

*Agnieszka Ślosarczyk
Tomasz Adamczuk
Mikołaj Wojtkowiak
Tomasz Kania
Arkadiusz Kasperkowiak*

Kształtowanie wybranych właściwości fizykomechanicznych betonów samozagęszczalnych z dużą ilością popiołów lotnych

SHAPING THE SELECTED PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF SELF-COMPACTING CONCRETES WITH THE HIGH AMOUNTS OF FLY
ASHES

Streszczenie

Celem niniejszych badań było zaprojektowanie i wykonanie betonów SCC z wykorzystaniem cementu żuźlowego CEM III A 42,5. Dodatkowo zastosowano dwa rodzaje popiołów lotnych, które w mieszance betonowej z jednej strony miały pełnić rolę frakcji pylastych, a z drugiej zastępować część cementu w spoiwie. Wykonano 6 mieszanek betonowych o stałej ilości spoiwa 500 kg/m^3 o następujących składach: SCC250 (250 kg cementu plus 250 popiołu lotnego), SCC275 (275/225), SCC300 (300/200), SCC326 (325/175), SCC350 (350/150), SCC375 (375/125). W celu określenia parametrów betonu SCC wykonano następujące badania, dla mieszanki betonowej: płynność metodą Slump-flow po 5 i 60 min., lepkość metodą V-funnel po 5 i 60 min. oraz stopień napowietrzenia, dla betonu natomiast sprawdzono wytrzymałość na ściskanie po 7, 28 i 56 dniach. Badania wykazały, że duże ilości popiołów wpływają pozytywnie na parametry reologiczne mieszanki betonowej, we wszystkich przypadkach uzyskano rozplływ betonu w granicach 750-850 cm bez segregacji. Mankamentem stosowania tak dużych ilości popiołów jest znaczne obniżenie wytrzymałości na ściskanie w pierwszych dniach dojrzewania. Po 56 dniach twardnienia wszystkie zaprojektowane betony osiągnęły klasę wytrzymałości od C30/37 do C50/60 w zależności od rodzaju i ilości zastosowanych popiołów lotnych.

dr inż. Agnieszka Ślosarczyk – Politechnika Poznańska

mgr inż. Tomasz Adamczuk – BETOTECH, Poznań

mgr inż. Mikołaj Wojtkowiak – BETOTECH, Poznań

inż. Tomasz Kania – BETOTECH, Poznań

inż. Arkadiusz Kasperkowiak – BETOTECH, Poznań

Abstract

The aim of the following research was to design and make the self-compacting concretes SCC with the usage of blast furnace slag cement CEM III A 42,5. In addition, the two types of fly ashes were used in the concrete mixture, which played the role of dust fraction from the one side, and replaced part of the cement from the other. I was made six concrete mixtures with the constant amount of binder 500 kg/m^3 in the following composition: SCC250 (250 kg of cement and 250 of fly ash), SCC275 (275/225), SCC300 (300/200), SCC325 (325/175), SCC350 (350/150), SCC375 (375/125). In order to define the SCC concrete parameters, the following tests were performed, for the concrete mixture: fluidity by means of Slump-flow test after 5 and 60 minutes, viscosity by means of V-funnel test after 5 and 60 minutes, and aeration degree, while for concrete the compressive strength after 7, 28 and 56 days of hardening was checked. The research proved that the high amounts of fly ashes influenced positively on the rheological parameters of concrete mixture, in all cases the concrete slump without segregation in the range of 750 to 850 mm was achieved. The main drawback of the usage of such amounts of fly ashes was the decrease of compressive strength in the first days of curing. After 56 days of hardening the all designed concretes achieved the strength class from C50/60 to C30/37 depends on the type and amount of fly ashes.

