

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE A STOPIEŃ SAMOODPOWIETRZENIA MIESZANKI SAMOZAGĘSZCZALNEJ BETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO

Jacek GOŁASZEWSKI, Aleksandra KOSTRZANOWSKA *

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Streszczenie: W referacie przedstawiono analizę istotności wpływu podstawowych czynników składu na zawartość powietrza w mieszance betonowej dla BSZWW oraz opracowano matematyczny model, ujmujący wpływ właściwości reologicznych na zawartość powietrza w mieszance betonowej dla BSZWW. Pomiar parametrów reologicznych wykonano za pomocą testu rozprywu. Zawartość uwięzionego powietrza w mieszance mierzono metodą ciśnieniową.

Słowa kluczowe: właściwości reologiczne mieszanki samozagęszczalnej, zawartość powietrza.

1. Wprowadzenie

Istotą betonu samozagęszczalnego są właściwości mieszanki betonowej. Zatem każdy beton którego mieszanka będzie samozagęszczalna, staje się betonem samozagęszczalnym. Konsekwencją tego jest rozszerzający się zakres zastosowań takich betonów, jak przykładowo: samozagęszczalny beton zwykły (BSZ), wysokowartościowy beton samozagęszczalny (BSZWW) i fibrobeton samozagęszczalny (FRBSZ). Badanie właściwości mieszanki opiera się na sprawdzaniu warunków samozagęszczalności, to jest: płynności, stabilności i samoodpowietrzenia (De Schutter i in., 2008; EFNARC 2005). Jednak w praktyce badanie mieszanki samozagęszczalnej odbywa się głównie ze względu na sprawdzanie warunku płynności, rzadziej warunku stabilności. W większości przypadków stabilność oceniana jest subiektywnie podczas produkcji mieszanki lub/oraz na podstawie pobieranych próbek stwardniałego betonu. Warunek samoodpowietrzenia jest kontrolowany rzadko. Zakłada się, że mieszanka która charakteryzuje się odpowiednią płynnością i zachowuje przy tym stabilność charakteryzuje się również odpowiednim stopniem zagęszczenia – małą zawartością powietrza.

W przypadku betonów zagęszczanych mechanicznie za mieszankę zagęszczoną uważa się taką, w której pozostało nie więcej niż 1,5-2% powietrza. Warunek taki powinien być również spełniony dla BSZWW. W publikacji Aitcin'a (1998) wykazano, że wzrost 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 ich składu charakteryzują się dużą nadwyżką wytrzymałości w stosunku do założonej, powyższy fakt może mieć nieco mniejsze znaczenie, to w przypadku BSZWW zapewnienie maksymalnego odpowietrzenia mieszanki jest warunkiem koniecznym ich uzyskania. Dlatego dla BSZWW należy sprawdzać warunek samoodpowietrzenia także z uwagi na wiążące się z nim osiągnięcie odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie.

W literaturze jest niewiele informacji dotyczących zawartości powietrza w mieszankach samozagęszczalnych (Skarendahl i Petersson, 1999; Wallevik i Nielsson, 2003; Yu i in., 2005; Khayat, 2010). Brakuje także systematycznych danych dotyczących zdolności matematycznych do samoodpowietrzenia mieszanek samozagęszczalnych w zależności od ich właściwości reologicznych.

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

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: aleksandra.kostrzanowska@polsl.pl

2. Metodyka badania

2.1. Koncepcja, czynniki zmienne w badaniach i plan badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań przedstawiono analizę istotności wpływu składu oraz opracowano matematyczny model, ujmujący wpływ właściwości reologicznych na zawartość powietrza mieszanki samozagęszczalnej dla BWW.

Właściwości reologiczne kształtowano poprzez zmiany składu mieszanki. W tabeli 1 przedstawiono poziomy czynników zmiennych i czynniki stałe dla badanych mieszanek. Poziomy tych czynników dobrano na podstawie analizy danych literaturowych (Skarendahl i Petersson, 1999; Wallewik i Nielsson, 2003; Yu i in., 2005; Khayat, 2010), w taki sposób, aby składy badanych mieszanek odpowiadały zakresem swojej zmienności typowym składom BSZWW stosowanym w praktyce.

