

# MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POPIOŁÓW LOTNYCH ZE SPALANIA W KOTŁACH FLUIDALNYCH DO BETONÓW UKŁADANYCH POD WODĄ

Piotr BRZOZOWSKI\*

Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin

**Streszczenie:** W pracy zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych właściwości mechanicznych betonów podwodnych, w których część cementu zastąpiono dodatkiem popiołów lotnych uzyskanych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych. Omówiono zależności między wytrzymałością na rozciąganie i na ściszenie badanych betonów oraz współczynnikiem efektywności badanych popiołów fluidalnych.

*Słowa kluczowe:* betony podwodne, popioły lotne z kotłów fluidalnych, zagospodarowanie odpadów.

## 1. Wprowadzenie

Popioły lotne jako uboczne produkty spalania (UPS) węgla są ważnym i cennym surowcem dla przemysłu materiałów budowlanych, zwłaszcza dla producentów cementu i betonu. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w obowiązujących normach, które precyzyjnie określają wymagania dla popiołu lotnego stosowanego jako dodatek do cementu (PN-EN 197-1:2002) lub betonu (PN-EN 450-1:2009). Właściwości fizyko-chemiczne popiołów lotnych, a tym samym możliwości ich wykorzystania w betonach cementowych zależą od wielu czynników, takich jak: typ spalnego surowca, rodzaj instalacji, w tym warunki spalania i prędkość schładzania czy technologia odsiarczania gazów. Oprócz typowych popiołów lotnych powstałych ze spalania pyłu z węgla kamiennego lub brunatnego w tzw. kotłach konwencjonalnych, powstają nowe rodzaje popiołów, które są mieszaniną produktów równoczesnego spalania węgla i procesu odsiarczania gazów (popioły połączone z produktami suchych metod odsiarczania spalin i popioły z kotłów fluidalnych). Popioły lotne z kotłów fluidalnych są mieszaniną produktów z odpopielania spalin i pozostałości sorbentu, co sprawia, że często zawierają wysokie ilości  $\text{SO}_3$ , CaO oraz mają wysokie straty prażenia (Bulewicz, 2010; Pacewska i in., 2008; Pacewska i in., 2010). Popioły z palenisk fluidalnych nie spełniają obowiązujących norm w zakresie dodatków mineralnych do cementu i betonu (Giergiczny, 2007; Jagosz i in., 2008). Z tego powodu UPS z kotłów fluidalnych są często traktowane jako odpad nieprzydatny do wykorzystania w tradycyjnych technologiach produkcji

cementów. Zgodnie z wymogami normy PN-EN 197-1 popioły fluidalne mogą być stosowane w ilości do 5% jako dodatek mineralny drugorzędny w produkcji cementu (Giergiczny i Giergiczny, 2010; Kabała i in., 2006) a jako dodatek do betonu popioły fluidalne stosowane są obecnie na podstawie aprobat technicznych. Z uwagi na rygorystyczne wymogi w zakresie emisji  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  i tlenków azotu wprowadzone przez Unię Europejską w ramach prac modernizacyjnych w polskich elektrowniach i elektrociepłowniach zakłada się coraz więcej instalacji spalania z kołami fluidalnymi (Piotrowski i Uliasz-Bocheńczyk, 2008), a tym samym spada ilość produkowanych przez polską energetykę konwencjonalnych popiołów lotnych. Zainteresowanie pozyskaniem popiołu fluidalnego do produkcji materiałów budowlanych, w tym jego wykorzystanie w kompozytach cementowych gwałtownie wzrosło. Kompleksowe badania nad przydatnością krajowych popiołów fluidalnych jako dodatku mineralnego do betonów cementowych prowadzone są w kilku ośrodkach naukowych w Polsce.

Prowadzone w Katedrze Konstrukcji Żelbetowych i Technologii Betonu, Wydziału Budownictwa i Architektury ZUT w Szczecinie badania nad możliwościami wykorzystania popiołów lotnych z kotłów fluidalnych jako dodatku mineralnego do betonów podwodnych dały interesujące wyniki, rokujące możliwości ich przyszłego wykorzystania w betonach konstrukcyjnych przy wykonywaniu fundamentów budowli śródładowych oraz elementów konstrukcji budowli podziemnych, betonowanych w środowisku wody gruntowej lub rzecznej.

