oraz wysoką odpornością na agresywne działanie środowiska. Zastosowanie betonu samozagęszczalnego daje możliwość betonowania elementów o gęstym zbrojeniu i skomplikowanych kształtach bez konieczności wibrowania, a także uzyskanie bardzo dokładnego odwzorowania powierzchni form bez defektów powierzchniowych (beton architektoniczny). Pozwala przy tym na wyeliminowanie szeregu niedogodności związanych z zagęszczaniem wibracyjnym, tj. hałasu, wibracji oraz zmniejszenie pracochłonności formowania elementów.

Przedstawione zalety świadczą o nadzwyczajnym znaczeniu BSZWW, jednak w krajowych inwestycjach nie jest materiałem często wykorzystywanym.

O ile w literaturze często mówi się o łatwym uzyskaniu wysokiej wytrzymałości, gdy wykonuje się BSZ, o tyle w literaturze nie ma wielu relacji o stosowaniu BSZWW. Stosunkowo często w sposób niezamierzony uzyskuje się wytrzymałość na ściskanie na poziomie 60÷70 MPa, natomiast większe wytrzymałości są rzadko uzyskiwane.

Jedną z przyczyn rzadkiego stosowania BSZWW jest brak danych doświadczalnych o wpływie czynników składu BSZWW na właściwości reologiczne mieszanki i właściwości betonu stwardniałego. W literaturze jest wiele informacji dotyczących wpływu jakościowego tych czynników, jednak brakuje badań w kierunku określenia hierarchizacji wpływu czynników składu BSZWW oraz określenia wpływu ilościowego tych czynników na ww. właściwości.

Innymi ograniczeniami w stosowaniu BSZWW są uwarunkowania technologii ich wykonania oraz bardziej złożony proces projektowania ich składu w porównaniu z betonami zagęszczanymi w sposób tradycyjny. Problemy pojawiają się na etapie projektowania i sprawdzania warunków samozagęszczalności. Przeszkodą w stosowaniu może być duża liczba zarobów próbnych potrzebnych do uzyskania mieszanki samozagęszczalnej. Niektóre metody projektowania proponują jednak ograniczenie zużycia materiałów na zaroby próbne mieszanki poprzez projektowanie właściwości reologicznych mieszanki na podstawie właściwości reologicznych zapraw bądź zaczynów. Jednak nie zostały sformułowane ogólne zależności matematyczne pomiędzy właściwościami reologicznymi zaczynów i zapraw a mieszanek, do tej pory nawet nie podjęto próby sprawdzenia, które z właściwości reologicznych zaczynów czy zapraw z większą dokładnością umożliwiają przewidywanie właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki dla BWW. Znajomość takich zależności pozwoliłaby na efektywne projektowanie BSZWW.

Warunkiem uzyskania BWW jest konieczność dobrego zagęszczenia mieszanki betonowej. W [1, 3] wykazano, że zwiększenie zawartości powietrza w mieszance o 1 % powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 5 MPa. O ile w przypadku zwykłych betonów samozagęszczalnych, które ze względu na specyfikę swego składu charakteryzują się dużą nadwyżką wytrzymałości w stosunku do założonej [2] powyższy fakt może mieć nieco mniejsze znaczenie, to w przypadku BSZWW zapewnienie maksymalnego zagęszczenia jest konieczne. Samozagęszczalne mieszanki BWW mają zdolność do zagęszczania poprzez samorzutne i szybkie odprowadzenie powietrza pod wpływem siły wyporu. Jednak na etapie sprawdzania warunków samozagęszczalności cecha ta jest rzadko badana. W praktyce technologicznej często zakłada się, że mieszanka, która charakteryzuje się odpowiednią płynnością i zachowuje przy tym stabilność, ma także odpowiedni stopień zagęszczenia, czyli małą zawartość powietrza.

W literaturze jest niewiele informacji dotyczących zawartości powietrza w mieszankach samozagęszczalnych. Brakuje także systematycznych danych dotyczących zdolności do samoodpowietrzenia mieszanek samozagęszczalnych w zależności od ich właściwości reologicznych i pod wpływem zmiennych czynników.

Na podstawie analizy literatury zauważa się trzy grupy problemów występujących zarówno podczas etapu projektowania mieszanki, jak i sprawdzania właściwości reologicznych mieszanki - warunków samozagęszczalności. Trzy grupy stanowią:

1 Brak określenia hierarchizacji wpływu czynników składu BSZWW na właściwości reologiczne mieszanki i wytrzymałość na ściskanie.
2 Brak określenia liczbowych zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi mieszanki BSZW a analogicznej dla tej mieszanki zaprawy i zaczynu. Niedostatek także informacji, które z właściwości reologicznych zaczynów czy zapraw z większą dokładnością umożliwiają przewidywanie właściwości reologicznych mieszanki dla BSZWW. Brak sformułowania dodatkowych danych o klasach samozagęszczalności dla BWW.
3 Brak określenia liczbowych zależności pomiędzy ilością powietrza w mieszance a właściwościami reologicznymi mieszanki.

Celem pracy jest wskazanie efektywnego kształtowania samozagęszczalności betonów wysokowartościowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na wpływ składu mieszanki na właściwości reologiczne, możliwość prognozowania właściwości reologicznych mieszanek BSZWW w oparciu o właściwości reologiczne zaczynów i zapraw analogicznych do tych mieszanek oraz przewidywanie zawartości powietrza uwięzionego w mieszance na podstawie znajomości właściwości reologicznych BSZWW.

1.1 *Zakres zmienności poziomów czynników w dalszych badaniach*

Na podstawie wyników badań wstępnych i analizy danych literaturowych określono poziomy czynników zmiennych w badaniach zasadniczych. Określone poziomy czynników zmiennych odpowiadają zakresem swojej zmienności typowym poziomom zmienności składu mieszanek BSZWW stosowanych w praktyce.

Poziomy wszystkich czynników zmiennych w badaniach zasadniczych określono na trzech poziomach zmienności. Zakres zmian czynników obejmuje szeroki obszar, co gwarantuje uniwersalność uzyskanych wyników badań i możliwość ich szerokiego wykorzystania.

Czynniki zmienne i ich poziomy zmienności przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Czynniki zmienne i ich poziomy zmienności.

	Zaczyn	Zaprawa	Mieszanka betonowa
Czynniki zmienne	Poziomy czynników zmiennych:		
Wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem, φkz	-	-	1,2; 1,3; 1,4
Stosunek w/s	0,30; 0,34; 0,38		
Superplastyfikator, SP [%m.s.]	2,5; 3,0; 3,5		
Pył krzemionkowy, CSF [%m.s.]	0; 5; 10		
Punkt piaskowy, PP [%]	-	-	40,0; 42,5; 45,0

Czynnikami stałymi w badaniach był:
– rodzaj składników: CEM I 42,5R, kruszywo łamane sjenitowe,
– uziarnienie kruszywa: 2÷16 mm,

– moment dozowania superplastyfikatora (wraz z wodą zarobową),
– temperatura mieszanki betonowej: 20^0C±1^0C.

1.2 *Plan badań i analiza statystyczna wyników*

Ze względu na cel i zakres badań zastosowano plan zdeterminowany selekcyjny wieloczynnikowy z punktami gwiezdnymi. Plan pozwala na ograniczenie dużej liczby punktów pomiarowych w porównaniu z kompletnym planem badań oraz umożliwia przeprowadzenie analizy istotności statystycznej (ANOVA) i zbudowanie modeli regresji (w programie *STATISTICA*).

Dla potrzeb badań wybrany został plan standardowy dla 5 wielkości wejściowych (czynników zmiennyh), z 1 blokiem i 27 układami.

