



JANUSZ KONKOL¹⁾
GRZEGORZ PROKOPSKI²⁾

THE OPTIMIZATION OF CONCRETES MODIFIED WITH FBC FLY ASH

OPTYMALIZACJA SKŁADU BETONÓW MODYFIKOWANYCH POPIOŁEM FLUIDALNYM

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji składu betonów modyfikowanych aktywowanym mechanicznie popiołem z kotłów o spalaniu fluidalnym. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników badań wykonanych według kompozycyjnego planu eksperymentu. Zawartość popiołu fluidalnego dodawanego jako częściowy zamiennik cementu, wynosiła od 2,1% do 14,9% masy spoiwa. Stosunek woda/spoiwo w mieszankach wynosił od 0,35 do 0,54. Kryteriami optymalizacji były: maksymalna wytrzymałość na ściskanie po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania betonów, maksymalna odporność na pękanie (maksymalna wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic}^S), maksymalny moduł sprężystości podłużnej po 28 i 180 dniach dojrzewania oraz minimalna porowatość stwardniałego betonu. Wykazano nieznaczny wpływ popiołu fluidalnego na wyniki optymalizacji oraz znaczny wpływ stosunku woda/spoiwo na te wyniki. Rozwiązania optymalne uzyskano w przypadku stosunku w/b poniżej 0,37.

SŁOWA KLUCZOWE: beton, optymalizacja, popiół fluidalny, stereologia, wiek betonu, właściwości mechaniczne.

ABSTRACT. This paper presents the results of optimization of composition of the concretes modified with mechanically activated fluidized bed combustion (FBC) fly ash. The analysis was performed according to the results of investigations based on the central composite design of experiment. The amount of FBC fly ash used as an equivalent of cement varied from 2.1% to 14.9% of the mass of binder. Water/binder ratios in the mixes were in the range of 0.35 to 0.54. The optimization criteria were: maximal compressive strength after 28, 90 and 180 days of concrete curing, maximal fracture toughness (maximal value of critical stress intensity factor K_{Ic}^S), maximal value of elastic modulus after 28 and 180 days of curing and minimal porosity of hardened concrete. It is shown that FBC fly ash has small influence on the optimization results whereas water/binder ratio influences the results significantly. The optimal solutions were obtained for w/b ratios below 0.37.

KEYWORDS: age of concrete, concrete, fluidal ash, mechanical properties, optimization, stereology.

DOI: 10.7409/rabdim.014.007

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa; janusz.konkol@prz.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa; grzepak@prz.edu.pl

1. WSTĘP

Istotnym zadaniem projektanta betonu jest dobranie składników, które zapewniają zarówno pożądane właściwości mieszanki, jak również otrzymanie betonu o wysokich parametrach wytrzymałościowych i dobrej trwałości. Do osiągnięcia tego celu autorzy wykorzystali metodę optymalizacji wielokryterialnej [1, 2], która umożliwia określenie optymalnego składu mieszanki betonowej, po uwzględnieniu przyjętych kryteriów optymalizacji i sprawdzeniu poprawności przyjętych rozwiązań. Jedną z dość często stosowanych metod optymalizacyjnych jest metoda funkcji użyteczności, która polega na wyrażeniu wszystkich kryteriów we wspólnej skali użyteczności, a następnie utworzeniu jednego kryterium w postaci, tzw. funkcji uogólnionej użyteczności. Uzyskana wartość funkcji użyteczności informuje o trafności uzyskanego rozwiązania.

Podjęte w niniejszym artykule badania są kontynuacją pracy [3] i mają na celu:

- określenie rozwiązania optymalnego dla przyjętych kryteriów optymalizacji,
- wskazanie na konieczność odmiennego uwzględnienia popiołów fluidalnych aktywowanych mechanicznie w porównaniu do konwencjonalnych popiołów lotnych przyjmowanych zgodnie z normą PN-EN 206-1 ze współczynnikiem $k = 0,2$ względnie $0,4$.

Istotną kwestią przeprowadzonej optymalizacji wielokryterialnej są również:

- uwzględnienie zmienności wybranych właściwości betonu w czasie,
- uwzględnienie w optymalizacji składu betonów z dodatkiem popiołu fluidalnego aktywowanego mechanicznie parametrów mechaniki pękania, ważnych z uwagi na możliwość zwiększenia kruchości betonów o niskim stosunku w/b , które nie były jeszcze przedmiotem badań i analiz.

Wyniki badań prezentowanych w pracach [4 - 8] wskazują na odmienne zachowanie betonów modyfikowanych tym dodatkiem. Autorzy sugerują konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie, uwzględnienie popiołu fluidalnego niejednokrotnie prowadzi do przyjęcia współczynnika $k = 1,0$ [6, 8].

2. PROGRAM BADAŃ

Program badań opracowano na podstawie planu dwuczynnikowego centralnego kompozycyjnego, zakładającego przeprowadzenie badań w 9 punktach [9, 10]. Zmiennymi

1. INTRODUCTION

An important task of the concrete designer is to choose the ingredients, which provide both desirable properties of concrete mix as well as to obtain concrete with high strength and good durability. To achieve this goal, the authors applied a method of multi-criteria optimization [1, 2], which allows to determine the optimal composition of concrete mix, taking into account the criteria of optimisation and the validation of the correctness of solutions. One of the often used optimisation methods is the method of the utility function, which is based on the expression of all the criteria in a common scale of utility, and then creating one criterion in the form of the so-called generalized function of utility. The resulting value of the utility function indicates the relevance of the obtained solution.

The research undertaken in this article is a continuation of work [3] and are designed to:

- determine the optimal solution for the adopted optimization criteria,
- indicate the need to differently consider mechanically activated fluidized ashes compared to conventional fly ash adopted in accordance with PN-EN 206-1 with a coefficient $k = 0.2$ or 0.4 .

An important issue of the carried out multi-criteria optimization are also:

- taking into account the variability of selected properties of the concrete in time,
- taking into account in the optimization of the composition of the concrete with the addition of mechanically activated fluid ash, the fracture mechanics parameters, important due to the possibility of increasing the brittleness of concrete with low w/b that have not yet been the subject of research and analyses.

The research results presented in the papers [4 - 8] indicate a different behavior of concretes modified with this additive. The authors suggest that further research should be done in this field, taking into account that fluid ash often leads to the adoption of the coefficient $k = 1.0$ [6, 8].