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: pbrzozowski@zut.edu.pl

Nazwa beton podwodny (ang. *underwater concrete* – UWC) określa betony cementowe o specyficznych właściwościach mieszanki, układane w deskowaniu lub na istniejącej konstrukcji za pomocą pomp lub innych urządzeń bezpośrednio przez warstwę wody (stojącej bądź płynącej).

Badania prowadzono w dwóch kierunkach. Pierwszy to uzyskanie takiej konsystencji mieszanki betonowej modyfikowanej popiołem fluidalnym, by zapewnić wymaganą konsystencję do betonowania podwodnego, drugi kierunek obejmował badania podstawowych cech fizyko-mechanicznych stwardniałych betonów podwodnych z dodatkiem popiołów fluidalnych i ich rozwój w czasie. Pierwsze wyniki badań dotyczące głównie aspektów właściwości reologicznych mieszanek do betonów podwodnych modyfikowanych popiołami fluidalnymi opublikowano w pracy (Horszczaruk i Rudnicki, 2010).

Przedmiotem badań przedstawionych w artykule było określenie wpływu dodatku popiołu z paleniska fluidalnego na kształtowanie się podstawowych właściwości fizyko-mechanicznych betonów podwodnych i ich rozwój w czasie. Podjęto również próbę wyznaczenia współczynnika efektywności  $k$  dla zastosowanych w badaniach popiołów lotnych fluidalnych.

## 2. Program i zakres badań

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań opisanych w pracy (Horszczaruk i Rudnicki, 2010) ograniczono górny zakres zawartości procentowej popiołów fluidalnych do poziomu 30% masy cementu zawartego w betonie referencyjnym. Główne zagrożenie trwałości betonu wynikające z wprowadzenia popiołu fluidalnego do betonu cementowego związane jest z zawartością w jego składzie siarczanu wapnia w postaci anhydrytu. Norma PN-EN 197-1 reguluje zawartość  $SO_3$  w cemencie do poziomu maksymalnie 4% w zależności od klasy wytrzymałości cementu. Popioły fluidalne powstające w jednej instalacji cechuje duża zmienność zawartości  $SO_3$ . Dlatego w przypadku ich zastosowania do betonów cementowych wymagane jest każdorazowo potwierdzenie składu chemicznego. Zawartość  $SO_3$  w popiołach lotnych z palenisk fluidalnych może wahać się od 3 do nawet 20% (Bulewicz, 2010), w zależności od rodzaju instalacji i spalanego węgla. Również uzyskanie końcowej wytrzymałości na ściskanie po 28, 56 czy 90 dniach dla betonów podwodnych z zawartością 40%

i 50% popiołów fluidalnych na poziomie powyżej 80% wytrzymałości betonu niemodyfikowanego (referencyjnego) jest niemożliwe. W przypadku tak wysokiej zawartości popiołów fluidalnych w mieszankach obserwuje się znaczny spadek urabialności tych mieszanek w czasie. Jak wynika z badań (Horszczaruk i Rudnicki, 2010) mieszanki do betonów podwodnych z zawartością popiołów fluidalnych powyżej 30%, nawet przy zastosowaniu maksymalnej ilości superplastyfikatora, po godzinie od momentu zarobienia wykazywały znaczny spadek urabialności, który zgodnie z wymogami normy DIN 1045-2 uniemożliwiał ich zastosowanie do betonów podwodnych.

Mieszanki betonowe zaprojektowano tak, aby spełniały wymagania stawiane dla betonów zwykłych podwodnych przedstawione w pracy (Horszczaruk i Łukowski, 2009), tj. dla konsystencji oznaczanej metodą opadu stożka, opad stożka bezpośrednio po zarobieniu wynosił powyżej 180 mm, a po 60 min. od zarobienia wynosił co najmniej 125 mm, a rozptył mieszanki po zarobieniu wynosił co najmniej 400 mm. Wszystkie mieszanki wykonano z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku rzeczno-0/2 mm i kruszywa naturalnego żwirowego o maksymalnej średnicy ziaren 16 mm. Jako dodatek mineralny zastosowano popioły lotne z palenisk fluidalnych z Elektrowni Żerań w ilości 20% i 30% w stosunku do masy cementu mieszanki wzorcowej (M0). Wszystkie mieszanki charakteryzowały się stałą wartością wskaźnika  $w/s = 0,4$ . Skład chemiczny zastosowanych popiołów fluidalnych przedstawiono w tabelicy 1. We wszystkich mieszankach zastosowano domieszkę do betonów podwodnych w ilości  $4 \text{ kg/m}^3$  betonu ( $7,5 \text{ g/kg}$  cementu). Domieszkę upłynniającą dozowano tak, aby uzyskać mieszanki betonowe o wymaganej konsystencji i urabialności w czasie. Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tabelicy 2.