1. Wprowadzenie

Betony samozagęszczalne SCC to betony charakteryzujące się wysoką urabialnością i bardzo płynną konsystencją, o rozplywie od 500 do 800 mm. Mieszanka betonowa o takich cechach zagęszcza się i odpowietrza pod własnym ciężarem, co pozwala na szczelne wypełnienie form i deskowania bez konieczności wibrowania, nawet przy złożonych kształtach elementu i gęstym zbrojeniu [1-3]. Uzyskanie powyższej charakterystyki materiału wymaga właściwego zaprojektowania składu mieszanki betonowej, do wykonania której zaleca się stosowanie dużych zawartości cementu (350–450 kg/m³) i cząstek pylastych (400–600 kg/m³) oraz zwiększonego udziału kruszywa o frakcjach do 4 mm (40-50% wag.) [4, 5]. Specyficzne wymagania co do składu betonu SCC, szczególnie te dotyczące dużych ilości cementu, sprawiają, że wyprodukowanie tego rodzaju betonu jest procesem kosztownym. Celowym zatem wydaje się zastępowanie w mieszankach betonowych SCC cementów klinkierowych cementami z dodatkami i samymi dodatkami.

Celem niniejszych badań było zaprojektowanie i wykonanie betonów SCC z wykorzystaniem cementu CEM III A 42,5 i dużych ilości popiołów lotnych, o zbliżonych parametrach fizykochemicznych, pochodzących z różnych elektrocieplowni. Wykonano 6 mieszanek betonowych o stałej ilości spoiwa 500 kg/m³ o następujących składach: SCC250 (250 kg cementu plus 250 popiołu lotnego), SCC275 (275/225), SCC300 (300/200), SCC325 (325/175), SCC350 (350/150), SCC375 (375/125). W celu określenia parametrów betonu SCC wykonano następujące badania, dla mieszanki betonowej: płynność metodą Slump-flow po 5 i 60 min., lepkość metodą V-funnel po 5 i 60 min. oraz stopień napowietrzenia, dla betonu natomiast sprawdzono wytrzymałość na ściskanie po 7, 28 i 56 dniach.

2. Część doświadczalna

Jako spoiwo w mieszance betonowej SCC zastosowano cement hutniczy CEM III/A 42,5N-LH o zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego od 36 do 65%. Cement ten charakteryzuje się powierzchnią właściwą 4494 cm²/g i niskim ciepłem hydratacji poniżej 256 J/g. Parametry fizykochemiczne cementu przedstawiono w tabeli 1. Pozostałymi składnikami mieszanki były dwa rodzaje popiołów lotnych o zbliżonych parametrach fizykochemicznych (tabela 1) pochodzące z dwóch różnych elektrocieplowni w Polsce, piasek, żwir drobny o frakcjach 2/8, żwir gruby 8/16, woda oraz domieszka upłynniająca na bazie polikarboksylanów. We wszystkich mieszankach betonowych zastosowaną stałą ilość spoiwa 500 kg/m³ i wykonano 6 mieszanek SCC różniących się między sobą zawartością popiołu lotnego. Ilość wody i superplastyfikatora dobrano tak, aby uzyskać stałą konsystencję mieszanek betonowych. Składy poszczególnych mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Charakterystyka fizykochemiczna wyjściowych materiałów zastosowanych do wykonania mieszank SCC

Składniki	Materiał wyjściowy		
	CEM III/A 42.5N-LH	Popiół lotny EZ (Karolin)	Popiół lotny EPO (Opole)
SiO ₂	-	-	52,35% masy
Al ₂ O ₃	-	-	28,40% masy
Fe ₂ O ₃	-	-	5,81% masy
Suma SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	-	powyżej 70% masy	86,57% masy
CaO	-	poniżej 10% masy	3,59% masy
CaO _{wolne}	-	poniżej 1,5% masy	3,32% masy
SO ₃	2,22% masy	poniżej 3% masy	0,30% masy
MgO	-	-	2,61% masy
K ₂ O	-	-	
Na ₂ O	0,73% masy	poniżej 5% masy	0,84% masy
Straty prażenia L.O.I.	0,54% masy	poniżej 5% masy	1,66% masy
Miałkość	-	30 kg/m ³	35,2% masy
Gęstość	-	2100 kg/m ³	2140 kg/m ³
Wytrzymałość 28 dni, MPa	58,7	-	46,4 (przy zaprawie zawierającej 25% popiołu lotnego)
Wytrzymałość 90 dni, MPa	-	-	56,7 (przy zaprawie zawierającej 25% popiołu lotnego)
Wskaźnik aktywności pucolanowej po 28 dniach, %	-	powyżej 75	82,7
Wskaźnik aktywności pucolanowej po 90 dniach, %	-	powyżej 85	93,3