2. THE RESEARCH PROGRAM

The research program was developed based on the two-factor central compositional plan, assuming testing in 9 points [9, 10]. The variables in the plan were: the water/binder (w/b) ratio and the share of the additive of mechanically activated fluid ash in relation to the weight

w planie były: stosunek woda/spoiwo (w/b) oraz udział dodatku popiołu fluidalnego aktywowanego mechanicznie w stosunku do masy spoiwa (FL/b). Po stronie spoiwa uwzględniono dodatek popiołu fluidalnego ze współczynnikiem $k = 1,0$. Badania przeprowadzono dla pięciu pośrednich wartości wielkości wejściowych w/b i FL/b , wyznaczonych dla wartości unormowanych wynoszących 0, ± 1 i $\pm 1,414$. Wynikające z przyjętego planu wartości unormowane przeliczono zgodnie ze wzorem (1) na wartości rzeczywiste zmiennych, które wyniosły: dla w/b 0,353; 0,38; 0,445; 0,51 i 0,537 oraz dla FL/b 0,0214; 0,04; 0,085; 0,13 i 0,1486:

$$x_i = \bar{x}_i + \frac{\hat{x}_i}{\alpha} (x_{i,\max} - \bar{x}_i), \quad i=1, 2, \quad (1)$$

gdzie:

- \hat{x}_i – wartość unormowana (kodowa),
- α – ramię gwiazdne planu; w przyjętym planie $\alpha=1,414$ (alfa rotalności),
- x_i – wartość rzeczywista kolejnej zmiennej,
- \bar{x}_i – wartość średnia kolejnej zmiennej rzeczywistej,
- $x_{i,\max}, x_{i,\min}$ – wartości maksymalna i minimalna kolejnej zmiennej rzeczywistej.

Układ punktów w planie eksperymentu przedstawiono na Rys. 1. Dokładności zmiennych podyktowane były przyjętym planem eksperymentu; ze względów praktycznych zaokrąglono je do dwóch miejsc po przecinku w przypadku zmiennej w/b i do trzech miejsc po przecinku w przypadku FL/b .

Przyjęto założenie utrzymania stałej konsystencji mieszanki betonowej. W tym celu stosowano odpowiednią, ustaloną doświadczalnie, ilość superplastyfikatora FM-6. Miarą konsystencji był rozptył na stoliku rozptylowym wynoszący 42 ± 2 cm. Zastosowanie domieszki wpływającej przyczyniło się do uzyskania mieszanek betonowych o podobnej urabialności.

Zastosowano cement portlandzki CEM I klasy 32,5R, kruszywo grube bazaltowe frakcji do 16 mm z miejscowości Wilków, piasek kwarcowy płukany do 2 mm z miejscowości Strzegocice. Jako dodatek zastosowano także aktywowany mechanicznie popiół z kotłów o spalaniu fluidalnym [3 - 8, 11 - 19], zawierający według danych producenta: 40% SiO_2 , 29,7% Al_2O_3 i 13% CaO . Do aktywacji mechanicznej popiołu wykorzystuje się urządzenie EMDC wykonane według patentu firmy Energomar-Nord.

of the binder (FL/b). As far as the binder is concerned, the additive of fluidized ash with a coefficient $k = 1.0$ was considered. The research was conducted for five intermediate values of the input parameters w/b and FL/b , designated for the standardized values ranging 0, ± 1 and ± 1.414 . The standardized values resulting from the adopted plan were converted according to the formula (1) to the actual values of variables that were: for w/b 0.353; 0.38; 0.445; 0.51 and 0.537 and for FL/b 0.0214; 0.04; 0.085; 0.13 and 0.1486:

$$x_i = \bar{x}_i + \frac{\hat{x}_i}{\alpha} (x_{i,\max} - \bar{x}_i), \quad i=1, 2, \quad (1)$$

where:

- \hat{x}_i – the standardized value (code),
- α – star point distance; in the adopted plan $\alpha=1,414$ (alpha rotary),
- x_i – the real value of another variable,
- \bar{x}_i – mean value of another real variable,
- $x_{i,\max}, x_{i,\min}$ – maximum and minimum values of another real variable.

The point layout in the plan of the experiment is shown in Fig. 1. The accuracy of variables were dictated by the adopted plan of the experiment; for practical reasons, they were rounded to two decimal places in the w/b variable and to three decimal places for FL/b .

It has been assumed to maintain a constant consistency of the concrete mix. For this purpose, an appropriate, empirically determined, amount of superplasticizer FM-6 was applied. The measurement of consistency was performed by a flow table test as 42 ± 2 cm. The use of superplasticizer contributed to obtaining concrete mixtures with similar workability.

Portland cement CEM I 32.5 R, basalt coarse aggregate fractions to 16 mm from Wików, quartz sand aggregate to 2 mm from Strzegocice. As an addition, mechanically activated ash from fluidized combustion boilers [3 - 8, 11 - 19], containing according to the manufacturer: 40% SiO_2 , 29.7% Al_2O_3 and 13% CaO , was also applied. For mechanical activation of the ash, the EMDC device is used, made by a patent of the company Energomar-Nord. The activation process of the fluid ash consisted of mechanical deagglomeration of grains and the formation of structural defects on the surfaces of ash particles. The result of activation was the acceleration of chemical processes already in the first hours of hardening.

Proces aktywacji popiołu fluidalnego polegał na mechanicznej dezaglomeracji ziaren oraz powstaniu defektów strukturalnych na powierzchniach cząstek popiołu. Efektem aktywacji było przyspieszenie procesów chemicznych już w pierwszych godzinach twardnienia.

Przy wszystkich mieszankach betonowych zastosowano ten sam sposób dozowania składników, sposób i czas mieszania oraz zagęszczania mieszanki, warunki dojrzewania próbek, czas i sposób badania oraz ten sam sprzęt. Skład mieszanek betonowych w poszczególnych seriach planu badań zestawiono w Tabl. 1 wraz z podaniem ilości superplastyfikatora koniecznego do uzyskania wymaganej konsystencji mieszanki betonowej.

3. ZAKRES BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Wykonano badania wytrzymałości na ściskanie, odporności na pękanie oraz określono moduł sprężystości podłużnej i porowatość stwardniałych betonów. Próbki do badań wytrzymałościowych przechowywano w warunkach laboratoryjnych przy wilgotności względnej powietrza powyżej 90%. Próbki poddano badaniom po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania. Badania wytrzymałości na ściskanie f_c przeprowadzono na kostkach o boku 100 mm. Łącznie przebadano 330 próbek.