Badania mieszanek, przeprowadzone według obowiązujących norm i zaleceń (Horszczaruk i Łukowski, 2009), obejmowały następujące ich właściwości:

- konsystencję oznaczoną metodą opadu stożka po zakończeniu mieszania i po 60 minutach od
- zakończenia mieszania;
- czas przepływu mieszanek przez lejek V-funnel;
- ocena przepływu mieszanek przez zbrojenie metodą pierścienia J-ring;
- zawartość powietrza.

Wyniki badań właściwości mieszanek betonowych zamieszczono w tabelicy 2.

Tab. 1. Skład chemiczny popiołu fluidalnego

Straty prażenia	Zawartość składnika [% mas.]									
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$Na_2O$	$K_2O$	$SO_3$	$TiO_2$	$P_2O_5$
10,31	39,06	21,01	5,55	10,74	1,87	0,54	1,98	6,83	0,80	0,64

Tab. 2. Skład mieszanek betonowych i wyniki badań

Składniki mieszanki [kg/m <sup>3</sup> ]								
Mieszanka	cement	popioły fluidalne		woda	piasek 0/2 mm	zwir 2/16 mm	super- plastyfikator	domieszka AWA
		kg/m <sup>3</sup>	% m. cem.					
M0	530	—	0	212	593	1028	5,4	4,0
M20	424	106	20	212	593	1028	8,2	4,0
M30	371	159	30	212	593	1028	11	4,0

Wyniki badań mieszanek								
Mieszanka	Konsystencja				V-funnel	J-ring	Zawartość powietrza [% obj.]	
	opad [mm]		rozpływ [mm]					
	t = 0 min.	t = 60 min	t = 0 min.	t = 60 min	czas [s]	Rozpływ [mm]		B <sub>J</sub> [mm]
M0	230	145	450	370	5,3	315	32,7	2,0
M20	235	160	445	270	3,9	347	29,0	1,3
M30	270	170	600	365	7,3	600	15,2	1,4

Badania stwardniałych betonów podwodnych obejmowały następujące ich właściwości:

- rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie po 7, 14, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania w wodzie;
- rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie po 7, 14, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania w powietrzu;
- rozwój wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w czasie po 7, 14, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania w wodzie;
- odporność na ścieranie po 28 dniach (metoda mokra – tarcza Boehmego);
- gęstość pozorna po 28 dniach dojrzewania;
- nasiąkliwość wagowa po 28 dniach dojrzewania;
- głębokość penetracji wody (wodoszczelność) po 28 dniach dojrzewania.

Badanie wytrzymałości na ściskanie betonów podwodnych przeprowadzono dla próbek betonowych wykonanych i dojrzewających w dwóch różnych środowiskach: wodnym i w powietrzu. Próbkę betonową i dojrzewającą pod wodą wykonano w następujący sposób. Badanie wykonano zgodnie z procedurą podaną w pracy (Sonebi i Khayat, 2001). Na dnie pojemnika umieszczono formę stalową o wymiarach 30x50x15 cm. Pojemnik wypełniano wodą tak, aby poziom wody znajdował się co najmniej 20 cm powyżej górnego brzegu formy. Następnie podawano mieszankę betonową bezpośrednio nad zwierciadłem wody. Próbkę w kształcie płyty rozformowywano po dwóch dniach i przechowywano w wodzie do czasu badania. Bezpośrednio przed badaniem wytrzymałości płyta betonowa była cięta na kostki o boku 10 cm. Liczba kostek do badania w każdym przedziale czasowym wynosiła 6 szt. Uzyskane w wyniku badania wartości wytrzymałości na ściskanie przeliczono na wytrzymałość kostki o boku 15 cm. W analogiczny sposób przeprowadzono również badania wytrzymałości betonów podwodnych w środowisku wodnym na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Próbki dojrzewające w powietrzu formowano po wykonaniu mieszanki w formach sześciennych o boku 15 cm, bez zagęszczania. Po dwóch dniach przechowywania w pomieszczeniu o wilgotności 95% i temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  próbki rozformowywano i do czasu badania wytrzymałościowego przechowywano w tym pomieszczeniu.