Tab. 1. Poziomy czynników zmiennych i czynniki stałe w badaniach

Czynniki zmienne	Poziomy czynników zmiennych
Wskaźnik ϕ_{kz}	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, P.P.[%]	40,0; 42,5; 45,0
Czynniki stałe:	
Temperatura	$20 \pm 1^{\circ}\text{C}$
Sposób dodawania superplastyfikatora	wraz z wodą zarobową

Pomiar parametrów opisujących właściwości reologiczne oraz zawartości powietrza wykonywano po 20 i 60 min. od zakończenia mieszania składników.

W badaniach został zastosowany plan zdeterminowany selekcyjny wieloczynnikowy z punktami gwiazdnymi. Taki plan badań umożliwia przeprowadzenie analizy istotności wpływu czynników składu i czasu na zawartość powietrza w mieszance dla BSZWW oraz określenie regresyjnego modelu zależności wpływu właściwości reologicznych na zawartość powietrza w samozagęszczalnej mieszance BWW.

2.2. Właściwości składników

Tab. 2. Skład chemiczny składników

Składniki	Skład [%]								Powierzchnia właściwa [m^2/kg]
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	
CEM I 42,5R	21,6	64,4	4,5	2,2	1,25	0,4	3,1	0,91	383
Pył krzemionkowy	92,8	0,7	0,6	0,3	1,32	0,3	0,8	0,5	18000

Właściwości stosowanego w badaniach cementu i pyłu krzemionkowego przedstawiono w tabeli 2. W badaniach stosowano superplastyfikator na bazie polieteru o gęstości 1,07 g/cm³ i stężeniu 32,0%. Superplastyfikator dozowano wagowo zmieniając ilość wody zarobowej o wodę w nim zawartą. Jako kruszywo zastosowano piasek naturalny 0-2 mm oraz kruszyło łamane sjenitowe o uziarnieniu 2-16 mm.

Ilość cementu w mieszankach zmieniała się w zależności od stosunku w/s oraz od wskaźnika ϕ_{kz} w przedziale od 487 do 576 kg/m³, ilość pyłu krzemionkowego w przedziale od 0 do 62 kg/m³, natomiast ilość kruszywa w przedziale od 920 do 1100 kg/m³.

2.3. Metoda badania

Właściwości reologiczne mieszanek oceniono testem rozplywu mieszanki (slump-flow test) według Fpr EN 12350-8:2009. W teście mierzono czas rozplywu do średnicy 50 cm (T_m [s]) oraz wartość maksymalnej średnicy rozplywu (D_m [cm]). Test dostarczał również pewnych informacji dotyczących ewentualnej segregacji, którą oceniano wizualnie.

Pomiar zawartości powietrza wykonano metodą ciśnieniową zgodnie z PN-EN 12350-7:2001 *Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe*.

Czas mieszania wynosił 5 minut. Najpierw przez 1 minutę mieszano suche składniki, a następnie dodawano wodę wraz z superplastyfikatorem. Pomiędzy pomiarami mieszankę przechowywano w mieszalniku pod przykryciem. Przed drugim pomiarem mieszankę mieszano przez 3 minuty.