Badanie odporności na pękanie, według I modelu (rozciąganie przy zginaniu), przeprowadzono na belkach o wymiarach $80 \times 150 \times 700$ mm ze szczeliną pierwotną długości 50 mm. Określono krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}^S [20, 21]. Schemat belki oraz sposób jej obciążenia pokazano na Rys. 2. Badaniu odporności na pękanie poddano łącznie 74 belki.

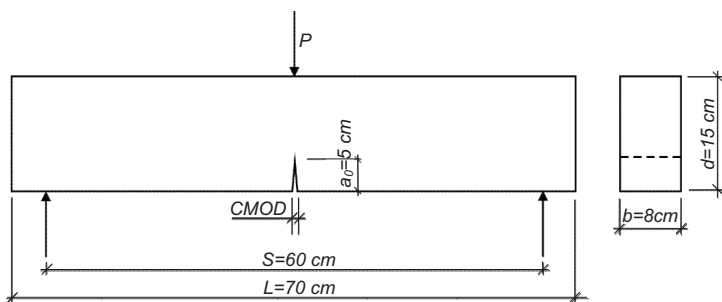


Fig. 2. Scheme of the beam for fracture toughness testing
Rys. 2. Schemat belki do badania odporności na pękanie

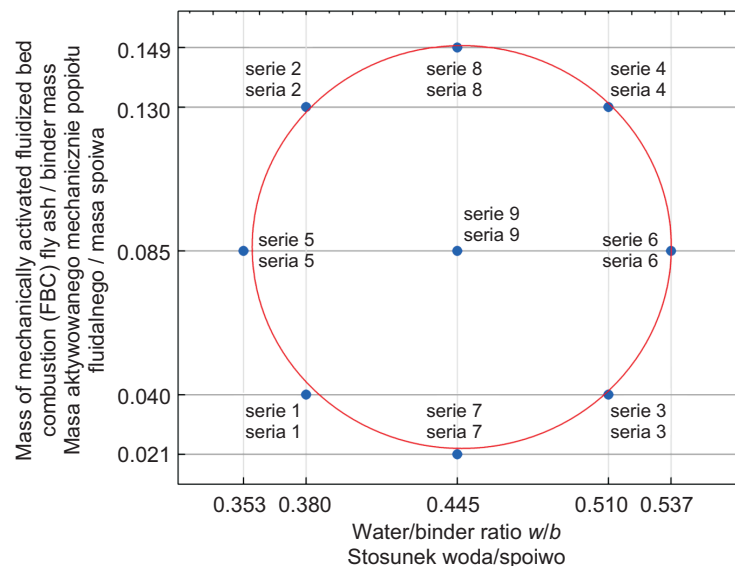


Fig. 1. Applied central composite design
Rys. 1. Zastosowany centralny plan kompozycyjny

For all concrete mixes, the same way of dosing components was used, the method and time of mixing and compaction of the mix, curing conditions of samples, time and manner of the examination and the same equipment. The composition of concrete mixtures in each series of the study plan are summarized in Table 1 together with the amount of superplasticizer required to achieve the desired consistency of the concrete mixture.

3. THE SCOPE OF EXPERIMENTAL RESEARCH

The compressive strength, the fracture toughness, the elastic modulus and the porosity of hardened concrete was determined. Before testing specimens were stored in the laboratory at a relative humidity above 90%. Specimens were tested at 28, 90 and 180 days of hardening. Compressive strength tests f_c were carried out on cubes of side 100 mm total, 330 samples were tested.

Fracture toughness testing according to model I (tensile strength) was carried out on the beams of dimensions $80 \times 150 \times 700$ mm with a slot length of 50 mm, the initial determined critical stress intensity factor K_{Ic}^S [20, 21]. Scheme of the beam and the way it is load shown in Fig. 2. Total number of beams subjected to fracture toughness tests was 74.

Table 1. Composition of concrete mixes series

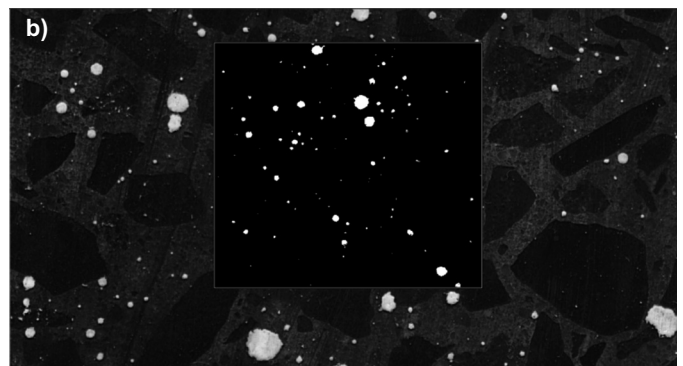
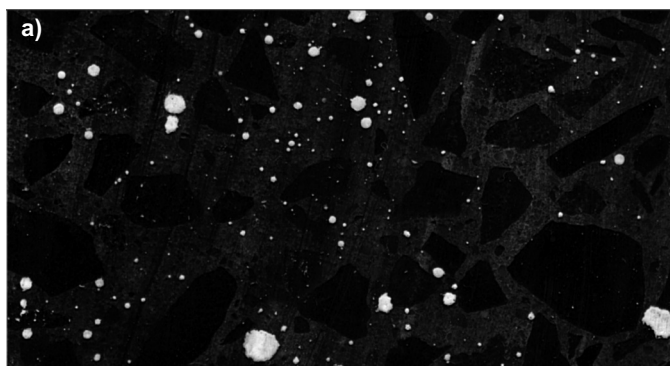
Tablica 1. Skład mieszanek betonowych poszczególnych serii betonów

Designation of concrete series Oznaczenie serii betonu	Variable / Zmienna		The composition of the concrete mix according to the adopted plan Skład mieszanki betonowej według przyjętego planu [kg/m ³]					
	Water/binder ratio <i>w/b</i> Stosunek woda/spoiwo	<i>FL/b</i>	Cement	Fluidal ash Popiół fluidalny	Water Woda ^{*)}	Sand Piasek	Basalt Bazalt	FM-6 [%] ^{**)}
1	0.380	0.04	437.8	18.2	173.3	742.6	1218.0	1.42
2	0.380	0.13	395.6	59.1	172.8	740.4	1214.3	2.13
3	0.510	0.04	413.3	17.2	219.6	701.1	1149.8	0.11
4	0.510	0.13	373.5	55.8	218.9	699.1	1146.6	0.17
5	0.353	0.085	421.8	39.2	162.8	750.7	1231.2	2.54
6	0.537	0.085	388.9	36.1	228.2	692.1	1135.0	0.00
7	0.445	0.021	433.7	9.5	197.2	721.7	1183.6	0.61
8	0.445	0.149	375.8	65.6	196.4	718.7	1178.8	0.70
9	0.445	0.085	404.7	37.6	196.8	720.2	1181.2	0.75