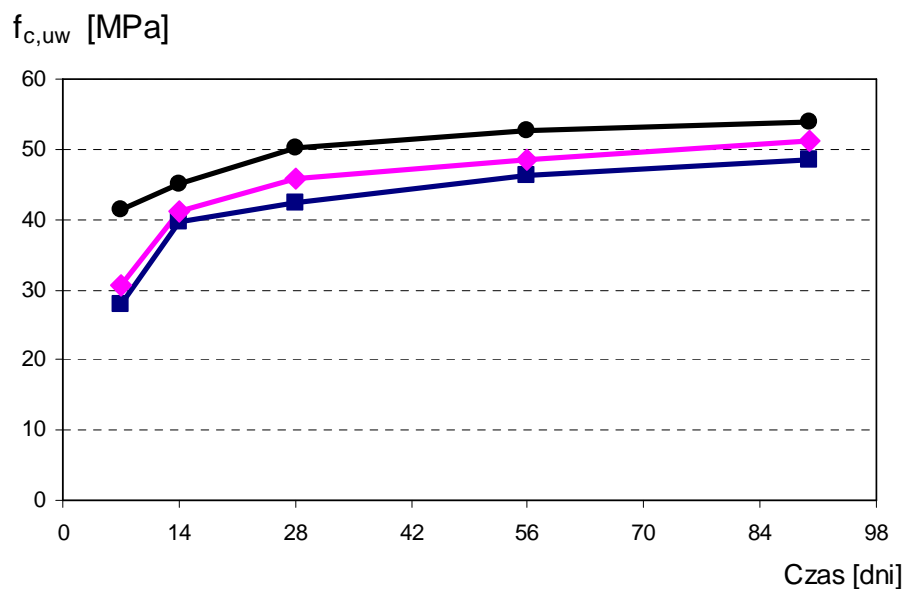
Próbki betonów do badań gęstości pozornej, nasiąkliwości i wodoszczelności formowano przez umieszczenie formy sześcienną o boku 15 cm na dnie pojemnika z wodą. Mieszankę układano w formach bez zagęszczania, przez warstwę 20 cm wody a po zaformowaniu górną powierzchnię wygładzano pacą stalową. Po dwóch dniach przechowywania w wodzie próbki rozformowywano i przechowywano w wannach w wodzie o temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

### 3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań próbek betonowych formowanych pod wodą i badanych po 28 dniach dojrzewania w wodzie przedstawiono w tablicy 3. Analizując rozwój wytrzymałości na ściskanie (rys. 1) i rozciąganie przy rozłupywaniu (rys. 2) badanych betonów stwierdzono, że niezależnie od wieku badanych betonów, betony z dodatkiem popiołów fluidalnych (M20 i M30) uzyskały każdorazowo niższe wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie niż beton referencyjny (M0). Porównując wyniki badań wytrzymałości na ściskanie uzyskane dla wszystkich badanych betonów podwodnych, w przypadku betonowania ciał próbnych w postaci płyty z wynikami badań dla kostek normowych o boku 15 cm betonowanymi przez warstwę wody (Horszczaruk i Rudnicki, 2010) stwierdzono wzrost wytrzymałości próbek pobranych z płyty po przeliczeniu na wytrzymałość kostkową o boku 15 cm w granicach 20% a nawet 30% w przypadku znacznej zawartości popiołów fluidalnych w betonie. W trakcie badań