Tabela 2. Proporcje mieszank SCC

SCC 1 (250/250)	Ekozec-EZ	Opole-EPO
piasek 0/2, kg	644	644
żwir 2/8, kg	395	395
żwir 8/16, kg	553	553
CEM III/A 42,5N-HSR/NA, kg	250	250
popiół, kg	250	250
woda, kg	173	173
superplastyfikator,% m.c.	1,2	1,2

Tabela 2. Cd. Proporcje mieszanek SCC

SCC 1 (250/250)	Ekozec-EZ	Opole-EPO
zawartość powietrza t_{5min} , %	1,5	3,9
zawartość powietrza t_{60min} , %	1,6	3,6
SCC 2 (275/225)	Ekozec-EZ	Opole-EPO
piasek 0/2, kg	641	641
żwir 2/8, kg	393	393
żwir 8/16, kg	550	550
CEM III/A 42,5N-HSR/NA, kg	275	275
popiół, kg	225	225
woda, kg	182	179
superplastyfikator, % m.c.	1,1	1,1
zawartość powietrza t_{5min} , %	1,6	2,7
zawartość powietrza t_{60min} , %	1,6	2,3
SCC 3 (300/200)	Ekozec-EZ	Opole-EPO
piasek 0/2, kg	642	642
żwir 2/8, kg	394	394
żwir 8/16, kg	551	551
CEM III/A 42,5N-HSR/NA, kg	300	300
popiół, kg	200	200
woda, kg	180	180
superplastyfikator, % m.c.	1	1
zawartość powietrza t_{5min} , %	1,4	2,9
zawartość powietrza t_{60min} , %	1,3	2,6
SCC 4 (325/175)	Ekozec-EZ	Opole-EPO
piasek 0/2, kg	646	646
żwir 2/8, kg	396	396
żwir 8/16, kg	554	554
CEM III/A 42,5N-HSR/NA, kg	325	325
popiół, kg	175	175
woda, kg	180	180
superplastyfikator, % m.c.	0,9	0,9
zawartość powietrza t_{5min} , %	1,8	3,9
zawartość powietrza t_{60min} , %	2,2	3,5

SCC 5 (350/150)	Ekozec-EZ	Opole-EPO
piasek 0/2, kg	649	649
żwir 2/8, kg	398	398
żwir 8/16, kg	558	558
CEM III/A 42,5N-HSR/NA, kg	350	350
popiół, kg	150	150
woda, kg	180	180
superplastyfikator, % m.c.	0,8	0,8
zawartość powietrza t_{5min} , %	2	2,9
zawartość powietrza t_{60min} , %	2,3	2,2

SCC 6 (375/125)	Ekozec-EZ	Opole-EPO
piasek 0/2, kg	656	656
żwir 2/8, kg	403	403
żwir 8/16, kg	564	564
CEM III/A 42,5N-HSR/NA, kg	375	375
popiół, kg	125	125
woda, kg	176	176
superplastyfikator, % m.c.	0,8	0,8
zawartość powietrza t_{5min} , %	2,2	2
zawartość powietrza t_{60min} , %	2,6	1,7

W celu określenia parametrów mieszanki SCC przeprowadzono następujące badania:

- Slump-flow po 5 i 60 minutach według normy PN-EN 12350-8. Badanie to polegało na określeniu maksymalnego rozptyłu mieszanki SF i czasu potrzebnego do uzyskania rozptyłu o średnicy 500 mm w czasie 5 s T_{500} po 5 i 60 minutach. Zgodnie z wytycznymi normowymi metoda Slump-flow umożliwia klasyfikację płynności (tabela 3) i lepkości betonów SCC (tabela 4).