1.3 *Metody badań*

Badania polegały na określaniu właściwości mieszanek BSZWW. W tym celu badano:
– właściwości reologiczne mieszanek dla BSZWW oraz właściwości reologiczne zapraw i zaczynów analogicznych dla tych mieszanek,
– zawartość powietrza w mieszance zgodnie z PN-EN 12350-7:2001 Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.

Właściwości reologiczne mieszanki warunkują jej rozpływ i samozagęszczenie. Właściwości reologiczne opisywane są dwuparametrową charakterystyką, tj.: granicą płynięcia *g* i lepkością plastyczną *h* oraz odpowiadającymi i skorelowanymi z tymi parametrami: średnicą rozpływu *D* i czasem rozpływu mieszanki *T*.

Granica płynięcia określa wielkość obciążenia koniecznego do wywołania płynięcia mieszanki. Dopóki naprężenia styczne τ od obciążenia ciężarem własnym będą w mieszance mniejsze od jej granicy płynięcia τ_o, to ona będzie zachowywać się jak ciało stałe. Z chwilą, gdy naprężenia styczne przekroczą granicę płynięcia, nastąpi płynięcie mieszanki z prędkością proporcjonalną do wielkości tych naprężeń. Granica płynięcia mieszanki powinna być na tyle mała, aby umożliwić mieszance płynięcie pod jej własnym ciężarem i tym samym umożliwić wypełnienie formy wraz z samopoziomowaniem powierzchni mieszanki.

Od lepkości plastycznej zależy prędkość płynięcia. Im mniejsza będzie lepkość plastyczna mieszanki, tym większa będzie prędkość jej płynięcia [4]. W przypadku mieszanek samozagęszczalnych lepkość plastyczna jest parametrem o zasadniczym znaczeniu dla płynności, stabilności oraz zdolności do samoodpowietrzenia mieszanek.

Mieszanka samozagęszczalna ze względu na odpowiednie właściwości zaliczna jest do klas samozagęszczalności przedstawionych w tab. 2.

Tabela 2. Klasy samozagęszczalności BSZ.

	Zakres pomiarowy	Klasa samozagęszczalności
Maksymalny rozpływ *Slump flow* SF, [mm]	550 - 650 mm 660 - 750 mm 760 - 850 mm	SF1 SF2 SF3
Czas rozpływu do osiągnięcia średnicy 500 mm T_{500}, [s]	< 2 s > 2 s	VS1 VS2

Badania właściwości reologicznych i zawartości powietrza przeprowadzono po 20 i 60 minucie od zmieszania składników.

Parametry reologiczne zaczynu i zapraw mierzono testem reometrycznym przy pomocy przedstawionego na rys. 1a. reometru – Viskomat NT oraz testem rozpływu.

W teście rozpływu zaczynu i zapraw mierzono czas rozpływu do 25 cm (T_{zac}) oraz wartość maksymalnej średnicy rozpływu (D_{zac}).

Wartości granicy płynięcia *g* i lepkości plastycznej *h* dla zaczynów i zapraw aproksymowano modelem Herschela-Bulkleya.

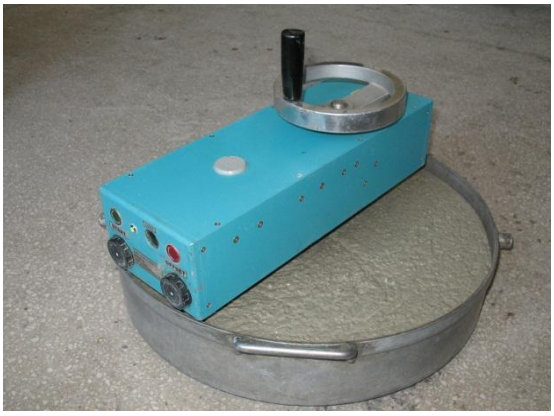
Parametry reologiczne mieszanki betonowej mierzono testem reometrycznym przy pomocy przedstawionego na rys. 1b. reometru BT2 oraz testem rozpływu mieszanki (*slump-flow test* - wg Fpr EN 12350-8:2009).

Dodatkowo określano wytrzymałość na ściskanie, którą mierzono w celu scharakteryzowania wpływu czynników materiałowych, a także w celu sklasyfikowania betonów do klas wytrzymałościowych.

Prócz wytrzymałości na ściskanie nie badano innych właściwości mechanicznych i trwałości BSZWW.

Badania wykonano w laboratorium Katedry Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej.

a)



b)

Rys. 1. Reometry: a) Viskomat NT, b) BT2.

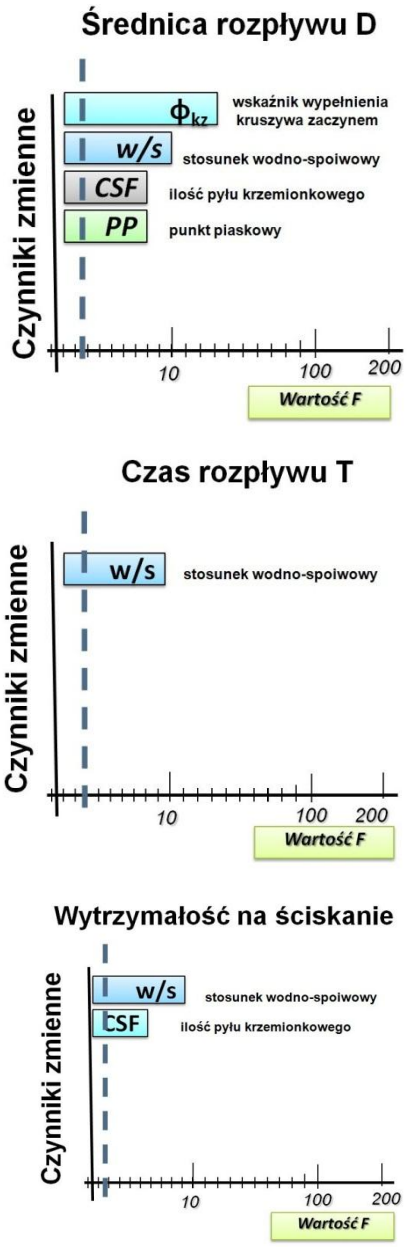
2 WPŁYW SKŁADU I CZASU NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE MIESZANKI I WYTRZYMAŁOŚĆ BSZWW – BADANIA WŁASNE

Badania miały na celu określenie wpływu wybranych czynników składu na właściwości reologiczne zaczynu, zaprawy i mieszanki betonowej dla BSZWW i ich zmiany z upływem czasu oraz określenie wpływu tych czynników na wytrzymałość na ściskanie. Na podstawie uzyskanych wyników badań opracowano matematyczne modele, ujmujące wpływ znaczących statystycznie czynników składu na właściwości reologiczne mieszanki betonowej dla BSZWW.

2.1 *Analiza istotności wpływu i modele statystyczne.*

Z uwagi na to, że badane parametry reologiczne i techniczne wykazują dobrą korelację w niniejszym streszczeniu rozprawy dla celu nr 1 ujawniono tylko parametry techniczne.

Analiza istotności wpływu wykonana na poziomie istotności równym 0,05 pokazuje, że największy wpływ na średnicę rozpływu mieszanki dla BSZWW ma wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz}, a następnie stosunek wodno-spoiwowy w/s (rys. 2). Największy wpływ na czas rozpływu wykazuje stosunek wodno-spoiwowy w/s (rys. 2).



Rys. 2. Analiza istotności wpływu czynników zmiennych na właściwości reologiczne i wytrzymałośc na ściskanie.

Badania potwierdzają najistotniejszy wpływ na wytrzymałość na ściskanie stosunku wodno-spoiwowego w/s oraz ilości pyłu krzemionkowego (rys.2).