Tab. 3. Wyniki badań stwardniałych betonów po 28 dniach dojrzewania w wodzie

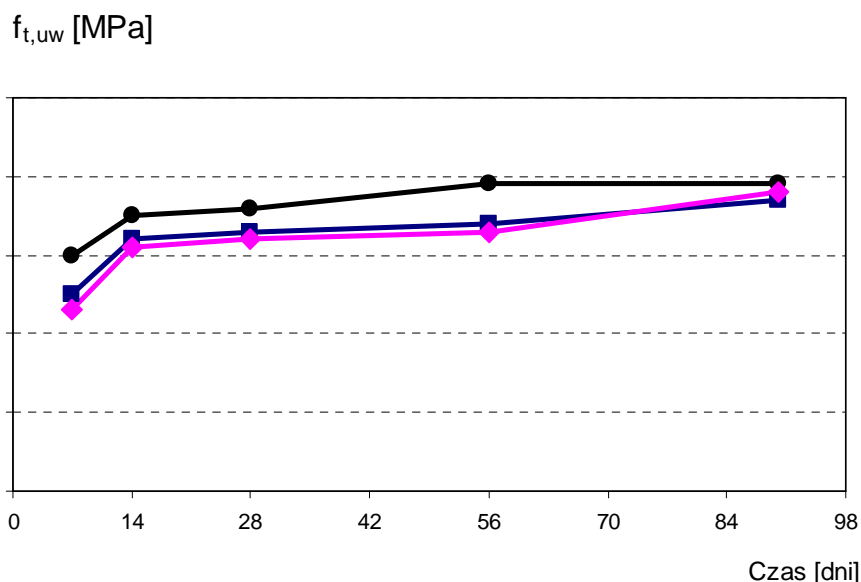
Beton	gęstość [kg/dm <sup>3</sup> ]	wytrzymałość [MPa]		ścieralność [mm]	nasiąkliwość [% masy]	głębokość penetracji wody [mm]
		na ściskanie $f_{c,uw}$	na rozciąganie $f_{t,uw}$			
M0	2354	50,2	3,6	4,7	1,6	27
M20	2359	42,4	3,3	4,8	1,3	22
M30	2367	45,8	3,2	4,3	0,9	19



Zawartość popiołów fluidalnych

● 0%    ■ 20%    ◆ 30%

Rys. 1. Rozwój wytrzymałości na ściskanie próbek formowanych i dojrzewających pod wodą



Zawartość popiołów fluidalnych

● 0%    ■ 20%    ◆ 30%

Rys. 2. Rozwój wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek betonowych formowanych i dojrzewających pod wodą

zaobserwowano, że powierzchnia próbek w kształcie kostek o boku 15 cm jest niejednorodna, pełna pustek powietrznych, co jest spowodowane znaczną lepkością mieszanek, która jest źle zagęszczona. Przy znacznej masie mieszanki i większej formie, mieszanka pod ciężarem własnym szczelniej wypełniała boki formy, co skutkuje lepszym jej zagęszczeniem, przy takich samych warunkach betonowania co przekłada się na wzrost wytrzymałości na ściskanie.

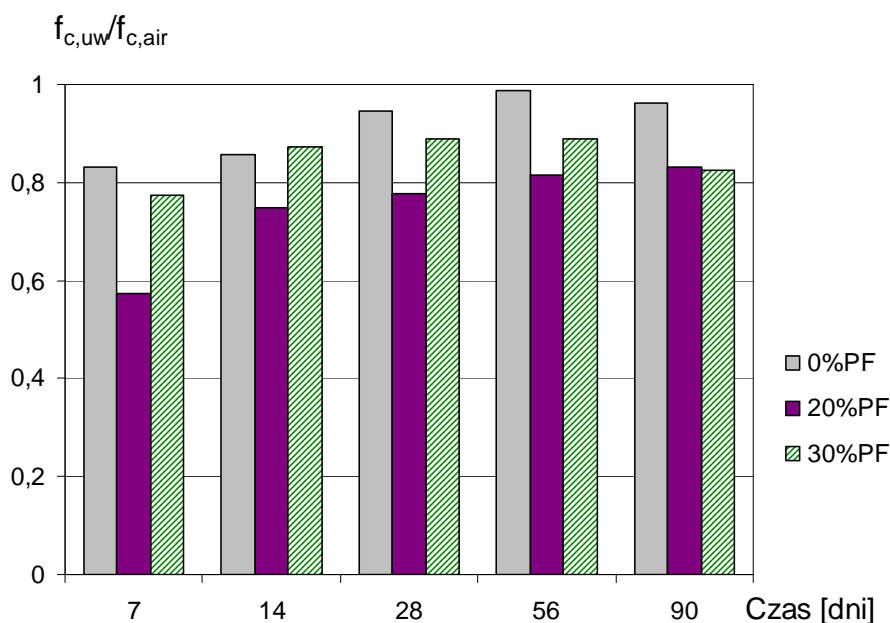
Wskaźnikiem służącym ocenie prawidłowego zaprojektowania betonów podwodnych z uwagi na wytrzymałość na ściskanie jest stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek betonowanych i dojrzewających pod wodą w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $f_{c,uw}$ ) do wytrzymałości na ściskanie próbek betonowanych i dojrzewających na powietrzu (warunki laboratoryjne – temperatura

