

# Właściwości wytrzymałościowe betonów bazaltowych z dodatkiem Flubetu

Dr inż. Janusz Konkol, prof. dr hab. inż. Grzegorz Prokopski, Politechnika Rzeszowska

## 1. Wprowadzenie

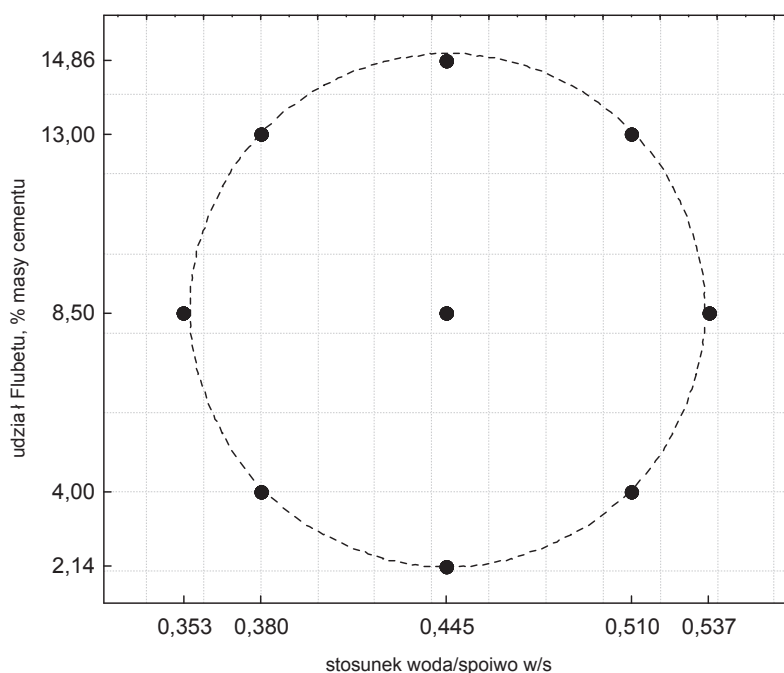
Beton należy do najczęściej używanych materiałów stosowanych w budownictwie. Przy dużych ilościach produkowanego betonu nie bez znaczenia jest jego trwałość, jak również koszt. Optymalizując projektowany beton zwraca się uwagę nie tylko na jego ostateczną wytrzymałość (na przykład na ściskanie), ale również na cenę, która często jest jednym z głównych czynników wyboru składu betonu. Wiadomo również, że najdroższymi składnikami betonu są cement oraz dodatki i domieszki. Utrzymanie odpowiednio niskiego stosunku wodno-cementowego jest warunkiem koniecznym w celu osiągnięcia założonej klasy betonu, a uzyskanie niskich wartości stosunku wodno-cementowego jest możliwe przez zastosowanie upłynniaczy. Ich rola w kształtowaniu urabialności, a jednocześnie końcowej szczelnej struktury betonu jest oczywista, a możliwości oszczędności, zmiany kosztu wyprodukowania betonu – niewielkie. Gwarancją otrzymania wysokiej klasy betonu jest również minimalna ilość cementu określana przez PN-EN 206-1. Najczęściej spotykanymi rozwiązaniami projektowania betonu są takie, które pozwalają na zastąpienie pewnej ilości cementu dodatkami mineralnymi. Do najczęściej stosowanych należą pyły krzemionkowe i popioły lotne. Cechą charakterystyczną obu tych dodatków jest większa, w stosunku do cementu, powierzchnia właściwa, co skutkuje uszczelnieniem struktury betonu, a także właściwo-

ści pucolanowe. Pył krzemionkowy jest produktem ubocznym otrzymywanym podczas wytwarzania krzemu metalicznego lub produkcji stopów żelazo-krzem. Popiół lotny to produkt uboczny otrzymywany podczas spalania pyłu węglowego. Wymagania odnośnie przydatności popiołu lotnego ustala się zgodnie z PN-EN 450, natomiast pyłu krzemionkowego zgodnie z PN-EN 13263. Oba te dodatki do betonu są dodatkami typu II, co określa PN-EN 206-1 i uwzględniane są w składzie betonu po stronie spoiwa. Przydatność tych dodatków określa się przez wprowadzenie współczynnika  $k$ , którego wartość definiuje PN-EN 206-1. Ilość dodatków tego typu uwzględniana po stronie cementu, jest ograni-

czona przez tę normę, a wartość współczynnika  $k$  z góry określona w zależności od  $w/c$  i/lub klasy ekspozycji.