Badania potwierdzają podstawowe znaczenie stosunku wodno-spoiwowego na wytrzymałość na ściskanie i na właściwości reologiczne. Ze względu na uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie przy projektowaniu betonów wysokowartościowych dąży się do minimalizowania stosunku w/s, co jednak warunkuje wzrost granicy płynięcia *g* i pogorszenie urabialności mieszanki dla BSZWW. Należy więc tak dobierać stosunek w/s, aby był adekwatny do wymaganych właściwości betonu, ale jednocześnie unikając nieuzasadnionego obniżenia jego wartości poniżej koniecznej. Obniżenie stosunku w/s do wartości w/s=0,30 w niektórych przypadkach, gdy jednoczenie jest niski wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem, może skutkować brakiem samozagęszczalności mieszanki BSZWW.

Istotnym parametrem dla kształtowania samozagęszczalności mieszanki BSZWW jest ilość zaczynu wyrażona poprzez wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz}. Wzrost wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz} powoduje tendencję do upłynnienia mieszanki.

Dodatek pyłu krzemionkowego obok stosunku w/s jest uznawany za najważniejszy czynnik w kształtowaniu właściwości stwardniałych betonów wysokowartościowych. Dodanie do układu drobnoziarnistego materiału o powierzchni właściwej większej niż cement powoduje wzrost granicy płynięcia *g* ze względu na zwiększenie wodożądności spoiwa.

W badanym zakresie zmienności wpływ superplastyfikatora na właściwości reologiczne mieszanki nie jest istotny statystycznie. Ponieważ w badaniach, aby uniknąć nadmiernych zmian urabialności w czasie, ilość superplastyfikatora dodanego do mieszanki samozagęszczalnej zastosowano zbliżoną i większą od punktu nasycenia.

Tendencje zmiany wielkości rozpływu zaczynu z upływem czasu są odwrotne niż mieszanki betonowej. Zaczyn wraz z upływem czasu upłynnia się, co jest związane z efektem działania superplastyfikatora w czasie. Natomiast mieszanka samozagęszczalna i zaprawa traci z czasem swoją urabialność, co widoczne było po 60 minutach od zmieszania składników. Reologia zapraw i mieszanek betonowych jest silnie zależna od efektów masy, wynikających z dominującego udziału kruszywa w mieszance. Natomiast o reologii zaczynów stanowią zjawiska powierzchni (zjawiska międzyfazowe), a także wpływ ma powierzchnia właściwa cementu.

Na podstawie uzyskanych wyników badań opracowano statystyczne modele, ujmujące wpływ czynników składu na właściwości reologiczne mieszanki samozagęszczalnej dla betonu wysokowartościowego w postaci wielomianu drugiego stopnia (1 i 2).

$$D_{m_20min.} = -19{,}59+4{,}94\varphi_{kz}+0{,}34w/s-0{,}64CSF \quad (1)$$

$$T_{m_20min.} = 41{,}76-0{,}93\ w/s \quad (2)$$

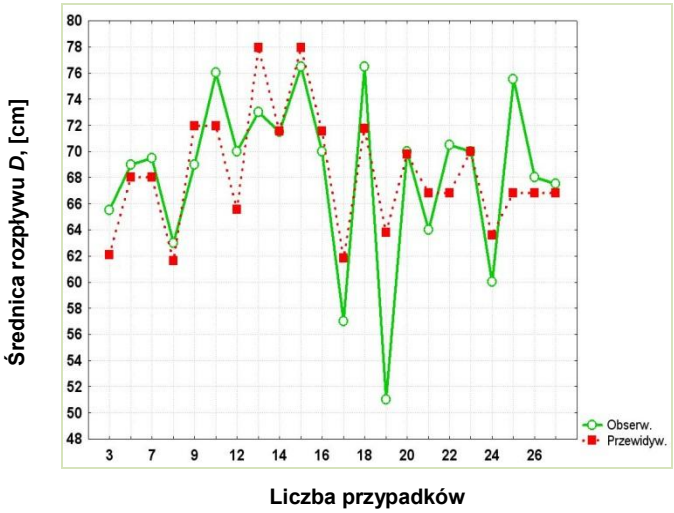
gdzie:

φ_{kz} – wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem,

w/s – stosunek wodno-spoiwowy,

CSF – ilość pyłu krzemionkowego.

Wykres bloku danych z wieloma zmiennymi – średnica rozpływu i czas rozpływu po 20 minutach od zmieszania składników (model przewidywany, model obserwowany) znajduje się na rys. 3.



Rys. 3. Jeden z wykresów bloku danych, wiele zmiennych - średnica rozpływu po 20 minutach od zmieszania składników.

Współczynnik korelacji modelu wynosi r=0,81 oraz współczynnik determinacji r^2=0,75. Można interpretować, że 75% wyników empirycznych jest wyjaśnionych przez model teoretyczny. Z analizy reszt wynika, że modele są dopasowane, gdyż istnieje brak autokorelacji i autokorelacji cząstkowych, co wskazuje na losowe reszty modelu

Sformułowane zależności regresyjne charakteryzują się wysokimi estymatorami dopasowania i istotności. Szeroki zakres przestrzeni czynnikowej, w której zostały określone zależności regresyjne, stanowi o możliwości i dużej użyteczności jej stosowania do przewidywania i kształtowania parametrów reologicznych mieszanek betonowych.

Jednak z uwagi na wrażliwość mieszanki samozagęszczalnej na nawet niewielkie zmiany oraz zmieniające się generacje domieszek, rodzaje cementów i dodatków mineralnych, konieczne jest przeprowadzenie weryfikujących badań doświadczalnych. Badania takie powinny uwzględniając wszystkie występujące w danych warunkach wykonywania betonu czynniki technologiczne w przewidywanym zakresie ich zmienności.

3 PRZEWIDYWANIE WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH SAMOZAGĘSZCZALNEJ MIESZANKI BWW W OPARCIU O BADANIA ZACZYNÓW I ZAPRAW – BADANIA WŁASNE

Przeprowadzone badania miały na celu określenie możliwości przewidywania właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej za pomocą badania parametrów reologicznych zaczynu i zaprawy. Na podstawie uzyskanych wyników badań opracowano modele regresyjne prognozowania właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej dla BWW.

3.1 *Model statystyczny wpływu właściwości reologicznych zaczynu na właściwości reologiczne samozagęszczalnej mieszanki BWW*

Model opisujący zależność parametrów właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki betonu wysokowartościowego od parametrów reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz} można sformułować w postaci wielomianu drugiego stopnia – równania 3 i 4. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji dla równania wyliczono za pomocą programu *STATISTICA*. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji przedstawiono w tab. 3 i 4.

Równanie regresyjne zależności granicy płynięcia *g* i lepkości plastycznej *h* mieszanki od granicy płynięcia *g* i lepkości plastycznej *h* zaczynu oraz wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem ma następującą postać:

$$PR_m\ (\varphi_{kz},\ PR_{zacz}) = C + A\cdot\varphi_{kz} + B\cdot PR_{zacz} + A\cdot B\cdot\varphi_{kz}\cdot PR_{zacz} + A\cdot A\cdot\varphi_{kz}^2 + B\cdot B\cdot PR_{zacz}^2 \quad (3)$$

PR_m – parametry reologiczne mieszanki: g_m [Nmm], h_m [Nmms];

PR_{zacz} – parametry reologiczne zaczynu: g_{zacz} [Nmm], h_{zacz} [Nmms];

φ_{kz} – wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem;

C, A, B, AB, AA, BB – oceny parametrów regresji zależne od właściwości składników.