$20 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotność 95% ( $f_{c,air}$ ) powinien wynosić minimum 0,8 (Horszczaruk i Łukowski, 2009).

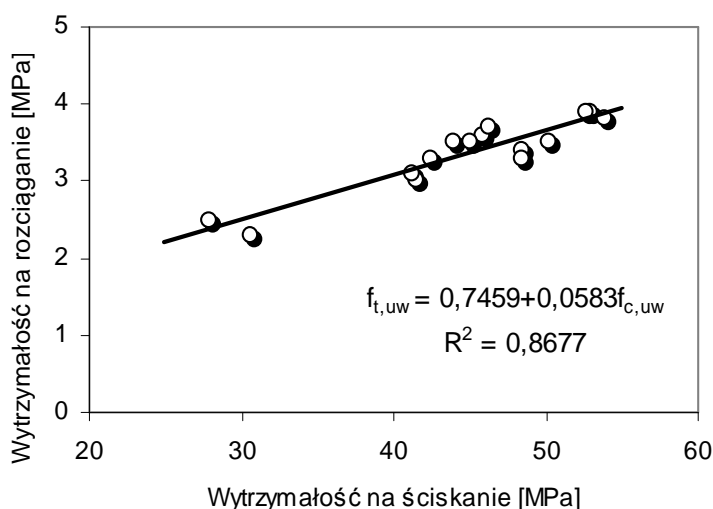
Na rysunku 3 pokazano zależność wskaźnika  $f_{c,uw}/f_{c,air}$  w funkcji czasu dojrzewania. Wartość wskaźnika  $f_{c,uw}/f_{c,air}$  powyżej 0,8 beton referencyjny (M0) osiągnął już po 7 dniach, beton z zawartością 30% popiołów fluidalnych (M20) po 14 dniach, a beton z 20% zawartością popiołów po 56 dniach.

Zależność między wytrzymałością na ściskanie  $f_{c,uw}$  i rozciąganie  $f_{t,uw}$  próbek betonowych formowanych i dojrzewających w wodzie opisać można poniższą zależnością liniową przedstawioną graficznie na rysunku 4:

$$f_{t,uw} = 0,7459 + 0,0583f_{c,uw} \quad (1)$$



Rys.3. Wartość wskaźnika  $f_{c,uw}/f_{c,air}$  w funkcji czasu dojrzewania i zawartości popiołów fluidalnych (PF)



Rys. 4. Zależność między wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu  $f_{t,uw}$  i wytrzymałością na ściskanie  $f_{c,uw}$  dla betonów formowanych i dojrzewających pod wodą

Z analizy wyników badań wytrzymałości nie wynika, aby czas dojrzewania i zawartość popiołu fluidalnego w spoiwie miały istotny wpływ na relacje między obydwoma rodzajami wytrzymałości.

Głębokość penetracji wody analizowanych betonów zawierała się w granicach od 19 do 27 mm i zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości popiołów fluidalnych w betonie. Różnice te są jednak nieznaczne, a wszystkie betony spełniają wymagania w zakresie elementów wykonanych z betonów zwykłych, dla których głębokość penetracji wody nie powinna przekraczać wartości 50 mm. Nasiąkliwość wagowa wszystkich badanych betonów również lokowała się znacznie poniżej wartości dopuszczalnych dla betonów zwykłych (nie więcej niż 5%) i malała wraz z zawartością popiołów fluidalnych w betonie (tab. 3). Wyniki badań ścieralności betonów po 28 dniach dojrzewania (badanie ścieralności na tarczy Boehmego tzw. metodą mokrą) nie dały zadowalających rezultatów. Ścieralność wszystkich grup betonów przekroczyła 4 mm, co w porównaniu z wymogami dla kostki brukowej czy płyt betonowych dwukrotnie przekracza wartości dopuszczalne. Badania należałoby powtórzyć dla betonów w wieku 56 i 90 dni z zastosowaniem metody suchej.