Alternatywą dla powyżej wymienionych dodatków do betonu jest dodatek o nazwie handlowej Flubet®. Jest to produkt powstały przez mechaniczną aktywację popiołów lotnych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych metodą EMDC opatentowaną przez firmę Energomar-Nord. Aktywacja popiołów fluidalnych polega na rozbiciu cząstek popiołu oraz wywołaniu defektów strukturalnych na ich powierzchniach.

W badaniach udowodniono przydatność popiołów fluidalnych jako substytutu cementu [1-4] oraz prowadzono prace zmierzające



Rys. 1. Plan badań

**Tabela 1.** Skład mieszanki betonowej oraz zmienne w planie badań

Seria betonu	Zmienna		Skład mieszanki betonowej według przyjętego planu (kg)					
	w/s	udział Flubetu (%)	spoiwo	cement	Flubet	woda	piasek	bazalt
1	0,380	4,00	454	435,8	18,2	172,5	739,3	1212,5
2	0,380	13,00		395,0	59,0	172,5		
3	0,510	4,00		435,8	18,2	231,5		
4	0,510	13,00		395,0	59,0	231,5		
5	0,353	8,50		415,4	38,6	160,3		
6	0,537	8,50		415,4	38,6	243,8		
7	0,445	2,14		444,3	9,7	202,0		
8	0,445	14,86		386,5	67,5	202,0		
9	0,445	8,50		415,4	38,6	202,0		

**Tabela 2.** Skład mieszanki betonowej poszczególnych serii betonów na 1 m<sup>3</sup>

Seria betonu	Zmienna		Skład mieszanki betonowej na 1 m <sup>3</sup>					
	w/s	Udział Flubetu (%)	cement (kg)	Flubet (kg)	woda <sup>*)</sup> (kg)	piasek (kg)	bazalt (kg)	FM-6 (%) masy spoiwa
1	0,380	4,00	437,8	18,2	173,3	742,6	1218,0	1,19
2	0,380	13,00	395,6	59,1	172,8	740,4	1214,3	2,29
3	0,510	4,00	413,3	17,2	219,6	701,1	1149,8	0,50
4	0,510	13,00	373,5	55,8	218,9	699,1	1146,6	0,50
5	0,353	8,50	421,8	39,2	162,8	750,7	1231,2	2,74
6	0,537	8,50	388,9	36,1	228,2	692,1	1135,0	0,00
7	0,445	2,14	433,7	9,5	197,2	721,7	1183,6	0,54
8	0,445	14,86	375,8	65,6	196,4	718,7	1178,8	0,60
9	0,445	8,50	404,7	37,6	196,8	720,2	1181,2	0,39

<sup>\*)</sup> – ilość wody wraz z wodą superplastyfikatora

do podniesienia trwałości betonów z dodatkiem tych popiołów [5].

W niniejszym artykule, obok tradycyjnych badań wytrzymałościowych, autorzy zajęli się problemem do tej pory nie analizowanym w przypadku dodatku do betonu Flubetu, tj. badaniami odporności na pękanie betonów z tym dodatkiem. Prezentowane w artykule wyniki i analizy stanowią jedynie wybraną część pracy zmierzających do rozpoznania zjawiska pęknięcia betonów z dodatkiem Flubetu.