Tabela 3. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji dla funkcji regresji opisującej granicę płynięcia i lepkość plastyczną mieszanki w zależności od PR_{zacz} i φ_{kz}.

oceny parametrów regresji równania dla:	C	A	B	AA	AB	BB	R
granicy płynięcia, g_m [Nmm]	38781,88	-5654,06	363,10	205,98	-2,45	-77,45	0,761
lepkości plastycznej, h_m [Nmms]	-1,09E-05	18697,68	585,53	-768,13	-21,75	-1,71	0,712

Równanie regresyjne zależności średnicy i czasu rozpływu mieszanki od średnicy i czasu rozpływu zaczynu oraz wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem ma następującą postać:

$$PR_m\ (\varphi_{kz},\ PR_{zacz}) = C + A\cdot\varphi_{kz} + B\cdot PR_{zacz} + A\cdot B\cdot\varphi_{kz}\cdot PR_{zacz} + A\cdot A\cdot\varphi_{kz}^2 + B\cdot B\cdot PR_{zacz}^2 \quad (4)$$

PR_m – parametry reologiczne mieszanki: D_m [cm], T_m [s];

PR_{zacz} – parametry reologiczne zaczynu: D_{zacz} [cm], T_{zacz} [s];

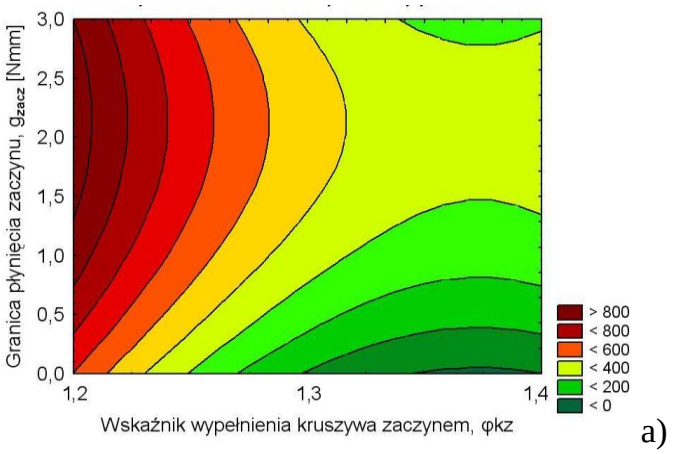
φ_{kz} – wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem;

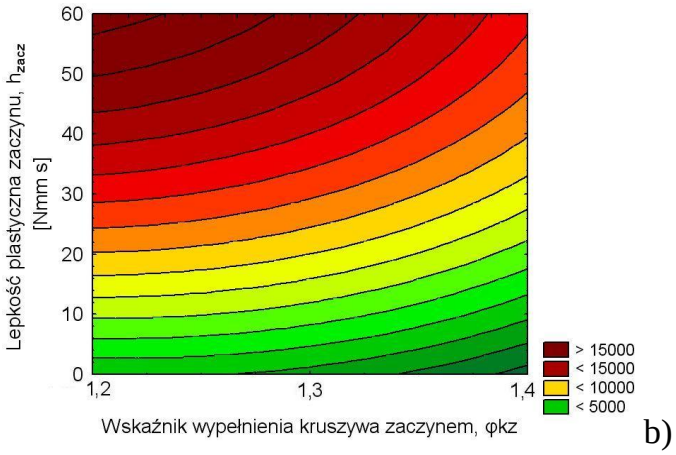
C, A, B, AB, AA, BB – oceny parametrów regresji zależne od właściwości składników.

Tabela 4. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji dla funkcji regresji opisującej średnicę i czas rozpływu mieszanki w zależności od PR_{zacz} i φ_{kz}.

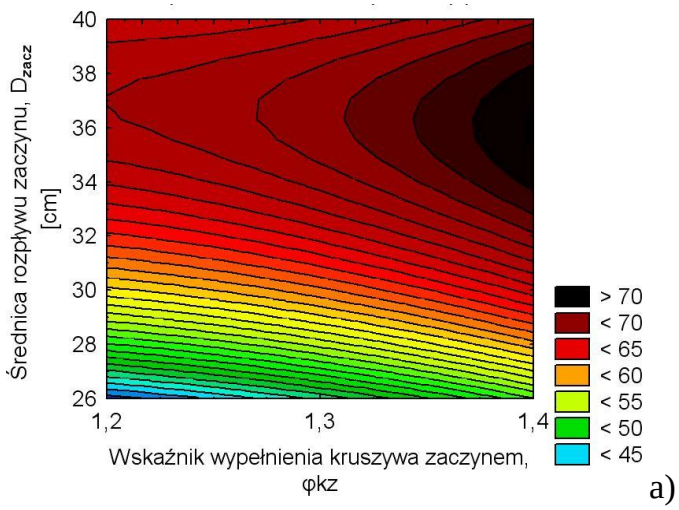
oceny parametrów regresji równania dla:	C	A	B	AA	AB	BB	R
średnicy rozpływu mieszanki, D_m [cm]	-201,57	-120,79	18,25	85,53	-2,08	-0,21	0,779
czasu rozpływu mieszanki, T_m [s]	-38,10	63,48	7,30	-22,36	-5,93	0,20	0,725

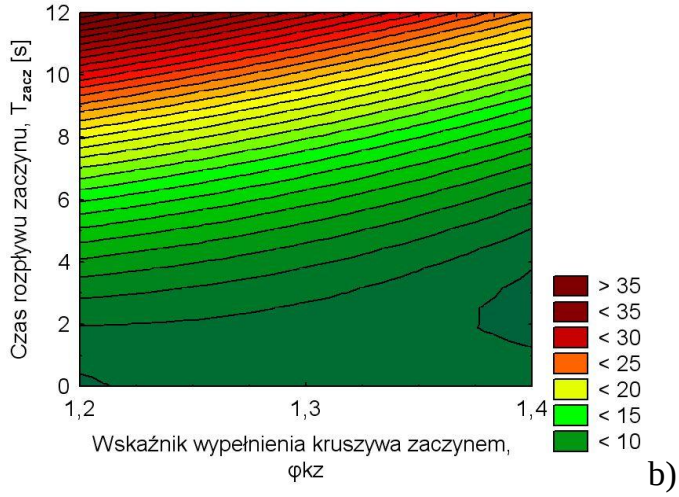
Wykres obrazujący model (3) znajduje się na rys. 4a i 4b. Wykres obrazujący model (4) znajduje się na rys. 5a i 5b.





Rys. 4. Wykres warstwicowy zależności: a) g_m od g_{zacz} i φ_{kz}; b) h_m od h_{zacz} i φ_{kz}.





Rys. 5. Wykres warstwicowy zależności: a) D_m od D_{zacz} i φ_{kz}; b) T_m od T_{zacz} i φ_{kz}.

3.2 *Model statystyczny wpływu właściwości reologicznych zaprawy na właściwości reologiczne samozagęszczalnej mieszanki BWW*

Model opisujący zależność parametrów właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki betonu wysokowartościowego od parametrów reologicznych zaprawy i stosunku ilości zaprawy do całkowitej ilości mieszanki *Z* można sformułować w postaci wielomianu drugiego stopnia – równania 5 i 6. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji dla równania wyliczono za pomocą programu *STATISTICA* wykorzystując do tego celu 27 pomiarów dla każdej z badanych serii mieszanek i zapraw. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji przedstawiono w tab. 5 i 6.

Równanie regresyjne zależności granicy płynięcia *g* i lepkości plastycznej *h* mieszanki od granicy płynięcia *g* i lepkości plastycznej *h* zaprawy oraz stosunku ilości zaprawy do całkowitej ilości mieszanki ma następującą postać:

$$PR_m\ (Z,\ PR_{zap}) = C + A \cdot Z + B \cdot PR_{zap} + A \cdot B \cdot Z \cdot PR_{zap} + A \cdot A \cdot Z^2 + B \cdot B \cdot PR_{zap}^2 \quad (5)$$

gdzie:

PR_m – parametry reologiczne mieszanki: g_m [Nmm], h_m [Nmms];

PR_{zap} – parametry reologiczne zaprawy: g_{zap} [Nmm], h_{zap} [Nmms];

Z – stosunek ilości zaprawy do całkowitej ilości mieszanki Z=(C+CSF+W+P)/(C+CSF+W+P+K);

C, A, B, AB, AA, BB – oceny parametrów regresji zależne od właściwości składników.