#### 4. Ocena współczynnika efektywności $k$ dla badanych popiołów fluidalnych

W celu określenia współczynnika efektywności  $k$  wykorzystano koncepcję podaną przez Atișa (2005), a wartość współczynnika  $k$  obliczono z zależności (2) dla różnych wartości czasu dojrzewania betonów  $t$ :

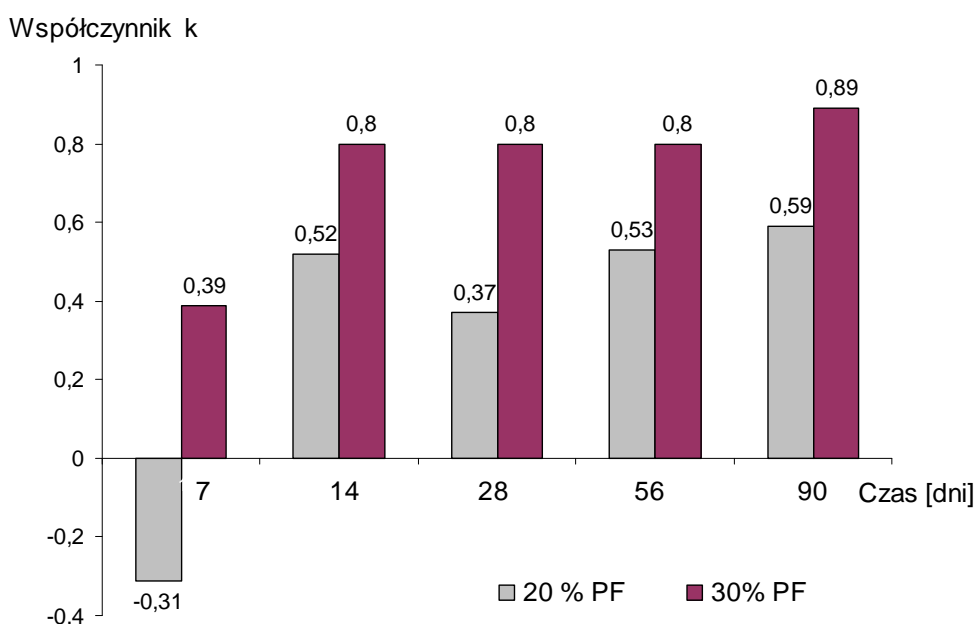
$$k_{(t)} = \frac{c}{p} \left( \frac{f_c(t)_p}{f_c(t)_c} - 1 \right) + 1 \quad (2)$$

gdzie  $f_c(t)_c$  jest wytrzymałością na ściskanie betonu wykonanego z samego cementu w MPa,  $f_c(t)_p$  to wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego z cementu i popiołów lotnych w MPa, a  $c$  i  $p$  to odpowiednio zawartości cementu i popiołu w betonie w  $\text{kg/m}^3$ . Obliczone wartości współczynnika  $k$  przedstawiono na rysunku 5.

Analizując otrzymane wartości współczynnika  $k$  można zauważyć, że jego wartość zależy od wartości wskaźnika  $c/p$ , a także od czasu dojrzewania betonu. Z badań Atișa (2005) wynika, że stabilizacja wartości współczynnika  $k$  występuje dopiero po około 100 dniach dojrzewania betonów, kiedy stabilizuje się wartość wytrzymałości na ściskanie. Uzyskane wyniki mają orientacyjny charakter z uwagi na wąski zakres badań i stanowią tylko propozycję rozwiązania problemu. Badania należałoby kontynuować uwzględniając zmianę wskaźnika  $w/s$  oraz dłuższy czas dojrzewania betonu, przykładowo 360 dni oraz szerszy zakres udziału popiołu fluidalnego w spoiwie.