Remark / objaśnienie
^{*)} amount of water including water from superplasticizer / ilość wody wraz z wodą z superplastyfikatora
^{**)} by binder mass / masy spoiwa

Obliczenia modułu sprężystości podłużnej E dokonano na podstawie nachylenia stycznej do wykresu zależności siła-rozwarcie wylotu szczeliny, uzyskanej podczas badania odporności na pękanie. Procedurę obliczeniową przeprowadzono zgodnie z wytycznymi projektu zaleceń RILEM [20].

Przeprowadzono również badania porowatości stwardniałego betonu. Analizę przeprowadzono na specjalnie przygotowanych płaskich przekrojach metodami stereologicznymi [22, 23]. Określono powierzchnię względną porów A_{AP} , równoważną objętości względnej porów. Wartość średnią powierzchni względnej porów, dla betonu każdej serii, obliczono na podstawie analizy 12 obrazów o powierzchni 24 cm² każdy. Analizę przeprowadzono w programie komputerowym *Fraktal_Stereolog* przyjmując zakres skali szarości dla fazy porów od 160 do 255 (0 kolor czarny, 255 kolor biały). Przykładowy obraz powierzchni betonowej oraz wynik identyfikacji porów przedstawiono na Rys. 3. Uzyskane wyniki badań zestawiono w Tabl. 2.



The calculation of the elastic modulus E was based on the slope of the tangent to the plot of the force-opening of the outlet gap, resulting in the fracture toughness test. The calculation procedure is conducted in accordance with the guidelines of the draft recommendations of RILEM [20].

The porosity of the hardened concrete was determined on flat sections using specially prepared specimens [22, 23]. The relative pore surface A_{AP} and equivalent relative volume of the pores was determined. The average value of relative pore surface for concrete each series is calculated based on the analysis of 12 images of an area of 24 cm² each. The analysis was performed in a computer program *Fraktal_Stereolog* accepting greyscale range for phase pores from 160 to 255 (0 black, 255 white). Sample image of the surface of the concrete and the result of the identification of the pores shown in Fig. 3. The results are summarized in the Table. 2.

Fig. 3. Real image (on the left) and result of pores identification in the *Fraktal_Stereolog* program (on the right)
 Rys. 3. Obraz rzeczywisty (po lewej) oraz wynik identyfikacji porów w programie *Fraktal_Stereolog* (po prawej)

Table 2. Properties of concrete with addition of mechanically activated FBC fly ash

Tablica 2. Zestawienie cech betonów modyfikowanych dodatkiem popiołu fluidalnego aktywowanego mechanicznie

Concrete series Seria betonu	Variable / Zmienna		Concrete property / Cecha betonu							
	w/b [-]	FL/b [-]	\bar{f}_c^{28} [MPa]	\bar{f}_c^{90} [MPa]	\bar{f}_c^{180} [MPa]	\bar{K}_c^{S28} [MN/m ^{3/2}]	\bar{K}_c^{S180} [MN/m ^{3/2}]	\bar{E}^{28} [GPa]	\bar{E}^{180} [GPa]	\bar{A}_{AP} [-]
1	0.380	0.04	58.3 (8)	72.8 (8)	78.1 (8)	1.488	1.561	36.7	38.5	0.029
2	0.380	0.13	61.0 (8)	75.4 (8)	80.1 (8)	1.579	1.471	37.1	35.6	0.028
3	0.510	0.04	40.0 (6)	53.2 (8)	55.3 (8)	0.904	1.300	29.9	31.6	0.023
4	0.510	0.13	40.9 (7)	53.2 (8)	53.2 (8)	1.169	1.290	31.1	31.8	0.023
5	0.353	0.085	63.8 (8)	72.7 (9)	82.0 (12)	1.475	1.544	36.8	42.6	0.028
6	0.537	0.085	41.5 (7)	48.5 (11)	50.4 (10)	1.055	1.260	31.9	29.5	0.023
7	0.445	0.021	45.2 (8)	60.0 (8)	66.3 (8)	1.228	1.484	35.4	33.6	0.030
8	0.445	0.149	47.3 (8)	66.9 (10)	71.9 (14)	1.341	1.457	36.2	33.4	0.032
9	0.445	0.085	45.7 (12)	59.6 (8)	63.1 (8)	1.265	1.380	35.5	32.7	0.028

4. OPTIMALIZACJA SKŁADU BETONÓW

Optymalizację składu betonu przeprowadzono przy użyciu pakietu STATISTICA 10, modułu Planowanie doświadczeń. Jako kryteria optymalizacji przyjęto:

- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, $\max f_c^{28}$,
- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach, $\max f_c^{90}$,
- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 180 dniach, $\max f_c^{180}$,
- maksimum krytycznego współczynnika intensywności naprężeń po 28 dniach, $\max K_{lc}^{S28}$,
- maksimum krytycznego współczynnika intensywności naprężeń po 180 dniach, $\max K_{lc}^{S180}$,
- maksimum współczynnika sprężystości podłużnej po 28 dniach, $\max E^{28}$,
- maksimum współczynnika sprężystości podłużnej po 90 dniach, $\max E^{90}$,
- minimum zawartości porów powietrznych w betonie, $\min A_{AP}$.

W przypadku wszystkich kryteriów optymalizacji przyjęto jednakowe wagi. Wzmocnienie wagi niektórych cech diagnostycznych uzyskano przez zdefiniowanie kryteriów dla różnego wieku betonów. Zależności funkcyjne między zmiennymi w planie eksperymentu, a określonymi cechami

4. OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF CONCRETE

Optimization of concrete composition was performed using STATISTICA 10, Experimental Design module. The optimization criteria were adopted:

- maximum compressive strength after 28 days, $\max f_c^{28}$,
- maximum compressive strength after 90 days, $\max f_c^{90}$,
- maximum compressive strength after 180 days, $\max f_c^{180}$,
- maximum critical stress intensity factor after 28 days, $\max K_{lc}^{S28}$,
- maximum critical stress intensity factor after 180 days, $\max K_{lc}^{S180}$,
- maximum of the modulus of elasticity after 28 days, $\max E^{28}$,
- maximum of the modulus of elasticity after 90 days, $\max E^{90}$,
- minimum content of air voids in the concrete, $\min A_{AP}$.