Tabela 5. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji dla funkcji regresji opisującej średnicę i czas rozpływu mieszanki w zależności od PR_{zap} i Z.

oceny parametrów regresji równania dla:	C	A	B	AA	AB	BB	R
granicy płynięcia, g_m [Nmm]	-23015,41	824,57	-981,94	-7,37	21,36	2,97	0,874
lepkości plastycznej, h_m [Nmms]	-5,60E-05	18598,68	5850,08	-154,04	-86,08	-6,76	0,804

Równanie regresyjne zależności średnicy i czasu rozpływu mieszanki od średnicy i czasu rozpływu zaprawy oraz stosunku ilości zaprawy do całkowitej ilości mieszanki ma następującą postać:

$$PR_m\ (Z,\ PR_{zap}) = C + A \cdot Z + B \cdot PR_{zap} + A \cdot B \cdot Z \cdot PR_{zap} + A \cdot A \cdot Z^2 + B \cdot B \cdot PR_{zap}^2 \quad (6)$$

PR_m – parametry reologiczne mieszanki: D_m [cm], T_m [s];

PR_{zap} – parametry reologiczne zaprawy: D_{zap} [cm], T_{zap} [s];

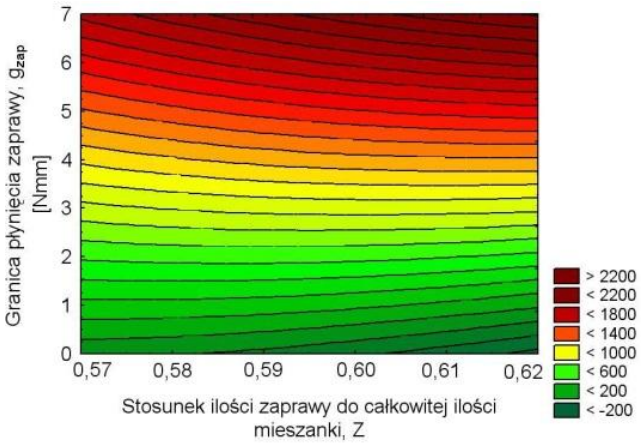
Z – stosunek ilości zaprawy do całkowitej ilości mieszanki Z=(C+CSF+W+P)/(C+CSF + W+P+K);

C, A, B, AB, AA, BB – oceny parametrów regresji zależne od właściwości składników.

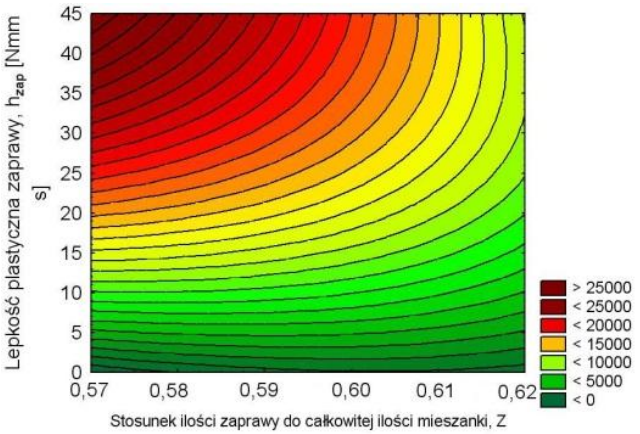
Tabela 6. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji dla funkcji regresji opisującej średnicę i czas rozpływu mieszanki w zależności od PR_{zap} i Z.

oceny parametrów regresji równania dla:	C	A	B	AA	AB	BB	R
średnicy rozpływu mieszanki, D_m [cm]	-530,12	2377,06	-10,29	-2609,45	24,21	-0,02	0,973
czasu rozpływu mieszanki, T_m [s]	249,02	-880,39	8,96	777,74	-12,39	0,01	0,961

Zależności (5) i (6) przedstawiono na wykresach warstwicowych odpowiednio na rys. 6a i 6b oraz 7a i 7b.

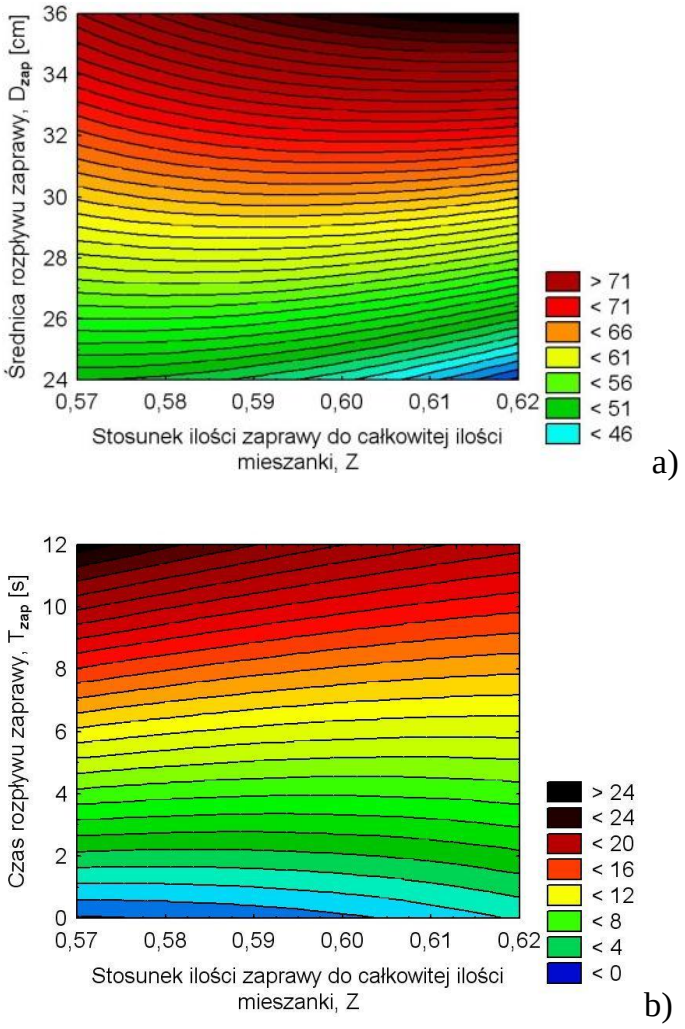


a)



b)

Rys. 6. Wykres warstwicowy zależności: a) g_m od g_{zap} i Z; b) h_m od h_{zap} i Z.



Rys. 7. Wykres warstwicowy zależności: a) D_m od D_{zap} i *Z*; b) T_m od T_{zap} i *Z*.

Parametry reologiczne mieszanki obliczone na podstawie równania i zmierzone doświadczalnie zostały zweryfikowane w badaniach kontrolnych.

W tab. 7. podano standardowe i średnie odchylenie wartości obliczonych parametrów g_m i h_m oraz D_m i T_m od zmierzonych, zarówno dla serii pomiarów wykorzystanych do określenia współczynników regresji, jak i dla pomiarów kontrolnych.

Tabela 7. Odchylenie standardowe i średnie dla wartości modelowych i kontrolnych.