## 2. Plan i zakres badań oraz zastosowane materiały

W celu ustalenia wpływu dodatku Flubetu na właściwości mechaniczne betonów, a zwłaszcza na zmianę odporności ich na pękanie oraz w celu znalezienia zależności funkcyjnych tych zmian, opracowano plan badań oparty o plan kompozycyjny z 10 punktami badawczymi (rys. 1). Badania przeprowadzono dla pięciu pośrednich wartości wielkości

wejściowych wyznaczonych dla wartości unormowanych wynoszących: 0, ±1, ±1,414. Zmiennymi w planie badań był stosunek woda/spoiwo zmieniający się od 0,353 do 0,537 oraz udział Flubetu w stosunku do masy cementu w granicach od 2,14% do 14,86% (tab. 1). Przyjęto założenie stałości konsystencji mieszanki betonowej, którą korygowano dozowaną ilością superplastyfikatora FM-6.

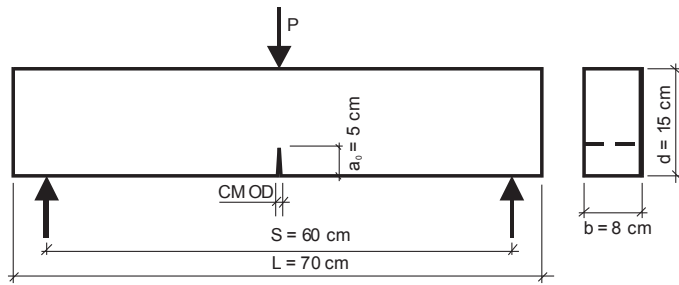
Zestawienie ilości składników na 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej z podaniem dozowanej ilości superplastyfikatora podano w tabeli 2.

Podstawą ustalenia zawartości składników mieszanki betonowej w przyjętym planie kompozycyjnym (tab. 1) była mieszanka podstawowa. Przyjęto następujące założenia: stosunek wodnocementowy w/c=0,4, konsystencja gęstoplastyczna, punkt piaskowy 38. Otrzymano następujący skład mieszanki podstawowej na 1 m<sup>3</sup>: 454 kg cementu, 181,6 l wody, 739,3 kg piasku, 1212,5 kg bazaltu.

Próbki wykonano z betonów na kruszywie łamanym bazaltowym frakcji do 16 mm z m. Wilków. Do wykonania betonów zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5R z cementowni Ożarów i piasek z m. Strzegocice.

## 3. Badania wytrzymałościowe i ich analiza

Dla każdego podstawowego układu planu badań wykonano po cztery próbki o wymiarach 8×15×70 cm do określenia odporności na pękanie według I modelu (rys. 2) oraz 5–8 kostek o krawędzi 10 cm do badań wytrzymałości na ściskanie. Zmienna liczba kostek do badań wytrzymałościowych wynikała z korekt przeprowadzanych w celu uzyskania zakładanej konsystencji mieszanki betonowej. Próbki pielęgnowano w warunkach powietrzno-wilgotnych (wilgotność względna powietrza >95%). Badania wytrzymałościowe wykonano po 28 dniach dojrzewania betonów. W bada-

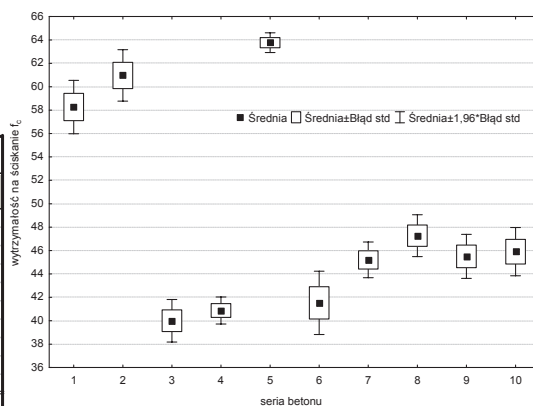


Rys. 2. Schemat próbki z karbem do badania odporności na pękanie

niach odporności na pękanie, zgodnie z [6] wyznaczono krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$ . W przypadku cech wytrzymałościowych określono miary położenia (wartość średnia) i rozproszenia (odchylenie standardowe i błąd standardowy). Wyniki uzyskane w badaniach wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  i krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  przedstawiono w postaci graficznej i tabeli na rysunkach 3 i 4.