Tabela 3. Klasy rozptyłu – Slump-flow

Klasa	Slump-flow SF, mm
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

- V-funnel test po 5 i 60 minutach według normy PN-EN 12350-9. Badanie to polega na określeniu lepkości i zdolności mieszanki samozagęszczalnej do wypełnienia przestrzeni w deskowaniu poprzez pomiar czasu wypływu mieszanki z aparatu w kształcie

litery V. Zgodnie z wytycznymi normowymi wyróżniamy następujące klasy lepkości betonów SCC:

Tabela 4. Klasy lepkości według T_{500} i V-funnel

Klasa	T_{500} , s	Klasa	V-funnel, czas wypływu t_v , s
VS1	<2	VF1	<9
VS2	≥ 2	VF2	9-25

- napowietrzenie świeżej mieszanki betonowej metodą ciśnieniową.

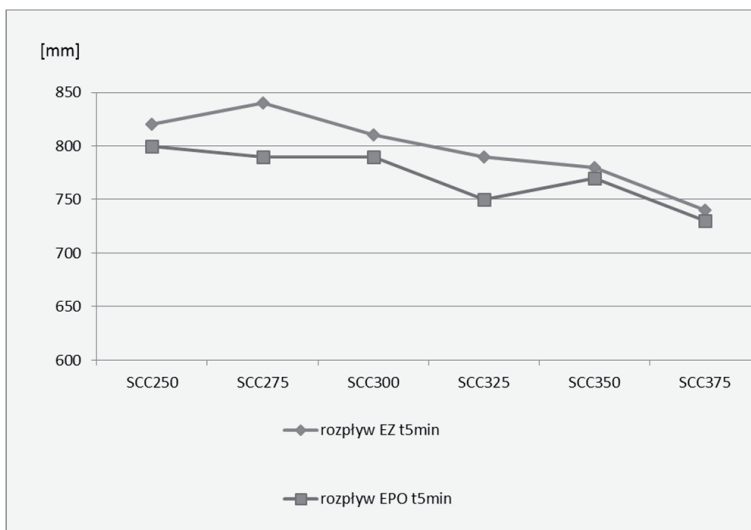
Dla betonu natomiast sprawdzono wytrzymałość na ściskanie po 7, 28 i 56 dniach twardnienia według procedury badawczej opisanej w normie PN-EN 12390.