Odchylenie:	Granica płynięcia, g_m	Lepkość plastyczna, h_m	Średnica rozpływu, D_m	Czas rozpływu, T_m
standardowe model, %]	10,36	9,63	12,56	5,62
średnie model, [%]	8,23	7,63	9,92	3,95
standardowe kontrolne,[%]	9,36	9,12	9,9	6,63
średnie kontrolne, [%]	8,11	7,98	7,91	5,32

3.3 *Podsumowanie*

Na podstawie uzyskanych wyników badań opracowano statystyczny model opisujący zależności właściwości reologicznych mieszanki dla BSZWW od właściwości reologicznych zaczynu i ilości zaczynu – wyrażonej poprzez wskaźnik wypełnienia niezagęszczonego kruszywa zaczynem $\varphi_{kz.}$ Zaproponowano również model opisujący zależność właściwości reologicznych mieszanki dla BSZWW od właściwości reologicznych zaprawy i ilości zaprawy w mieszance betonowej.

Równanie opisujące właściwości reologiczne mieszanki na podstawie właściwości reologicznych zaprawy i ilości zaprawy w mieszance charakteryzuje się wyższymi współczynnikami korelacji (R=0,874 dla *g i* R=0,804 dla *h*, R=0,973 dla *D* i R=0,961 dla *T*) niż równanie opisujące właściwości reologiczne mieszanki na podstawie właściwości reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem (R=0,761 dla *g* i R=0,712 dla *h*, R=0,779 dla *D* i R=0,725 dla *T)*. Jest to podstawą do stwierdzenia, że można kształtować parametry reologiczne mieszanki oraz przewidywać kierunki i wielkość zmian właściwości reologicznych mieszanek betonowych poprzez parametry reologiczne zaprawy i ilość zaprawy w mieszance dokładniej niż poprzez parametry reologiczne zaczynu i wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem.

Szeroki zakres przestrzeni czynnikowej, dla której określono równania regresyjne (3-6) i zadowalająca zgodność parametrów reologicznych obliczonych na podstawie równań regresyjnych i zmierzonych doświadczalnie, stanowi o możliwości skutecznego stosowania ich zarówno do przewidywania parametrów reologicznych w mieszance samozagęszczalnej, jak i do kształtowania jej parametrów reologicznych na podstawie parametrów reologicznych zaprawy i ilości zaprawy w mieszance.

4 WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE SAMOZAGĘSZCZALNEJ MIESZANKI BWW A ILOŚĆ UWIĘZIONEGO W NIEJ POWIETRZA – BADANIA WŁASNE

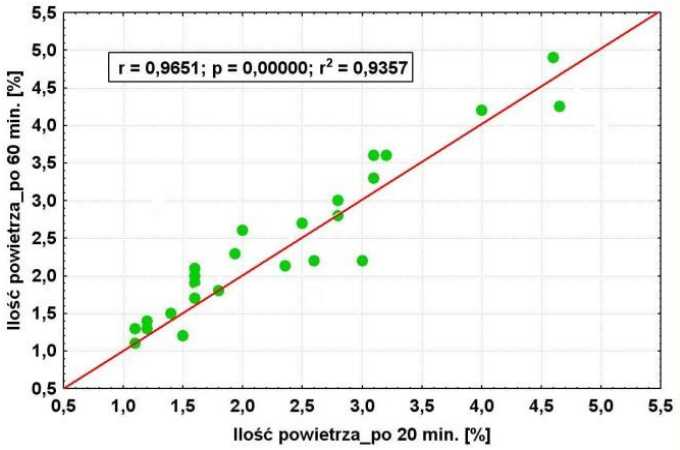
Przeprowadzone badania miały na celu określenie zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi a zawartością powietrza w mieszankach samozagęszczalnych BWW.

W związku z tym opracowano matematyczny model opisujący zależność właściwości reologicznych mieszanki od zawartości powietrza uwięzionego w mieszance samozagęszczalnej dla BWW.

4.1 *Model statystyczny wpływu właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki BWW na ilość uwięzionego w niej powietrza*

Z uwagi na fakt, że pomiary zawartości powietrza w badaniach własnych przeprowadzane są dla czasu po 20 i po 60 minutach od zmieszania składników mieszanki, w pierwszej kolejności sprawdzono możliwość rozpatrywania wyników łącznie.

W celu sprawdzenia tej możliwości wykonano analizę korelacyjną zawartości powietrza uzyskanych po 20 i po 60 minucie od zmieszania składników i przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Korelacja zawartości powietrza w mieszance, zmierzonego po 20 i 60 minutach od zmieszania składników.

Zarówno korelacja zawartości powietrza w mieszance zmierzonej po 20 i 60 minutach od zmieszania składników, jak i współczynnik determinacji są na bardzo wysokim poziomie. Można więc przypuszczać podobne właściwości zawartości powietrza po 20 minucie, jak i po 60 minutach. Jednak z analizy korelacyjnej można wnioskować jedynie o tym, że tendencje wzrostu i spadku zawartości powietrza zachowują się podobnie.

W celu potwierdzenia podobnych właściwości zawartości powietrza w mieszance sprawdzono hipotezę zerową, mówiącą o braku istotnych różnic pomiędzy przeciętnymi dla parametrów zawartości powietrza po 20 i 60 minutach. Hipotezę sprawdzono za pomocą testu kolejności par Wilcoxona (tab. 8.).

W teście kolejności par Wilcoxona dla zawartości powietrza mierzonej po 20 i 60 minutach założono, że:

***H_0**: Brak istotnych różnic pomiędzy przeciętnymi dla zawartości powietrza w mieszance mierzonej po 20 i 60 minutach.*

***H_1**: Są istotne różnice pomiędzy przeciętnymi dla zawartości powietrza w mieszance po 20 i 60 minutach.*

Tabela 8. Test kolejności par Wilcoxona (korelacje) dla zawartości powietrza w mieszance. Zaznaczone wyniki są istotne z α <0,05000.

Para zmiennych	N ważnych	*p*
ZP_m_20, ZP_m_60	25	0,093668

Wartość *p* (tzw. prawdopodobieństwo testowe) jest większe od poziomu istotności testu α=0,05, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Zatem nie istnieją istotne różnice między przeciętnymi.

Na podstawie powyższego testu kolejności par Wilcoxona można stwierdzić, iż zasadnym jest rozpatrywać jedną analizę zawartości powietrza w mieszance, mierzoną po 20 i po 60 minutach.

Model opisujący zależność zawartości powietrza uwięzionego w mieszance od właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki BWW można sformułować w postaci wielomianu drugiego stopnia – równania 7 i 8.

Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji przedstawiono w tab. 9.

$$ZP\,(g_m, h_m) = C + A\cdot g_m + B\cdot h_m + AB\cdot g_m\cdot h_m + AA\cdot g_m^2 + BB\cdot h_m^2 \quad (7)$$

$$ZP\,(D_m, T_m) = C + A\cdot D_m + B\cdot T_m + AB\cdot D_m\cdot T_m + AA\cdot D_m^2 + BB\cdot T_m^2 \quad (8)$$

gdzie:

ZP – zawartość powietrza uwięzionego w mieszance;

g_m – granica płynięcia g, [Nmm];

h_m – lepkość plastyczna h, [Nmms];

D_m – średnica rozpływu mieszanki, [cm];

T_m – czas rozpływu mieszanki, [s];

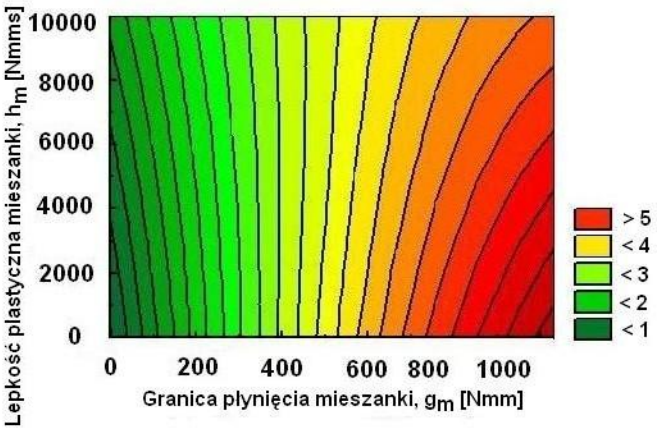
C, A, B, AB, AA, BB – oceny parametrów regresji zależne od właściwości składników.