For the optimization criteria the equal weight factors were adopted. Gain some weight diagnostic features were obtained by defining the criteria for the different ages of concrete. Functional dependencies between variables in the experimental design, and the specific characteristics

betonu oszacowano za pomocą wielomianów stopnia drugiego. Wyniki badań oraz analizę statystyczną wyznaczających parametrów zamieszczono w pracach [3, 7, 19].

Określono, dla każdej cechy, wartości dolną, pośrednią i górną (Tabl. 3). Wartościom dolnej i górnej przypisano wartość użyteczności. W przypadku maksymalizacji wartości danego parametru (kryterium max) wartości górnej przypisano wartość użyteczności 1,0, wartości dolnej cechy natomiast wartość użyteczności 0. Pomiędzy tymi wartościami wartości użyteczności zmieniają się liniowo, zatem wartości pośredniej przypisana jest wartość użyteczności 0,5. W przypadku minimalizowania wartości danego parametru, wartości górnej przypisano wartość użyteczności 0, natomiast wartości dolnej cechy wartość użyteczności 1,0. W przypadku cech mechanicznych betonów wartość dolną przyjęto jako minimalną spośród wszystkich serii betonów powiększoną o 0,4 rozstępu, wartość pośrednią powiększoną o 0,6 rozstępu, a górną powiększoną o 0,8 rozstępu. W przypadku wartości górnej stanowi ona od 92% do 96% wartości maksymalnej z badań.

Optymalizację przeprowadzono w module *Planowanie doświadczeń* w programie STATISTICA. Zastosowano dwie opcje poszukiwania optymalnej użyteczności: *Zastosuj ogólną optymalizację funkcji* oraz *Optimum użyteczności w węzłach siatki*. Liczbę kroków siatki przyjęto 20. Opcja *Zastosuj ogólną optymalizację funkcji* polega na przyjęciu bieżących wartości wielkości wejściowych jako wartości początkowych w metodzie sympleksowej poszukiwania optimum użyteczności odpowiedzi. Metoda *Optimum użyteczności w węzłach siatki* jest metodą polegającą na pełnym poszukiwaniu optymalnej użyteczności w węzłach siatki.

of concrete were estimated using second degree polynomials. The results and statistical analysis determined parameters are given in the papers [3, 7, 19].

For each attribute, the lower, the intermediate and the upper values were determined (Table 3). Upper and lower values are assigned a value of utility. In the case of maximizing the value of the parameter (criterion max) values assigned top utility value of 1.0, while the bottom features of the utility value of 0 between these values the usefulness vary linearly, so the intermediate value is assigned a utility value of 0.5. In the case of minimizing the value of the parameter values assigned top utility value 0, while the bottom features of the utility value of 1.0. In the case of the mechanical properties of concrete lower value was taken as the minimum of all the series of concrete increased by 0.4 dehiscence, an intermediate value increased by 0.6 dehiscence, and the top plus 0.8 dehiscence. If it represents the upper value of 92% to 96% of the maximum of the study.

The optimization was carried out in the *Experimental Design module*, answers general profile option in STATISTICA software. Two options for searching for optimal usability were applied: *Apply a general optimization features* and *optimum usability mesh nodes*. The number of mesh steps was adopted 20. The option *Apply a general optimization feature* is the adoption of the current values of input parameters as initial values in the method of searching for optimum usability using simplex methods. *Optimum method usefulness in the nodes of the grid* is a method consisting in a full search optimal utility in the nodes of the mesh.

Table 3. Optimization criteria, parameters of the utility function
Tablica 3. Kryteria optymalizacji, parametry funkcji użyteczności

Variable Zmienna	Parameters of the utility function / Parametry funkcji użyteczności					
	Lower value Wartość dolna	Utility value Wartość użyteczności	Average value Wartość średnia	Utility value Wartość użyteczności	Upper value Wartość górna	Utility value Wartość użyteczności
f_c^{28}	50.2	0	55.2	0.5	60.3	1
K_{lc}^{S28}	1.22	0	1.33	0.5	1.45	1
E^{28}	33.9	0	35.3	0.5	36.7	1
f_c^{90}	57.8	0	63.3	0.5	68.8	1
f_c^{180}	61.8	0	68.5	0.5	75.1	1
K_{lc}^{S180}	1.39	0	1.45	0.5	1.51	1
E^{180}	33.3	0	35.4	0.5	37.5	1
A_{AP}	0.026	1	0.028	0.5	0.030	0

W zależności od przyjętej opcji sposobu rozwiązania, otrzymano dwa rezultaty przedstawione w Tabl. 4 i 5. Rozwiązanie optymalne otrzymano dla zmiennych $w/b = 0,353$ i $FL/b = 0,068$ oraz $w/b = 0,353$ i $FL/b = 0,149$.

Two solutions were obtained and presented in Table 4 and 5, for a selected solution option. The optimal solutions were obtained for $w/b = 0.353$ and $FL/b = 0.068$ and for $w/b = 0.353$ and $FL/b = 0.149$, respectively.

Table 4. Results of optimization for the option *Optimum usability in mesh nodes*
Tablica 4. Wyniki optymalizacji dla opcji *Optimum użyteczności w węzłach siatki*

Variable Zmienna		Approximated values / Wartości aproksymowane								Utility value Wartość użyteczności
w/b	FL/b	f_c^{28}	f_c^{90}	f_c^{180}	K_{lc}^{S28}	K_{lc}^{S180}	E^{28}	E^{180}	A_{AP}	
0.353	0.068	65.0	73.7	81.6	1.53	1.57	38.1	39.6	0.028	0.93

Table 5. Results of optimization for the option *Apply overall optimization function*
Tablica 5. Wyniki optymalizacji dla opcji *Zastosuj ogólną optymalizację funkcji*

Variable Zmienna		Approximated values / Wartości aproksymowane								Utility value Wartość użyteczności
w/b	FL/b	f_c^{28}	f_c^{90}	f_c^{180}	K_{lc}^{S28}	K_{lc}^{S180}	E^{28}	E^{180}	A_{AP}	
0.353	0.149	66.5	81.6	87.3	1.65	1.57	38.1	39.6	0.028	0.93

Uzyskana wartość funkcji użyteczności, w przypadku obu metod, wyniosła 0,93. Wykres powierzchniowy funkcji użyteczności w zależności od zmiennych niezależnych w/b i FL/b przedstawiono na Rys. 4. Na podstawie uzyskanych takich samych wartości funkcji użyteczności, wykresu powierzchniowego funkcji użyteczności (Rys. 4) oraz profilu użyteczności (Rys. 5) stwierdzono, że zmienna FL/b nie ma wpływu na uzyskaną wartość funkcji użyteczności.