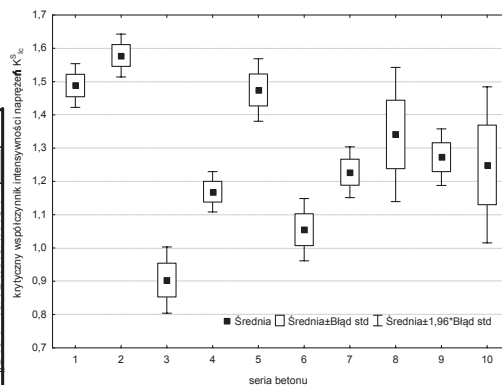
W analizach statystycznych założono poziom istotności wynoszący  $\alpha = 0,05$ . Statystyczną analizę wyników badań poprzedzono przeprowadzeniem analizy jakościowej oraz sprawdzeniem jednorodności wariancji. W przypadku obu cech wytrzymałościowych wykazano jednorodność wariancji oraz różnicę wartości średnich (komputerowy poziom istotności  $p \ll 0,05$ ), zatem wpływ wielkości wejściowych na badaną cechę betonu jest statystycznie istotny.

Tabela przekrojów statystyk opisowych				
seria	$f_c$	$f_c$	$f_c$	$f_c$
	Średnie	Ważnych	Odch. std.	Bł. std.
1	58,26609	8	3,290809	1,163477
2	60,96886	8	3,166851	1,119651
3	40,00273	6	2,274043	0,928374
4	40,87879	7	1,558174	0,588935
5	63,76856	8	1,218953	0,430965
6	41,52571	7	3,652867	1,380654
7	45,20080	8	2,200051	0,777835
8	47,27250	8	2,578891	0,911776
9	45,50257	7	2,544269	0,961643
10	45,90566	5	2,355281	1,053314
Ogół	49,56540	72	8,868700	1,045186



Rys. 3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie  $f_c$

Tabela przekrojów statystyk opisowych				
N=38				
seria	$K_{Ic}^S$	$K_{Ic}^S$	$K_{Ic}^S$	$K_{Ic}^S$
	Średnie	Ważnych	Odch. std.	Bł. std.
1	1,488197	4	0,067219	0,033610
2	1,578545	4	0,065730	0,032865
3	0,903706	4	0,101424	0,050712
4	1,169026	4	0,061972	0,030986
5	1,474868	4	0,095803	0,047902
6	1,055109	4	0,095438	0,047719
7	1,227700	4	0,077913	0,038956
8	1,341149	4	0,205773	0,102886
9	1,272874	4	0,086745	0,043373
10	1,249872	2	0,169026	0,119520
Ogół	1,277485	38	0,223460	0,036250



Rys. 4. Wyniki badań krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$

Na podstawie analizy wykresów Pareto (oceny efektów uzyskane przy pomocy procedury ANOVA) stwierdzono, że istotny wpływ na wyjaśnienie zmiany wytrzymałości na ściskanie mają liniowe efekty główne oraz efekty kwadratowe zmiennej woda/spoiwo (rys. 5). Istotny wpływ natomiast na wyjaśnienie zmiany krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  mają wyłącznie liniowe efekty główne (rys. 6).

Różnice między średnimi w układach planu w przypadku wytrzymałości na ściskanie wyjaśnia model pokazany na rysunku 7a. Jak widać wzrost stosunku woda/spoiwo powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, natomiast wzrost udziału dodatku Flubet zastępującego cement, powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie. Wzrost wytrzymałości na ściskanie spowodowany zmianą udziału Flubetu, choć jest istotny statystycznie, nie jest tak wyraźny, jak w przypadku zmiany wytrzymałości na ściskanie na skutek zmiany stosunku woda/spoiwo.

W przypadku krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  otrzymano prosty model addytywny dla dwóch wielkości: stosunek woda/spoiwo i udział Flubetu (rys. 7b). Spadek stosunku woda/spoiwo oraz wzrost udziału Flubetu powodują wzrost odporności na pękanie betonów (wzrost  $K_{Ic}^S$ ).