Tabela 9. Oceny parametrów regresji i współczynnik korelacji dla funkcji regresji opisującej zawartość powietrza w mieszance.

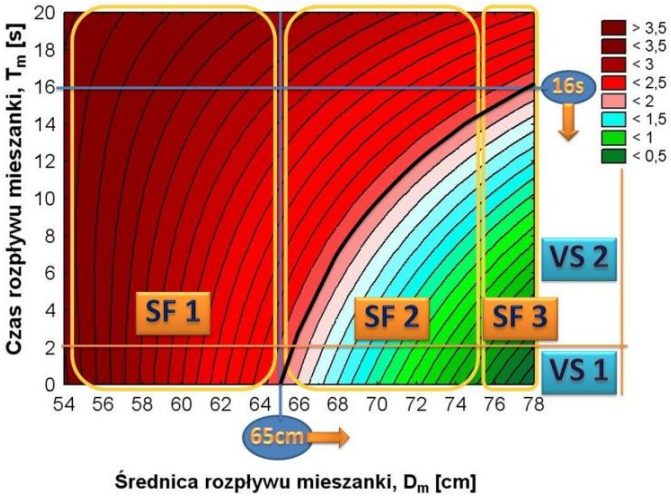
oceny parametrów regresji równania dla:	C	A	B	AB	AA	BB	R
zawartości powietrza zależne od g_m i h_m	0,47	0,07	7,03E-05	-2,11E-07	-1,9E-06	1,43E-09	0,71
zawartości powietrza zależne od D_m i T_m	10,67	-0,13	-0,27	0,0048	-0,00009	0,0007	0,89

Zależności dla uzyskanych wyników badań przedstawiono na wykresach warstwicowych - rys. 9 i 10. Wraz ze wzrostem średnicy rozpływu mieszanki i zmniejszaniem czasu rozpływu mieszanki zmniejsza się ilość powietrza w mieszance.

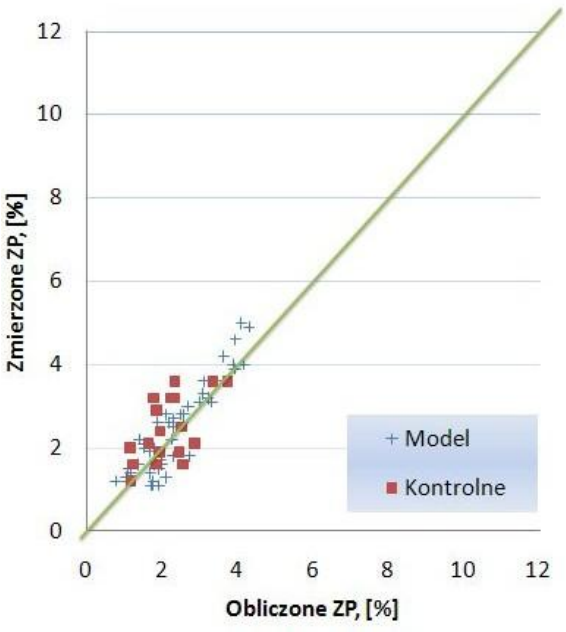
Zakres zawartości powietrza pozostającego w badanych mieszankach samozagęszczalnych zawiera się w przedziale od 1,1% do 4,6% (pomiary po 20 minutach od zmieszania składników) oraz od 1,1% do 4,9% (pomiary po 60 minutach od zmieszania składników).



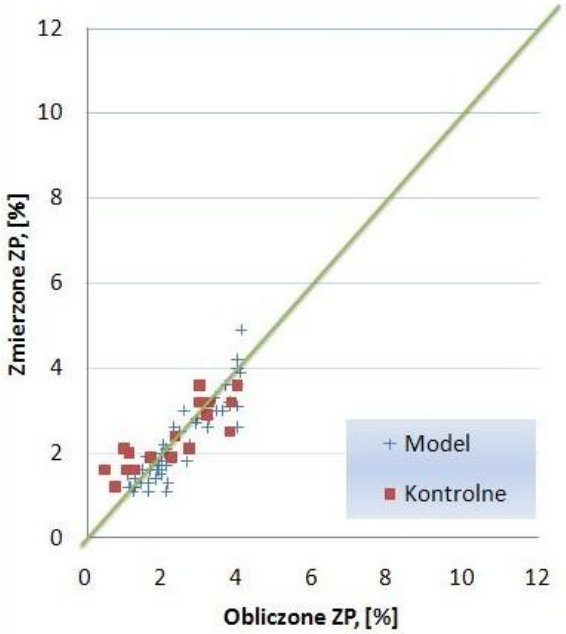
Rys. 9. Wykres warstwicowy zależności ilości powietrza od g_m i h_m.



Rys. 10. Wykres warstwicowy zależności ilości powietrza od D_m i T_m.



a)



b)

Rys. 11. Wykresy zależności obliczone – zmierzone zawartości powietrza w mieszance zależne od: a) g_m i h_m; b) D_m i T_m.

Mieszanki, których zawartość powietrza wynosiła 2,0% lub mniej, charakteryzują się średnicą rozpływu nie mniejszą niż 65 cm (granica płynięcia *g* nie większa niż 250 Nmm) oraz czasem rozpływu nie większym niż 16 s (lepkość plastyczna *h* nie większa niż 14000 Nmms)

(rys. 9 i 10). W zależności od klasy samozagęszczalności te graniczne wartości czasu i średnicy rozpływu, dla których mieszanka charakteryzuje się zawartością powietrza ≤2%, ulegają zmianie.

Zawartość powietrza w mieszance obliczona na podstawie równania i zmierzona doświadczalnie została zweryfikowana w badaniach kontrolnych. Wykresy zależności wartości obliczonych wg przyjętych modeli i zmierzonych doświadczalnie zostały przedstawione na rys. 11. Mieszanka ma większą zdolność do samoodpowietrzenia przy wzroście stosunku w/s i φ_{kz} oraz przy zmniejszeniu punktu piaskowego P.P. i ilości pyłu krzemionkowego.

4.2 *Podsumowanie*

Badania wykazują, że zawartość powietrza uwięzionego w mieszance samozagęszczalnej jest zależna od jej właściwości reologicznych. Istnieje wyraźna korelacja wielkości parametrów reologicznych mieszanki z zawartością uwięzionego w niej powietrza.

Zawartość powietrza w mieszance zależy od czynników wpływających także na średnicę rozpływu. Zwiększenie średnicy rozpływu (zmniejszenie granicy płynięcia) powoduje zmniejszenie zawartości powietrza w mieszance.

Ilość powietrza zmniejsza się przy wzroście stosunku w/s i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz} oraz przy zmniejszeniu punktu piaskowego P.P. i ilości pyłu krzemionkowego.

Można sądzić, że większa ilość zaczynu, w którym z natury znajdują się pęcherzyki powietrza, wiąże się z większą zawartością powietrza w mieszance. Jednak badania wykazały, że wraz ze wzrostem wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz} zmniejsza się ilość powietrza w mieszance betonowej. Można sądzić, że większa płynność mieszanki powoduje lepsze jej odpowietrzenie, co wynika ze specyfiki samozagęszczalności.

Wielkość stosunku w/s w dużej mierze wpływa na zawartość powietrza w mieszance. Należy jednak tak dobierać stosunek w/s, aby był adekwatny do wymaganych właściwości betonu, unikając jednocześnie nieuzasadnionego obniżenia jego wartości poniżej koniecznej. Niski stosunek w/s powoduje, że uzyskanie mieszanek o dużej płynności, a więc również dużej zdolności do samoodpowietrzenia, jest utrudnione.