The resulting value of the utility function for both methods was 0.93. A surface chart utility function depending on the independent variables FL/b is shown in Fig. 4. On the basis of the same value of the utility function, the utility function surface chart (Fig. 4) and the utility profile (Fig. 5) found that the variable FL/b has no effect on the resulting value of the utility function.

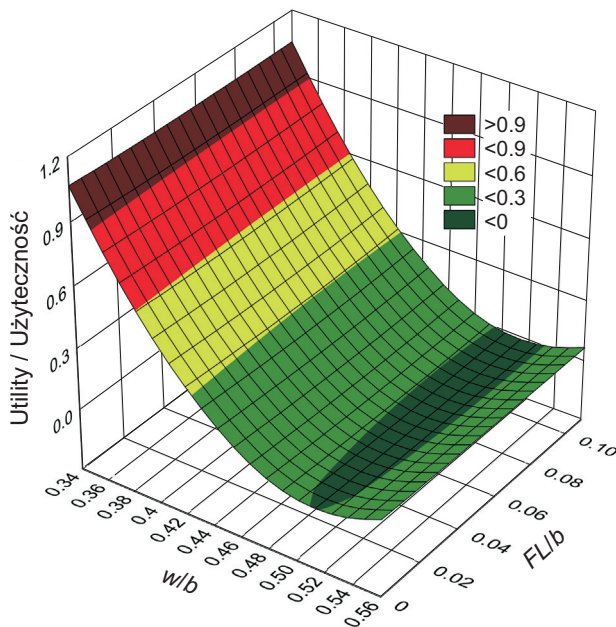


Fig. 4. Surface chart of utility function
Rys. 4. Wykres powierzchniowy funkcji użyteczności

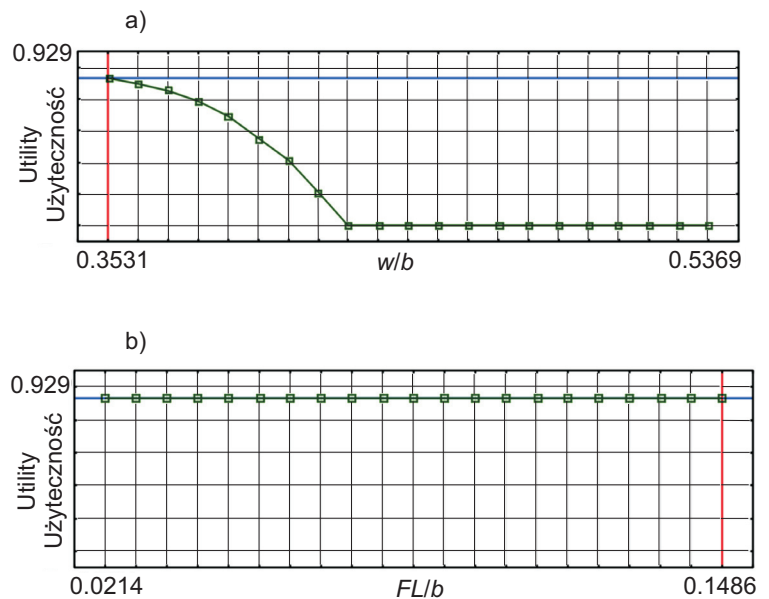


Fig. 5. Profiles of utility function with respect to w/b (a) and FL/b (b)
Rys. 5. Profile aproksymowanych wartości w/b (a) i FL/b (b) oraz użyteczności

Przeprowadzone przez autorów analizy zmierzające do określenia modeli regresji oraz analizy Pareto, prezentowane między innymi w pracach [3, 7, 19], wykazały, że w przypadku modeli opisujących zmienności krytycznego współczynnika intensywności naprężeń po 180 dniach, modułu sprężystości podłużnej po 28 i 180 dniach oraz zawartości porów powietrznych w betonie zmienna FL/b okazała się nieistotną na poziomie istotności 0,05. Wykazano jedynie istotność zmiennej w/b .

Dokonano także zastąpienia przyjętych zmiennych w/b i FL/b zmiennymi $w/(c + k \times FL)$ i FL/c . Współczynnik k przyjęto równy 0,2, jak dla popiołu lotnego. Uzyskane wykresy warstwicowe funkcji użyteczności, przed i po zmianie zmiennych, przedstawiono na Rys. 6 i 7. Na Rys. 7 pokazano, że wzrost udziału dodatku w stosunku do ilości cementu powoduje także wzrost wartości funkcji użyteczności. Zależności tej nie obserwuje się w przypadku zmiennej FL/b (Rys. 6). Wzrost wartości funkcji użyteczności przy przyjęciu $k = 0,2$ i jej niezmiennosc przy $k = 1,0$ sugeruje korzystniejszy wpływ zastąpienia części cementu popiołem fluidalnym aktywowanym mechanicznie, aniżeli ma to miejsce w przypadku konwencjonalnych popiołów lotnych. Korzystny wpływ dodatku popiołu fluidalnego na właściwości mechaniczne betonów, w tym odporność na pękanie potwierdzono również w pracy [8]. Przyjmując wartość $k = 1$ wykazano, że dodatek ten jest konkurencyjnym dla pyłów krzemionkowych. Jest to istotny wniosek praktyczny potwierdzający celowość badań.