3. Wyniki badań i dyskusja

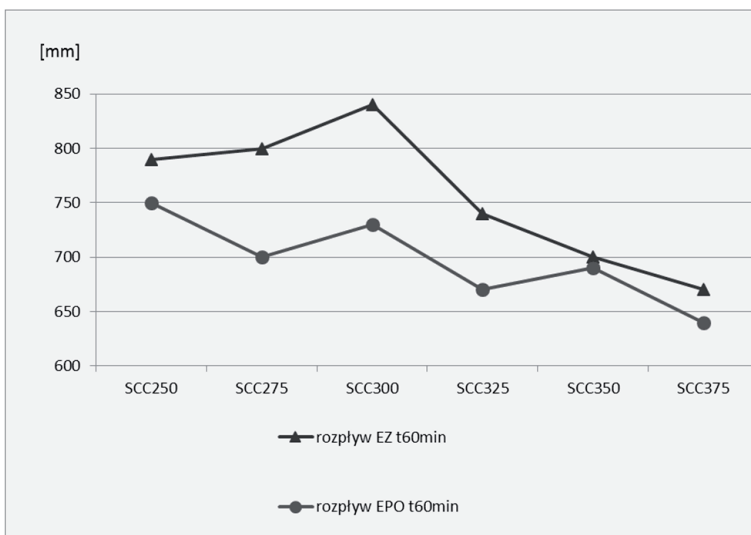
Wpływ popiołów lotnych na właściwości reologiczne (płynność i lepkość) betonów SCC mierzone średnicą rozptywu i czasem t_{500} po 5 i 60 minutach przedstawiono na rysunkach 1–4. Zarówno w przypadku popiołów z elektrociepłowni w Karolinie, jak i z Opola obserwowano pozytywny wpływ zastąpienia cementu dużą ilością popiołów na uzyskaną średnicę rozptywu mieszanki betonowej po 5 minutach. Dla receptur z popiołem z Karolina wraz ze wzrostem ilości popiołów od 125 do 250 kg przypadających na 1m^3 mieszanki uzyskano rozptywy w granicach od 750 do 850 mm, czyli odpowiadające klasie SF3. Nieco niższe wartości rozptywu w granicach od 730 do 800 mm uzyskano w przypadku popiołów pochodzących z Opola. Analogiczne badanie wykonane po 60 minutach wykazało znaczne różnice w działaniu obu popiołów, najlepsze parametry mieszanki uzyskano dla popiołu z Karolina w ilościach od 200 do 250 kg/m^3 , zmierzone średnice rozptywu mieściły się w granicach od 750 do 800 mm, czyli zachowały klasę SF3. Mieszanki z mniejszą ilością popiołu z Karolina oraz wszystkie mieszanki wykonane z popiołem z Opola charakteryzowały się znacznie mniejszą średnicą rozptywu od 640 do 750 mm, co odpowiadało klasie SF2.

Z kolei analiza lepkości mieszanek betonowych przedstawionych na rys. 3 i 4 wykazała, że coraz większe ilości popiołów lotnych powodowały skrócenie czasu rozptywu, przy czym znacznie krótsze czasy do uzyskania rozptywu o średnicy 500 mm uzyskano w przypadku mieszanek z popiołem z Opola. Zgodnie z zakresami normowymi, lepkość mieszanek z popiołem z Opola po 5 minutach odpowiadała klasie VS1, natomiast mieszanki z dodatkiem popiołu z Karolina charakteryzowały się wyższą lepkością i odpowiadały klasie VS2. Badanie przeprowadzone po godzinie, wykazało pogorszenie lepkości mieszanek wykonanych z dodatkiem obu popiołów, jedynie mieszanki oznaczone jako SCC275 i SCC300 z dodatkiem popiołu z Opola zachowały lepkość odpowiadającą klasie VS1. W pozostałych przypadkach wyznaczona lepkość odpowiadała klasie VS2.

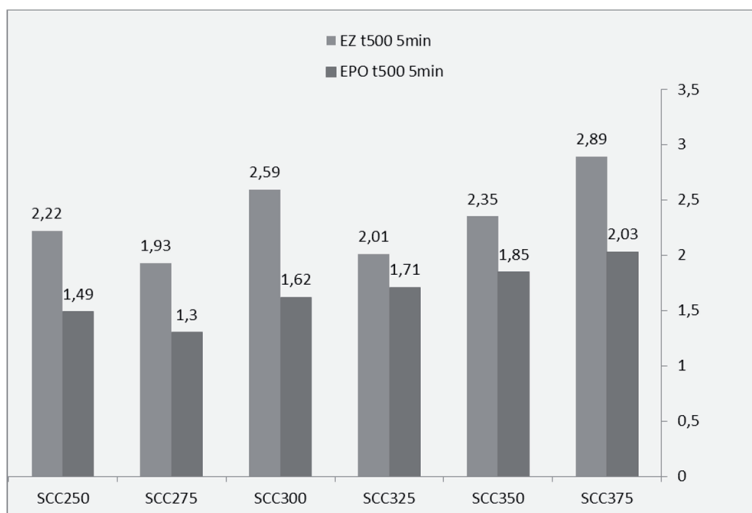
Wyniki lepkości zostały potwierdzone dodatkowym testem V-funnel, którego wyniki przedstawiono na wykresach 5 i 6. Również w tym przypadku mieszanki z popiołem z Opola charakteryzowały się niższą lepkością, co odpowiadało klasie VF1, natomiast wartości lepkości uzyskane dla mieszanek z popiołem z Karolina były wyższe i odpowiadały klasie VF2.