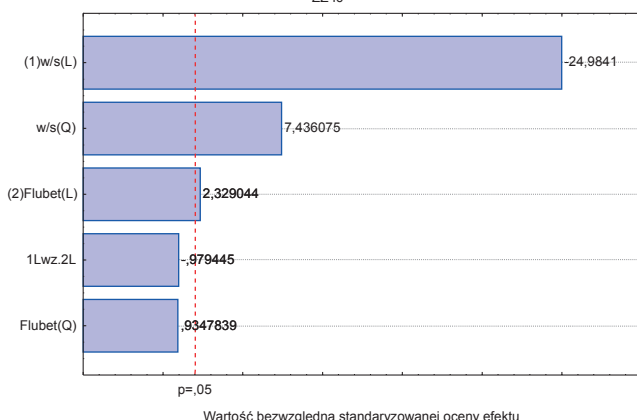
Uzyskane modele (rys. 7) są funkcjami adekwatnymi, a współczynniki równania (rys. 8) są istotne.

W celu określenia wpływu Flubetu jako ekwiwalentu cementu przeprowadzono również badania wytrzymałościowe betonu bez tego dodatku. Uzyskano dla wybranych punktów planu następujące wyniki:

- przy  $w/s = 0,353 f_c = 57,2$  MPa i  $K_{Ic}^S = 1,413$  MN/m<sup>3/2</sup>,
- przy  $w/s = 0,445 f_c = 42,5$  MPa i  $K_{Ic}^S = 1,175$  MN/m<sup>3/2</sup>,
- przy  $w/s = 0,537 f_c = 36,7$  MPa i  $K_{Ic}^S = 0,900$  MN/m<sup>3/2</sup>.

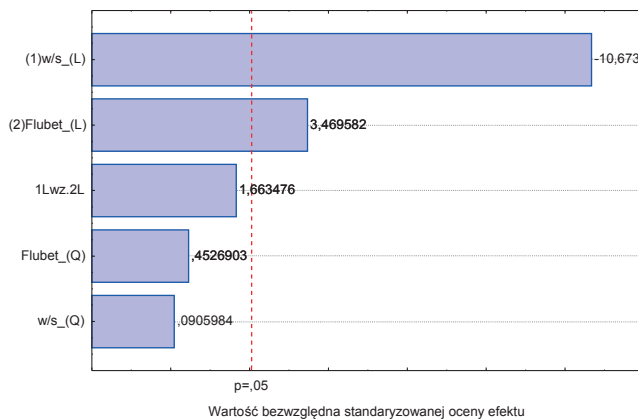
Porównując uzyskane wyniki stwierdzono we wszystkich przypadkach

Wykres Pareto efektów standardyzow.; Wielkość: fc  
2 wielk., 1 Bloki, 72 ukła; Resztowy MS = 7,126129  
ZZ fc



Wartość bezwzględna standaryzowanej oceny efektu

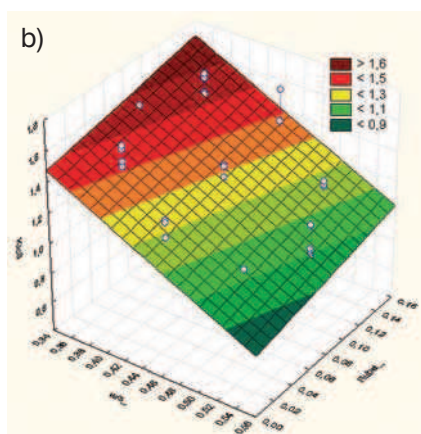
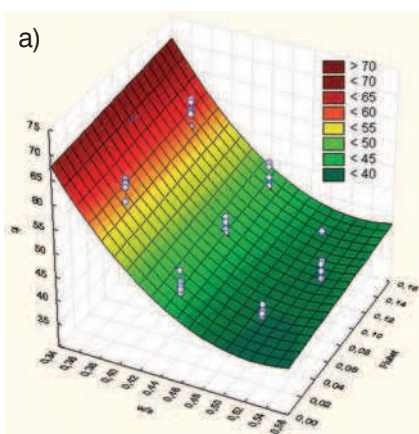
Wykres Pareto efektów standardyzow.; Wielkość: K<sub>lc</sub><sup>S</sup>  
2 wielk., 1 Bloki, 38 ukła; Czysty błąd MS=,0110636  
ZZ K<sub>lc</sub><sup>S</sup>