3. Analiza istotności wpływu wybranych czynników składu na zawartość powietrza

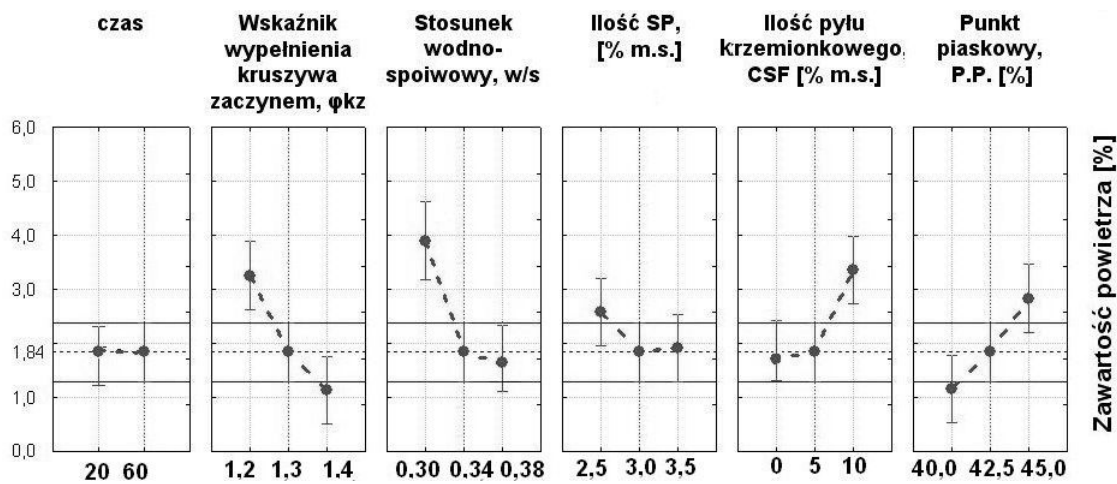
W oparciu o analizę wariancyjną dla układów czynnikowych (ANOVA) wyników badań określono istotność wpływu badanych czynników składu oraz wpływu czasu na zawartość powietrza w mieszance betonowej BWW.

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej istotności wpływu poszczególnych czynników przedstawiono w tabeli 3. Kierunki wpływu czynników materiałowych oraz czasu na zawartość powietrza uwięzionego w mieszance pokazano na rysunku 1.

Analizę wariancyjną wykonano na poziomie istotności równym 0,05 i o przedziale ufności równym 0,95.

Tab. 3. Analiza wariancji wpływu czynników składu na zawartość powietrza w mieszance

Źródło wariancji	Zawartość powietrza [%]	
	Wartość F	Poziom istotności α
Wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem, φ_{kz}	29,686	0,000000
Stosunek wodno-spoiwowy, w/s	19,172	0,000001
Ilość pyłu krzemionkowego, CSF [% m.s.]	15,861	0,000008
Punkt piaskowy, P.P.	7,044	0,002395
Ilość superplastyfikatora, SP [% m.s.]	4,339	0,019696
Czas	3,256	0,056324



Rys. 1. Profile wartości aproksymowanych zawartości powietrza uwięzionego w mieszance dla BSZWW

Analiza istotności wpływu wykazuje, że spośród badanych czynników największy wpływ na zawartość pozostającego w mieszance betonowej powietrza ma wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem cementowym φ_{kz} , a następnie kolejno: stosunek w/s, zawartość pyłu krzemionkowego, wielkość punktu piaskowego oraz upływ czasu. Stwierdzono przy tym, że wpływ ilości superplastyfikatora na zawartość powietrza w mieszance w badanym zakresie zmienności nie jest istotny statystycznie.

Przyjęty zakres zmienności ilości SP (od 2,5 do 3,5% m.s.) dozowanego w badaniach pozwalał na odpowiednie upłynnienie mieszanek nawet o najniższych wskaźnikach w/s = 0,30, jednak nie powodował istotnej różnicy w zawartości uwięzionego powietrza w mieszankach. Prawdopodobnie nie istotny statystycznie wpływ superplastyfikatora był spowodowany dużą ilością SP stosowaną w badaniach, oscylującą w granicach punktu nasycenia (ang. *saturation point*). Punkt nasycenia to osiągnięcie przez mieszankę pewnego minimum granicy płynięcia (średnicy rozplwy), po osiągnięciu którego dalsze zwiększenie dodatku SP nie powoduje znaczących zmian granicy płynięcia mieszanki betonowej. Użyty w badaniach rodzaj SP w sposób bardzo dobry upłynniał mieszankę, nie powodując niepożądanego napowietrzenia, o którym mowa w (Szwabowski i Łazniewska-Piekarczyk, 2008).

Skład BSZWW był dobierany tak, aby wpływ czasu nie był znaczący dla zmiany właściwości reologicznych.

Analiza wariancji badań czynnikowych istotności wpływu: stosunku w/s, wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz} , punktu piaskowego, ilości pyłu krzemionkowego, ilości superplastyfikatora oraz wpływu czasu na zawartość powietrza uwięzionego w mieszance pokazała taką samą hierarchię wpływu tych czynników, jak w przypadku wpływu na średnicę rozplwy mieszanki dla BSZWW.