#### 5. Podsumowanie

Projektowanie mieszanek do betonów podwodnych z dodatkiem popiołów fluidalnych powinno być prowadzone metodami doświadczalnymi. Przy ustalaniu ilości popiołów fluidalnych w mieszance należy uwzględnić ich skład chemiczny. W badaniach wytrzymałości na ściskanie, w przypadku nie zagęszczania mieszanek w czasie formowania ciał próbnych pod wodą zaleca się stosowanie ciał próbnych o znacznej objętości, które umożliwiłyby wycięcie próbek o wymiarach normowych po zakończeniu czasu dojrzewania. Poważną wadą betonów podwodnych z dodatkiem popiołów fluidalnych jest gwałtowny spadek



Rys. 5. Wartości współczynników  $k$  odpowiadające różnym czasom dojrzewania badanych betonów

urabialności mieszanek UWC w czasie. Jak wykazały badania Horszczaruk i Rudnickiego (2010), nawet przy maksymalnej ilości superplastyfikatora, po upływie godziny występują trudności w uzyskaniu wymaganej urabialności mieszanki. Przeprowadzone badania wskazują na możliwości zastosowania popiołów fluidalnych do betonów podwodnych jednakże opracowanie szczegółowych wytycznych ich stosowania wymaga przeprowadzenia wielu badań o szerokim zakresie.

### Literatura

- Atiř C.D. (2005). Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35, 1112-1121.
- Bulewicz E.M. (2010). Specyfika składu i właściwości popiołów z procesów fluidalnego spalania węgla. Konferencja „Popioły z Energetyki”, 21-24.10.2010 Zakopane, *Ekotech, Szczecin*, 27-35.
- Giergiczny E., Giergiczny Z. (2010). Kategoryzacja popiołów lotnych szansą na szersze stosowanie w budownictwie. Konferencja „Popioły z Energetyki”, 24-26.10.2010 Warszawa, *Ekotech, Szczecin* 2010, 163-175.
- Giergiczny Z. (2007). Dodatki do betonu w świetle wymagań normowych. *Materiały Budowlane*, 11/2007, 10-13.
- Horszczaruk E., Łukowski P. (2009). Betony podwodne – badania i dobór składu. *Inżynieria i Budownictwo*, 5/2009, 274-278.
- Horszczaruk E., Rudnicki T (2010). Możliwości wykorzystania fluidalnych popiołów lotnych jako zamiennik cementu w betonach podwodnych. Konferencja „Dni betonu. Tradycja i nowoczesność”, 11-13.10.2010 Wisła. *Polski Cement*. Kraków 2010, 197-206.
- Jagosz A., Małolepszy J., Śliwiński J., Tracz T. (2008) Wykorzystanie popiołów fluidalnych jako dodatku mineralnego do betonów. Konferencja „Dni Betonu”, 13-15.10.2008 Wisła, *Polski Cement*, Kraków 2008, 553-556.
- Kabała J., Brzozowski B., Roszczynialski W., Małolepszy J. (2006). Właściwości i zastosowanie ubocznych produktów spalania węgla w kotłach fluidalnych. Konferencja „Popioły z Energetyki”, Kraków 2006, *Ekotech, Szczecin* 2006, 121-142.
- Pacewska B., Blonkowski G., Wilińska I. (2008). Studies on the pozzolanic and hydraulic properties of fly ashes in model systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol. 94, 469-476.
- Pacewska B., Wilińska I., Kubissa W., Nowacka M. (2010). Popiół fluidalny – zalety i zagrożenia jego zastosowania w kompozytach cementowych. Konferencja „Popioły z Energetyki”, 24-26.10.2010 Warszawa, *Ekotech, Szczecin* 2010, 235-249.
- Piotrowski Z., Uliasz-Bocheńczyk A. (2008). Możliwości gospodarczego wykorzystania odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*. t. 24, 1-2/2008, 73-85.
- Sonebi M., Khayat K.H. (2001). Effect of mixture composition on relative strength of highly flowable underwater concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 3, 233-236.

### EXAMINATION OF FLY ASH FROM FLUIDIZED BED BOILERS IN UNDERWATER CONCRETE

**Abstract:** Laboratory test results of mechanical properties of underwater concretes were presented in the paper. In these concretes some part of cement was substituted by fluidal ashes from hard coal combustion. The relationships between the tensile and compressive strengths, and efficiency factor of fluidized bed ash were discussed.