Wartość bezwzględna standaryzowanej oceny efektu

**Rys. 5.** Wykres Pareto w przypadku zmiennej zależnej: wytrzymałość na ściskanie  $f_c$

**Rys. 6.** Wykres Pareto w przypadku zmiennej zależnej: krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{lc}^S$



**Rys. 7.** Powierzchnia dopasowania: a) wytrzymałość na ściskanie  $f_c$  przy  $R^2 = 0,909$ , b) krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{lc}^S$  przy  $R^2 = 0,740$

wzrost wytrzymałości na ściskanie i odporności na pękanie betonów z dodatkiem Flubet.

Bazując na wartościach średnich obu cech betonów w punktach planu badań, przeprowadzono analizę korelacji między nimi. Otrzymany współczynnik korelacji liniowej  $r = 0,897$  jest statystycznie istotny (komputerowy poziom istotności  $p \ll \alpha$ ). Istnieje zatem związek między krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{lc}^S$  a wytrzymałością na ściskanie  $f_c$ .

#### 4. Podsumowanie

Niejednorodność betonu i defekty jego struktury są przyczyną niszczenia elementu betonowego przy mniejszych naprężeniach, niż wynikałoby to z jego wytrzyma-

łości. Przedstawione w artykule wyniki i analizy dowodzą istnienia istotnych statystycznie zależności między wprowadzonymi w planie badań zmiennymi a wytrzymałością na ściskanie i odpornością na pękanie betonów.

Potwierdzono korzystny wpływ dodatku Flubetu na wytrzymałość na ściskanie betonów. Otrzymano liniową zależność wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  od zmiany udziału

Flubetu oraz zależność drugiego stopnia wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  od zmiany stosunku woda/spoiwo (rys. 7a).

Stwierdzono również korzystny wpływ Flubetu na zmianę krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{lc}^S$ , którego wartość zmienia się liniowo w zależności zarówno od udziału Flubetu, jak również stosunku woda/spoiwo (rys. 7b).

Wpływ zmiany udziału Flubetu w porównaniu do wpływu zmiany stosunku woda/spoiwo na krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{lc}^S$  jest zdecydowanie większy niż obserwuje się to w przypadku wytrzymałości na ściskanie  $f_c$ . Potwierdza to dużą czułość  $K_{lc}^S$  na zmiany w strukturze betonów. W przypadku wytrzymałości na ściskanie wpływ zmiany udziału Flubetu był niewielki, co sugeruje nieznaczną zmianę struktury betonów na skutek tego dodatku wynikającą w głównej mierze ze zmiany stosunku woda/spoiwo. Badania

Wejśc.	Współ. regresji; $R^2 = ,91346$ ; Popr: ,9096 2 wielk., 1 Bloki, 72 ukła; Czysty błąd MS ZZ fc				Wejśc.	Współ. regresji; $R^2 = ,75423$ ; Popr: ,7401 2 wielk., 1 Bloki, 38 ukła; Czysty błąd MS ZZ K <sub>lc</sub> <sup>S</sup>			
	Regresji Wsp.	Błąd std. Czys. bł.	t(63)	p		Regresji Wsp.	Błąd std. Czys. bł.	t(29)	p
Średn./Stała	263,427	18,69271	14,09251	0,000000	Średn./Stała	2,51428	0,133152	18,8828	0,000000
(1)w/s(L)	-848,827	85,19681	-9,96314	0,000000	(1)w/s(L)	-3,05315	0,286062	-10,6730	0,000000
w/s(Q)	802,842	95,81378	8,37920	0,000000	(2)Flubet(L)	1,43364	0,413201	3,4696	0,001651
(2)Flubet(L)	18,322	7,33829	2,49678	0,015160					