Mieszanka ma większą zdolność do samoodpowietrzenia przy wzroście stosunku w/s i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz} oraz przy zmniejszeniu punktu piaskowego P.P. i ilości pyłu krzemionkowego. Czynniki zmienne w badaniach powodujące zwiększenie średnicy rozplwy i zmniejszenie czasu rozplwy powodują tym samym zmniejszenie ilości powietrza w mieszance.

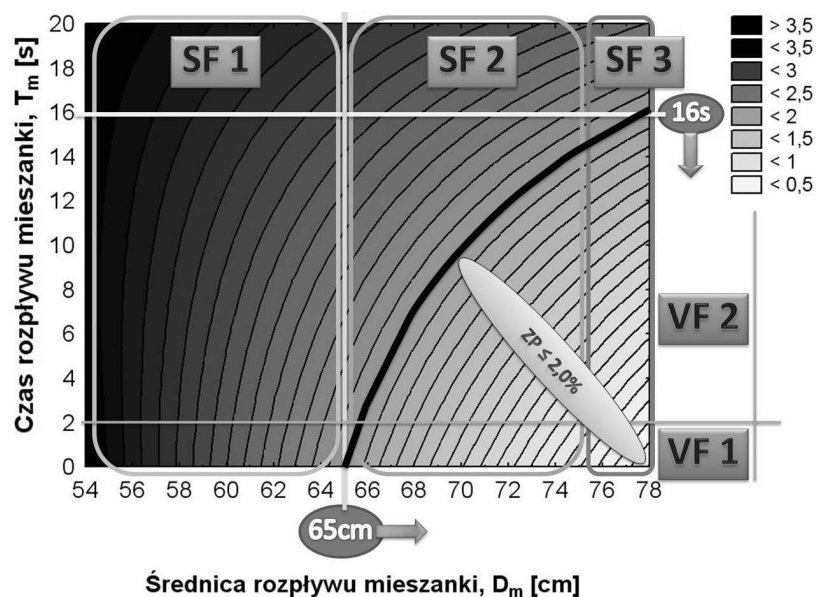
4. Model statystyczny wpływu właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki BWW na ilość uwięzionego w niej powietrza

Model opisujący zależność zawartości powietrza uwięzionego w mieszance od właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki BWW można sformułować w postaci wielomianu drugiego stopnia – równanie 1. Stałe regresji i współczynnik korelacji przedstawiono w tabeli 4.

Zależność dla uzyskanych wyników badań przedstawiono na wykresie warstwicowym na rysunku 2.

Tab. 4. Stałe regresji i współczynnik korelacji dla funkcji regresji opisującej zawartość powietrza w mieszance

Stałe regresji równania	C	A	B	AB	AA	BB	R
Zawartości powietrza zależne od D_m i T_m	10,67	-0,13	-0,27	0,0048	-0,00009	0,0007	0,90

Rys. 2. Wykres warstwiczny zależności zawartości powietrza od D_m i T_m

$$ZP(D_m, T_m) = C + A \cdot D_m + B \cdot T_m + AB \cdot D_m \cdot T_m + AA \cdot D_m^2 + BB \cdot T_m^2 \quad (1)$$

gdzie: ZP jest zawartością powietrza uwięzionego w mieszance, D_m jest średnicą rozplywu mieszanki w cm, T_m jest czasem rozplywu mieszanki w s, zaś C , A , B , AB , AA , BB są to stałe regresji zależne od właściwości składników.

Wraz ze wzrostem średnicy rozplywu mieszanki i zmniejszaniem czasu rozplywu mieszanki zmniejsza się ilość powietrza w mieszance.

Zakres zawartości pozostającego powietrza w badanych mieszankach samozagęszczalnych zawiera się w przedziale od 1,1% do 4,6% (pomiar po 20 minutach od zmieszania składników) oraz od 1,1% do 4,9% (pomiar po 60 minutach od zmieszania składników). Mieszanki, których zawartość powietrza wynosiła 2,0% lub mniej charakteryzują się średnicą rozplywu nie mniejszą niż 65 cm (granica płynięcia g nie większa niż 250 Nmm – mierzona reometrem BT2) oraz czasem rozplywu nie większym niż 16 s (lepkość plastyczna h nie większa niż 14000 Nmm – mierzona reometrem BT2).