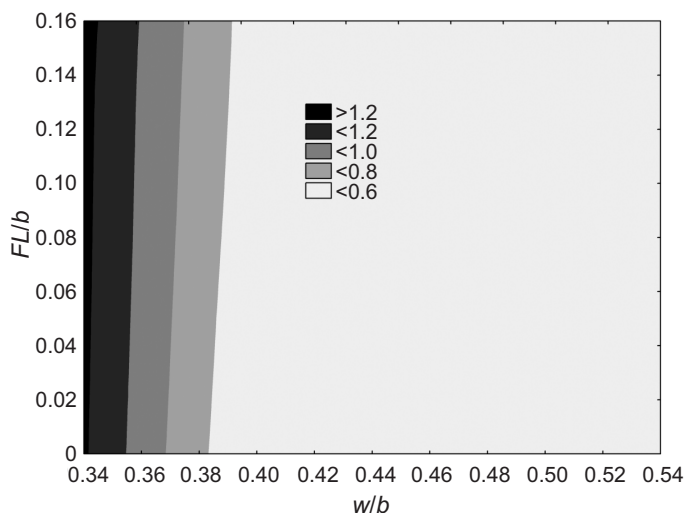


Fig. 6. Contour graph of utility function for variables w/b and FL/b

Rys. 6. Wykres warstwicowy funkcji użyteczności dla zmiennych w/b i FL/b

Analysis carried out by the authors, aimed to determine the regression models and Pareto analysis, presented also in [3, 7, 19], have shown that in the case of variation of models describing the critical stress intensity factor at 180 days, the elastic modulus at 28 and 180 days and the content of air voids in the concrete variable FL/b was not a significant factor at a significance level of 0.05. The importance of the w/b variable was shown.

There have also been adopted to replace the variables w/b and FL/b variable in $w/(c + k \times FL)$ and FL/c . The coefficient k of 0.2, was adopted as the fly ash. The resulting contour utility function graphs, before and after the change of variables, are shown in Fig. 6 and 7. The increase in the proportion of the additive in relation to the amount of cement increases the value of the utility function in Fig. 7. This dependence is not observed in the case of variable FL/b (Fig. 6). The increase in the value of the utility function for $k = 0.2$ and no changes for $k = 1.0$ is suggested beneficial effect of replacing the cement with a mechanically activated bed ashes than is the case for conventional fly ash. The beneficial effect of FBC additive on concrete mechanical properties, including fracture toughness was also confirmed in [8]. Assuming the value of $k = 1$ shows that this additive is competitive for silica fume. This is an important practical conclusion confirming the desirability of research.

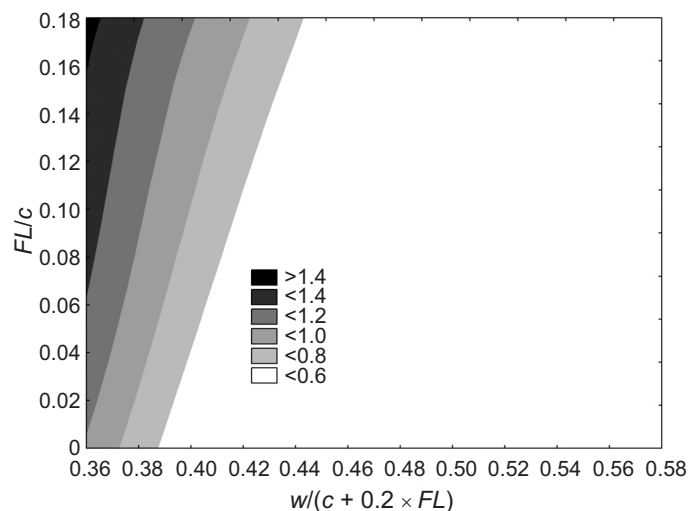


Fig. 7. Contour graph of utility function for variables $w/(c + 0.2 \times FL)$ and FL/c

Rys. 7. Wykres warstwicowy funkcji użyteczności dla zmiennych $w/(c + 0,2 \times FL)$ i FL/c

Proporcje mieszanek betonowych, odpowiadające uzyskanym rozwiązaniom optymalnym, po przeliczeniu według przyjętego planu przedstawiono w Tabl. 6 i 7. Uzyskane wartości wszystkich cech mechanicznych uwzględnionych w kryteriach optymalizacji (Tabl. 4 i 5) wskazują na rozwiązania o wartości użyteczności 1,0 (są one w zakresie powyżej wartości przyjętej za górną – Tabl. 3). Jedynie porowatość ma wartość użyteczności 0,5.

The mix proportions for two optimal solutions, after conversion according to the adopted plan, are summarized in Tables 6 and 7. All values obtained for mechanical properties included in the optimization criteria (Tables 4 and 5) indicate the utility of solutions of 1.0 (they are in the range above the value adopted for the upper limit – Table 3). Only the porosity shows a value of 0.5 utility.

Table 6. Optimal composition of concrete mixes

Tablica 6. Zestawienie składu optymalnego mieszanek betonowych

Solution Rozwiązanie	Variable / Zmienna		Composition of the concrete mix according to the adopted plan Skład mieszanki betonowej po przeliczeniu według przyjętego planu [kg/m ³]					
	w/b	FL/b	Binder Spoiwo	Cement	Fluidal ash Popiół fluidalny	Water Woda	Sand Piasek	Basalt Bazalt
I	0.353	0.1486	454	386.5	67.5	160.3	739.3	1212.5
II	0.353	0.0680		423.1	30.9			

Table 7. Optimal composition of concrete mixes

Tablica 7. Zestawienie składu optymalnego mieszanek betonowych

Solution Rozwiązanie	Variable / Zmienna		Utility value Wartość użyteczności	Composition of the concrete mix Skład mieszanki betonowej [kg/m ³]				
	w/b	FL/b		Cement	Fluidal ash Popiół fluidalny	Water Woda	Sand Piasek	Basalt Bazalt
I	0.353	0.1486	0.93	391.7	68.4	162.4	749.2	1228.7
II	0.353	0.0680		429.9	31.4	162.8	751.2	1232.0

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy wielokryterialnej określono optymalne składy mieszanek betonowych ze względu na przyjęte kryteria optymalizacji. Najlepsze rozwiązanie uzyskano przy maksymalnym, przyjętym w planie badań, udziale popiołu fluidalnego aktywowanego mechanicznie w stosunku do łącznej masy spoiwa wynoszącym 14,9% (17,5% m.c.). Optymalny skład jest następujący: 391,7 kg cementu, 68,4 kg popiołu fluidalnego aktywowanego mechanicznie, 162,4 l wody, 749,2 kg piasku i 1228,7 kg bazaltu.

Drugie rozwiązanie optymalne uzyskano przy udziale popiołu fluidalnego/spoiwo wynoszącym 6,8%. Jak wykazały analizy optymalizacyjne, uzyskany profil aproksymowanych wartości i użyteczności (Rys. 5) oraz wykresy funkcji użyteczności (Rys. 4 i 6), dodatek popiołu fluidalnego aktywowanego mechanicznie stosowany jako równoważnik części cementu należy traktować odmiennie aniżeli ma to miejsce w przypadku tradycyjnych popiołów lotnych.