Dodatek pyłu krzemionkowego w betonach wysokowartościowych również powinien być starannie optymalizowany. Mieszanki z większą ilością pyłu krzemionkowego (ponad 5%) charakteryzują się mniejszą średnicą rozpływu (większym parametrem *g*) i w wyniku tego odpowietrzają się trudniej. Dlatego w pewnych przypadkach zwiększanie ilości pyłu krzemionkowego może, zamiast oczekiwanej poprawy, powodować nawet pogorszenie cech wytrzymałościowych betonu (ze względu na dużą ilość powietrza w mieszance).

5 PODSUMOWANIE

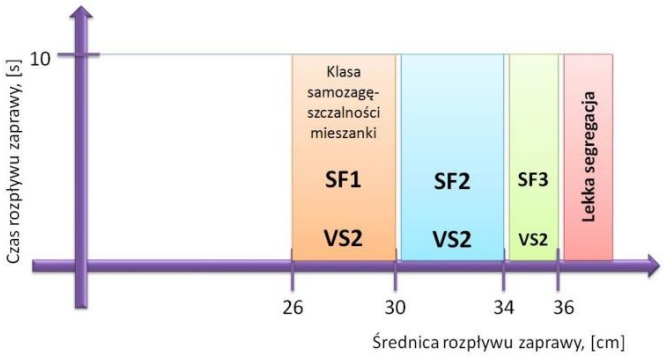
BSZWW stanowią grupę betonów, dla których projektowanie mieszanki betonowej opiera się na kształtowaniu odpowiednich właściwości reologicznych, pozwalających na spełnienie trzech warunków samozagęszczalności. Warunki te odnoszą się do wysokiej płynności, zdolności przepływu przez zbrojenie oraz samoodpowietrzenia mieszanki.

W niniejszej pracy samozagęszczalność mieszanek BWW kształtowano poprzez badanie i sterowanie właściwościami reologicznymi i zawartością powietrza. W pracy określono modele statystyczne opisujące właściwości reologiczne i zawartość powietrza w mieszance betonowej, a także określono analizę istotności wpływu czynników składu na właściwości reologiczne (w programie *STATISTICA*). Modele te charakteryzują się wysokimi estymatorami dopasowania i istotności. Szeroki zakres przestrzeni czynnikowej, w której zostały określone zależności regresyjne stanowi o możliwości i dużej użyteczności ich stosowania do przewidywania właściwości reologicznych i zawartości powietrza uwięzionego w mieszance samozagęszczalnej.

5.1 *Uwagi praktyczne*

Badania wykazały, że mieszanki dla BSZWW ze względu na spełnienie warunku samozagęszczalności należy projektować tak, aby charakteryzowały się rozpływem o średnicy przynajmniej 65 cm wg testu rozpływu (granica płynięcia *g* jest mniejsza od 250 Nmm - wg testu wykonywanego reometrem BT2) i czasem rozpływu poniżej 16 s. Na rys. 14 przedstawiono obszar samozagęszczalności mieszanki BWW ze względu na wielkość rozpływu analogicznej do tej mieszanki zaprawy.

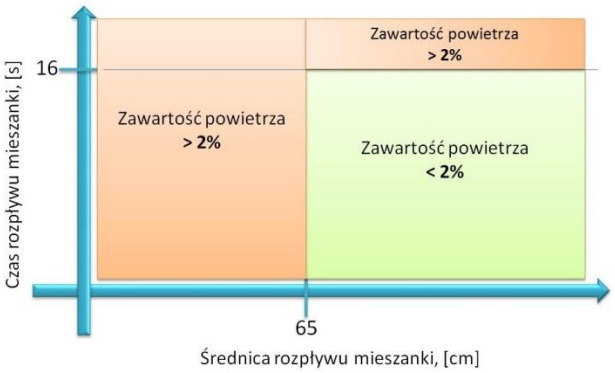
Badania ujawniają, że zmiany parametrów reologicznych mieszanek betonowych mogą być zarówno jakościowo, jak i ilościowo prognozowane na podstawie znacznie łatwiejszych do wykonania badań zmian parametrów reologicznych zapraw. Zaprawa o rozpływie 31-32 cm pozwala na uzyskanie mieszanki betonowej o rozpływie klasyfikującym ją do grupy samozagęszczalności SF2 (rys. 12).



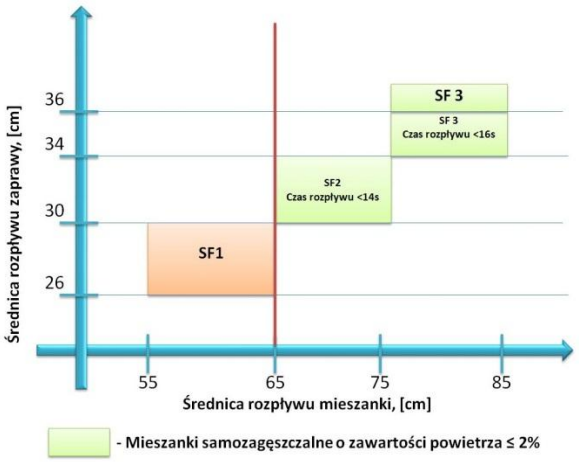
Rys. 12. Obszar samozagęszczalności mieszanki w zależności od średnicy i czasu rozpływu zaprawy.

Mieszanka betonowa zaliczana do tej klasy samozagęszczalności powinna charakteryzować się 2% lub mniejszą zawartością powietrza, dla której mieszankę uznaje się za zagęszczoną (rys.13). Badania pokazały, że uzyskanie mieszanek dla BSZWW należących do klas samozagęszczalności VF1 jest bardzo trudne (rys.14).

W badaniach kształtowano parametry reologiczne mieszanek, zapraw i zaczynów poprzez zmiany ilości wyselekcjonowanych czynników materiałowych. Rodzaj materiałów był niezmienny. Przyjęto typowe składniki stosowane w praktyce do BSZWW. Należy mieć na uwadze, że diametralna zmiana rodzajów składników może wpłynąć w sposób znaczący na właściwości reologiczne. Szczególne znaczenie, przy ewentualnej zmianie rodzajów składników, miałby rodzaj superplastyfikatora, chociażby ze względu na kompatybilność z cementem. Na właściwości reologiczne mieszanki wpływa wiele czynników. Oprócz wpływu czynników materiałowych, ujawnionego w niniejszej pracy, mają wpływ także warunki technologiczne jej wykonania.



Rys. 13. Obszar zagęszczenia mieszanki dla BSZWW (zawartość powietrza w mieszance <2%) zależny od średnicy i czasu rozpływu.



Rys. 14. Obszar samozagęszczalności mieszanki BWW na podstawie wielkości rozpływu zaprawy.

Jednym z głównych czynników technologicznych jest temperatura. Ciekawym zagadnieniem do kontynuacji niniejszej pracy jest wpływ wysokich i niskich temperatur na samozagęszczalność mieszanki dla BSZWW. Pozwoliłoby to na pokazanie wpływu badanych czynników na właściwości reologiczne i zawartość powietrza w układzie zmiennych temperatur.

BIBLIOGRAFIA

1) Aïtcin P.-C. 1998. High-Performance Concrete. E & FN SPON.
2) De Schutter G., i inni. 2008. Self compacting concrete. Dunbeath: Whittles Publishing.
3) Neville A.M. 2000. Właściwości betonu. Kraków. Polski Cement.
4) Szwabowski J. 2002. Reologia samozagęszczalnych mieszanek betonowych. IV Sympozjum Naukowo–Techniczne „Reologia w technologii betonu”.