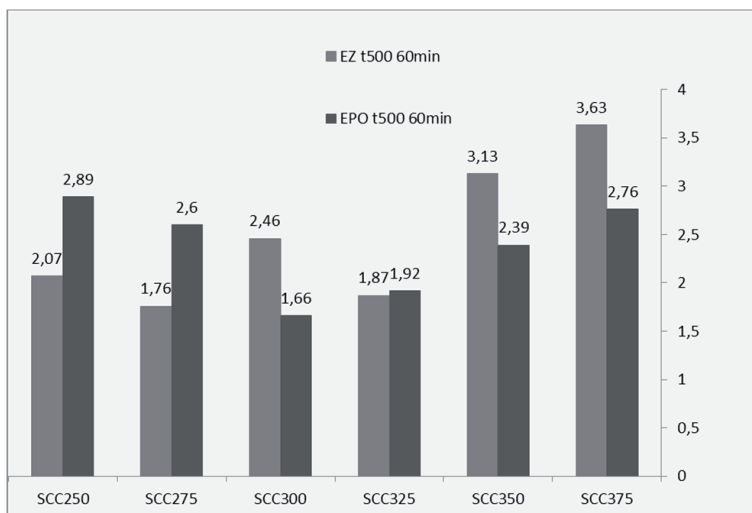
Rys. 1. Rozptył mieszanek SCC po 5 minutach w zależności od zastosowanego popiołu lotnego



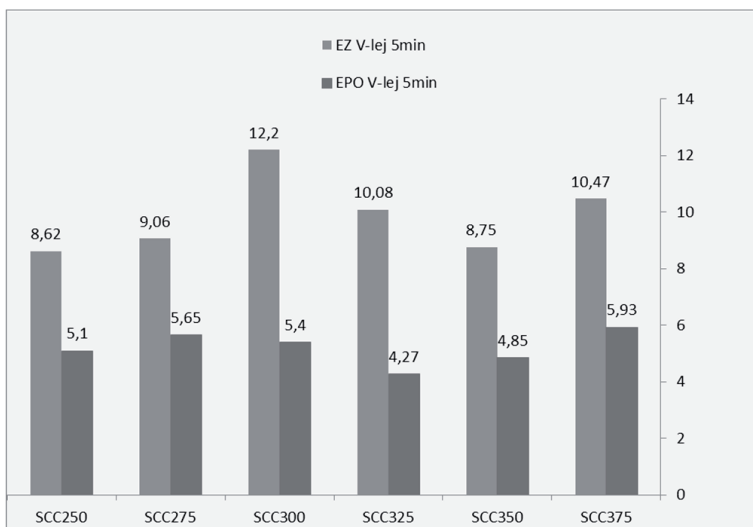
Rys. 2. Rozptył mieszanek SCC po 60 minutach w zależności od zastosowanego popiołu lotnego



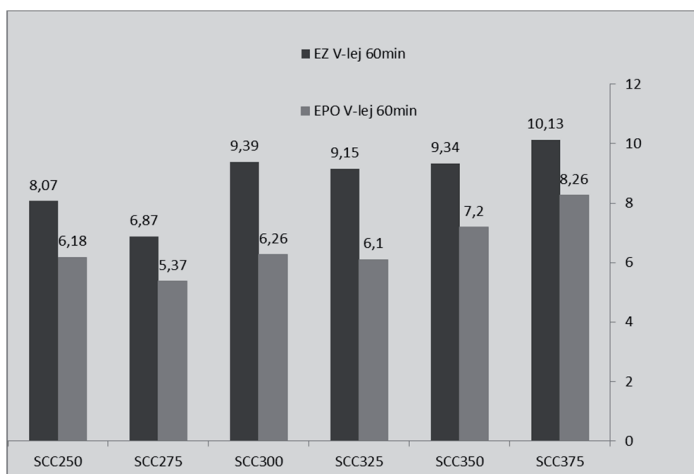
Rys. 3. Czas potrzebny do uzyskania rozplýwu o średnicy 500 mm dla mieszanek SCC po 5 minutach w zależności od zastosowanego popiołu lotnego