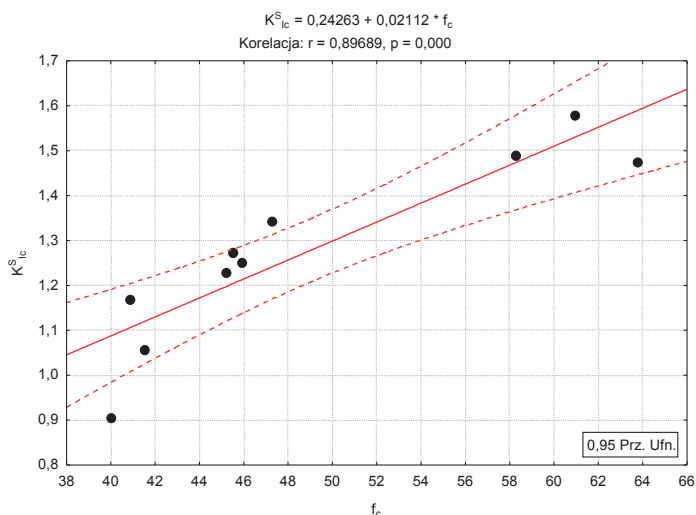
**Rys. 8.** Wartości współczynników modelu regresji: wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  po lewej, krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{lc}^S$  po prawej



odporności na pękanie wykazują natomiast zdecydowany i korzystny wpływ zwiększenia udziału Flubetu na kształtowanie struktury betonów, na skutek jej uszczelnienia i minimalizacji defektów.

Przeprowadzona analiza statystyczna wyników badań pozwoliła na znalezienie relacji między objętością badanymi cechami (rys. 9). Wzrostowi wytrzymałości na ściskanie betonów towarzyszy jednocześnie wzrost krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$ .

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011 jako projekt badawczy nr N N507 475337.



**Rys. 9.** Korelacja między wytrzymałością na ściskanie  $f_c$  a krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$

**BIBLIOGRAFIA**

[1] Glinicki M. A., Zastosowanie aktywowanego popiołu lotnego z kotłów o spalaniu fluidalnym Flubet® jako dodatku do betonu <http://www.lubanta.com.pl>  
 [2] Piotrowski Z., Uliasz-Bocheńczyk A., Możliwości gospodarczego wykorzystania odpadów z kotłów fluidalnych. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 12, 2008, 73–85

[3] Gawlicki M., Roszczynialski W., Uboczne produkty spalania z kotłów fluidalnych jako składnik cementów portlandzkich. Cement Wapno Beton, 5, 2003, 255–258  
 [4] Garbacik A., Skrzyczewski E., Ocena popiołów z kotłów fluidalnych jako dodatku mineralnego do cementu. IX Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”, Ustroń 8–11 października 2002, 233–250  
 [5] Glinicki M. A., Zieliński M.,

Rozmieszczenie porów powietrznych w betonie z dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego. Cement Wapno Beton, 3, 2007, 133–138  
 [6] Determination of fracture parameters (K<sub>SIc</sub> and CTOD<sub>c</sub>) of plain concrete using three-point bend test. RILEM Draft Recommendations, TC 89 – FMT Fracture Mechanics of Concrete Test Methods, Materials and Structures, 23, 1990

**Więcej zamówień? U nas możesz TANIO odpocząć!**

OŻYWIENIE GOSPODARCZE!  
 Optymistyczne prognozy w branży budowlanej  
 WZROST gospodarczy  
 OŻYWIENIE! budowlany notuje wzrost.

Noclegi pracownicze w Warszawie już od **30 zł/osobę\***

Do Państwa dyspozycji:

- Hostel Służewiec
- Hostel To-Tu
- Hotel Atos
- Hotel Aramis

Rezerwuj: ☎ (22) 20 76 550, [www.puhit.pl](http://www.puhit.pl)  
[zakwaterowanie@puhit.pl](mailto:zakwaterowanie@puhit.pl)

\*w zależności od standardu noclegu, liczby osób i długości pobytu