6. CONCLUSIONS

On the basis of multi-criteria analysis, the optimal compositions of concrete mixes were established for the adopted criteria optimization. The best solution obtained at the maximum (adopted in the study plan) content of mechanically activated fluid ash in relation to the total weight of the binder ratio of 14.9% (17.5% cement mass). The optimum composition is as follows: 391.7 kg of cement, 68.4 kg of ash fluidized activated mechanically, 162.4 l of water, 749.2 kg of sand and 1228.7 kg basalt.

The second optimal solution was obtained FBC/cement ratio of 6.8%. As demonstrated by the optimization analysis and the resulting profile approximated value and utility (Fig. 5) and the utility function graphs (Fig. 4 and 6), the addition of mechanically activated fluid ash used as the equivalent part of the cement should be treated differently than in the case of traditional fly ash. This is confirmed by analysis of both optimization cases, carried out for the adopted variable w/b and FL/b (assuming $k = 1$)

Potwierdzeniem jest analiza obu przypadków optymalizacji, przeprowadzona dla przyjętych zmiennych w/b i FL/b (przy założeniu $k = 1$) oraz dla zmiennych przetransponowanych na zmienne $w/(c + k \times FL)$ i FL/c (przy $k = 0,2$). Wyniki tej analizy potwierdzają również, że popiół fluidalny aktywowany mechanicznie jest cennym dodatkiem do betonu, który może być w ten sposób utylizowany.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy nr N N507 475337 oraz ze środków Narodowego Centrum Nauki w latach 2011-2013 jako projekt badawczy nr N N507 321140.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Brandt A.M. (red.): Metody optymalizacji materiałów kompozytowych o matrycach cementowych. Studia z Zakresu Inżynierii, 38, Warszawa, 1994
- [2] Konkol J., Prokopski G.: Optymalizacja wielokryterialna składu betonów zwykłych z uwzględnieniem parametrów wytrzymałościowych i strukturalnych. Przegląd Budowlany, 2, 2006, 23-28
- [3] Konkol J., Prokopski G.: The influence of the age of concretes with FBC fly ash or metakaolinite additives on their strenght properties. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 13, 1, 2014, 49-67
- [4] Brandt A.M., Józwiak-Niedźwiedzka D., Malolepszy J., Marks M., Śliwiński J., Kasperkiewicz J.: Zastosowanie popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w betonach konstrukcyjnych, Studia z Zakresu Inżynierii, 72, 2010, 339-351
- [5] Glinicki M.A.: Zastosowanie aktywowanego popiołu lotnego z kotłów o spalaniu fluidalnym Flubet® jako dodatku do betonu. Targi Energetyki i Ochrony Środowiska, ECOENERGIA 2002, Gdańsk, http://www.lubanta.pl/data/17/Popiol%20lotny%20fluidalny%20do%20betonu%20M_A_Glinicki.pdf
- [6] Śliwiński J., Tracz T., Kańka S.: Właściwości mieszanki i betonu oraz sposób projektowania składu z popiołami fluidalnymi, [w]: Zastosowanie popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w betonach konstrukcyjnych. Praca zbiorowa pod red. prof. A.M. Brandta, Studia z Zakresu Inżynierii, 72, Warszawa 2010
- [7] Konkol J., Prokopski G.: Właściwości wytrzymałościowe betonów bazaltowych z dodatkiem Flubetu. Przegląd Budowlany, 11, 2010, 25-29
- and for the transposition of these variables into the variables $w/(c + k \times FL)$ and FL/c (with $k = 0.2$). The results of this analysis also confirm that activated mechanically fluidized bed ash is a valuable addition to concrete, which can be disposed of in this way.

ACKNOWLEDGEMENT

The research is financed from funds of scholarship in the years 2009-2011 by the research project No. N N507 475337 and from funds of National Science Centre in the years 2011-2013 by the research project No. N N507 321140.

- [8] Konkol J.: Metakaolinit i popiół fluidalny jako alternatywne w stosunku do pyłów krzemionkowych dodatki mineralne do betonu. Inżynieria i Budownictwo, 9, 2012, 503-507
- [9] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa, 1984
- [10] Konkol J.: Wprowadzenie do praktycznego planowania eksperymentu. StatSoft Polska, Kraków 2007, 43 - 58 http://www.statsoft.pl/czytelnia/artykuly/Wprowadzenie_do_praktycznego.pdf
- [11] Giergiczny Z., Malolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Wydawnictwo Śląskie, Opole, 2002
- [12] <http://www.eltur-wapore.pl>
- [13] FLUBET – spoiwo drogowe na miarę XXI wieku. Magazyn Autostrady, 5, 2005, 62
- [14] 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
- [15] Gawlicki M., Roszczyniański W.: Uboczne produkty spalania z kotłów fluidalnych jako składnik cementów portlandzkich. Cement Wapno Beton, VIII/LXX, 5, 2003, 255-258
- [16] Glinicki M.A., Zieliński M.: Rozmieszczenie porów powietrznych w betonie z dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego. Cement Wapno Beton, VII/LXXIV, 3, 2007, 133-138
- [17] Giergiczny Z., Pużak T.: Popiół fluidalny a właściwości mieszanki betonowej. Konferencja Dni Betonu „Tradycja i nowoczesność”, Wisła, 13-15 października 2008, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2008, 971-980

- [18] Piotrowski Z., Uliasz-Bocheńczyk A.: Możliwości gospodarczego wykorzystania odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 12, 2008, 73-85
- [19] Konkol J., Prokopski G.: Morfologia przełomu oraz odporność na pękanie betonów modyfikowanych dodatkiem popiołu fluidalnego lub metakaolinitu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, **58**, 3/11/III, 2011, 321 - 330
- [20] Determination of fracture parameters (K_{Ic}^S and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend tests. RILEM Draft Recommendations, TC 89 – FMT Fracture Mechanics of Concrete Test Methods, Materials and Structures, 23, 1990
- [21] Prokopski G.: *Mechanika pękania betonów cementowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2009
- [22] PN-EN 480-11:2008. Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [23] Konkol J., Szyszka J.: Wybrane metody oceny porowatości betonu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, **252**, 47, 2008, 201-208