Rys. 4. Czas potrzebny do uzyskania rozplýwu o średnicy 500 mm dla mieszanek SCC po 60 minutach w zależności od zastosowanego popiołu lotnego



Rys. 5. Lepkość mieszanek SCC uzyskana metodą V-funnel po 5 minutach w zależności od zastosowanego popiołu lotnego



Rys. 6. Lepkość mieszanek SCC uzyskana metodą V-funnel po 60 minutach w zależności od zastosowanego popiołu lotnego

W tabeli 5 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie dla badanych betonów po 7, 28 i 56 dniach twardnienia. Analiza przedstawionych wyników po 7 dniach wskazuje na istotny wpływ ilości popiołów lotnych na wytrzymałość na ściskanie. Dla obu zastosowanych popiołów lotnych obserwowano tzw. efekt rozcieńczenia wraz ze zwiększającą się ilością popiołów w mieszance betonowej, wartości wytrzymałości na ściskanie malały od wartości 35 MPa (receptura SCC375) do wartości 21,5 MPa (receptura SCC 250) dla popiołu z Karolina, oraz od wartości 40,2 MPa do 21 MPa dla popiołu

z Opola [4]. Po 28 i 56 dniach twardnienia obserwowano podobną tendencję malejącą, ale ubytek wytrzymałości wynosił już tylko kilka procent. Po 56 dniach twardnienia uzyskano klasy wytrzymałości betonów od C50/60, dla receptury SCC375, niezależnie od zastosowanego popiołu lotnego do klasy C30/37, dla receptury z dodatkiem popiołu lotnego z Opola. Receptury SCC350 do SCC300 dla obu popiołów osiągnęły po 56 dniach twardnienia bardzo wysokie klasy wytrzymałości na ściskanie od C45/50 do C50/60. Uzyskanie w dłuższych okresach twardnienia znacznych przyrostów wytrzymałości jest związane zarówno z zastosowanym cementem żuźlowym charakteryzującym się wysokimi przyrostami wytrzymałości w dłuższych okresach czasu, jak i zachodzącą reakcją pucołanową pomiędzy wodorotlenkiem wapnia pochodzącym z hydratacji faz krzemianowych klinkieru cementowego i dodatkiem popiołów lotnych [5, 6].

Na szczególną uwagę zasługują receptura SCC 300 zawierająca 300 kg cementu i 200 kg popiołów lotnych. Badania reologiczne mieszanek betonowych wykazały dla tej receptury znaczny wzrost lepkości (badanie V-funnel), w porównaniu z pozostałymi recepturami, szczególnie dla popiołu z Karolina. Mimo to uzyskano wysokie rozplywy mieszanek w granicach 750–850 mm. Istotny wzrost lepkości może sugerować dobre wzajemne ułożenie się cząsteczek cementu i popiołu, co gwarantuje wysoki rozplyw i dobre zagęszczenie mieszanek betonowych oraz uzyskanie w dłuższych okresach czasu dobrych wytrzymałości na ściskanie, co jest bardzo istotne w uzyskaniu prawidłowych parametrów betonów samozagęszczalnych.