5. Podsumowanie i wnioski

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.

W rozdziale sformułowano model opisujący zależność regresyjną wpływu parametrów reologicznych mieszanki samozagęszczalnej (średnicy i czasu rozplywu) na zawartość pozostającego w niej powietrza.

Zawartość powietrza w mieszance obliczona na podstawie równania i zmierzona doświadczalnie została zweryfikowana w badaniach kontrolnych. Modele te charakteryzują się wysokimi estymatorami dopasowania i istotności. Szeroki zakres przestrzeni czynnikowej, w której została określona zależność regresyjna stanowi o możliwości i dużej użyteczności jej stosowania do przewidywania zawartości powietrza uwięzionego w mieszance samozagęszczalnej.

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

Ilość powietrza zmniejsza się przy wzroście stosunku w/s i wzroście 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 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

Literatura

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. Mieszanki w tym wypadku charakteryzują się zwykle długim czasem rozplywu (dużą lepkością plastyczną), nawet jeśli w wyniku stosowania dużej ilości superplastyfikatora ich granica płynięcia będzie mała.

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

Zawartość powietrza w badanych mieszankach samozagęszczalnych BWW zawiera się w przedziale od 1,1% do 4,6% (pomiar po 20 minutach od zmieszania składników) oraz od 1,1% do 4,9% (pomiar po 60 minutach od zmieszania składników) i znacząco w wielu przypadkach przekracza graniczną ilość 2% powietrza, dla której mieszankę uznaje się za zagęszczoną. Uzyskanie zawartości powietrza poniżej 2% w mieszance jest możliwe jeśli średnica rozplywu jest większa niż 65 cm – według testu rozplywu (granica płynięcia g jest mniejsza od 250 Nmm - według testu wykonywanego reometrem BT) i czas rozplywu jest mniejszy niż 16 s (lepkość plastyczna h mniejsza niż 14000 Nmms – mierzona reometrem BT2).

W związku z tym w przypadku BSZWW koniecznym jest przyjmowanie ostrzejszego kryterium samozagęszczalności (zwykle mieszankę uznaje się za samozagęszczalną jeśli średnica jej rozplywu wynosi więcej niż 55 cm (EFNARC 2005)).

Mieszanki samozagęszczalne BWW charakteryzujące się dużą lepkością i rozplywem poniżej 65 cm posiadają małą zdolność do samoodpowietrzenia.

- Aitcin P. C. (1998). High-Performance Concrete. *E & FN SPON*, London and New York.
- De Schutter G., Bartos P.J.M., Domone P., Gibbs J. (2008). Self compacting concrete. *Dunbeath: Whittles Publishing*.
- EFNARC (2005). The European Guidelines For Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use.
- Khayat K.H. (2010). Production and Placement of SCC. *International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete "Design"*, Montreal.
- Skarendahl Å., Petersson Ö. (1999). Self-Compacting Concrete W: Proc. of the *First International RILEM Symposium*, RILEM Proceedings 7, Stockholm.
- Szwabowski J., Łaźniewska-Piekarczyk B. (2008). Zwiększenie napowietrzenia mieszanki pod wpływem działania superplastyfikatorów karboksylowych. *CWB, R. XIII/LXXV*, No. 4.
- Wallevik O, Nielsson I. (2003). Self-Compacting Concrete. W: Proc. of the *Third International RILEM Symposium*, RILEM Proceedings PRO 33, Reykjavik.
- Yu Z., Shi C., Khayat K.H., Xie Y. (2005). 1st International symposium on design, performance and use of self-consolidating concrete, RILEM Proceedings PRO 42, Changsa.

RHEOLOGICAL PROPERTIES AND A CONTENT OF AIR ENTRAINMENT IN FRESH CONCRETE FOR SELF COMPACTING HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Abstract: The significance analysis of the fundamental composition factors on the air entrained in fresh concrete for HPSCC as well as a mathematical model influences the rheological properties of fresh concrete on the air entrained in fresh concrete for HPSCC are presented and discussed in the paper. Rheological parameters are measured using technical test (slump-flow test). Air entrained in fresh concrete is measured by concrete air entrainment tests.