Tabela 5. Wytrzymałości na ściskanie uzyskane dla betonów SCC po 7, 28 i 56 dniach dojrzewania w zależności od składu i rodzaju zastosowanego popiołu lotnego

Wytrzymałość na ściskanie, MPa	SCC375 EZ	SCC350 EZ	SCC325 EZ	SCC300 EZ	SCC275 EZ	SCC250 EZ
7 dni	35	26,8	28	42,4	21,7	21,5
28 dni	63	54,9	52	56	48	44,3
56 dni	64	63,5	54	64,2	54	54,4
Klasa wytrzymałości	C50/60	C45/50	C45/50	C50/60	C45/50	C45/50
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	SCC375 EPO	SCC350 EPO	SCC325 EPO	SCC300 EPO	SCC275 EPO	SCC250 EPO
7 dni	40,2	32	26,2	32,3	27,4	21
28 dni	61	51	49,8	52,4	49,6	37,6
56 dni	64,2	62,5	58,9	63,5	51,2	41
Klasa wytrzymałości	C50/60	C45/50	C45/50	C45/50	C35/45	C30/37

4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że jest możliwość zaprojektowania i wykonania mieszanek betowych typu SCC z cementu żuźlowego i dużej zawartości popiołów lotnych o dobrych parametrach reologicznych i mechanicznych. Dodatek coraz większych ilości popiołów lotnych wpływał pozytywnie na płynność i lepkość mieszanki SCC, w

wszystkich recepturach, z wyjątkiem receptury SCC300/200, większe ilości popiołów powodowały wzrost płynności i spadek lepkości mieszanki betonowej, co przekładało się na wysokie średnice rozprywu w granicach od 750 do 850 mm. Mimo podobnych wyjściowych parametrów fizyko-chemicznych lepsze parametry reologiczne uzyskano w przypadku popiołu lotnego z Opola. Dla receptury SCC300/200, szczególnie dla popiołu z Karolina, uzyskano wysoką lepkość mieszanki SCC, przy zachowaniu dobrej płynności. To przełożyło się na bardzo dobre parametry wytrzymałościowe po 56 dniach twardnienia. Jedynie w przypadku tej receptury uzyskano tą samą klasę wytrzymałości C50/60 co w przypadku receptury z najmniejszą ilością popiołów lotnych SCC375/125. W pozostałych przypadkach coraz większe ilości popiołów lotnych w mieszance betonowej przekładały się na obniżenie wytrzymałości na ściskanie, szczególnie było to zauważalne w pierwszych dniach dojrzewania. W zależności od zastosowanej receptury po 56 dniach twardnienia uzyskano klasy wytrzymałości od C50/60 do C30/37. Pomimo podobnej charakterystyki fizyko-chemicznej zdecydowanie gorsze parametry mechaniczne, przy dużych ilościach popiołu lotnego, zaobserwowano dla popiołów lotnych z Opola. Może to być wynikiem wyższego napowietrzenia mieszanki betonowej.

Podsumowując, każdorazowo przy projektowaniu i wykonywaniu mieszanek betonowych typu SCC z dużą zawartością popiołów lotnych, należy zwrócić uwagę na rodzaj stosowanych popiołów. Niestety nie zawsze dobre parametry reologiczne mieszanki przekładają się na wysokie parametry mechaniczne betonu, co należy uwzględnić na etapie projektowania betonów SCC.

Literatura

- [1] J. Szwabowski, J. Gołaszewski, *Technologia betonu samozagęszczalnego*, Polski Cement, Kraków 2010.
- [2] T. Ponikiewicz, J. Gołaszewski, *Kształtowanie samozagęszczalności mieszanek betonowych na bazie cementów z dodatkiem popiołu lotnego*, Cement Wapno Beton 4/2012, 233–242.
- [3] I. Papayianni, E. Anastasiou, *Development of Self Compacting Concrete (SCC) by using High Volume of Calcareous Fly Ash*, World of Coal Ash Conference, Denver, USA, 2011.
- [4] M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, *Efficiency of mineral admixtures in mortars*, Cement and Concrete research, 36/2006, 264–277.
- [5] J. Bijen, *Blast Furnace Slag for Durable Marine Structures*. Cement. Stichting Beton Prisma, Hertogenbosh 1996.
- [6] A. Korpa, T. Kowald, R. Trettin, *Hydration behavior, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives*, Cement and Concrete Research, 38/2008, 955–962.