

*Genowefa Zapotoczna-Sytek  
Jan Małolepszy  
Józef Ślusarczyk  
Marek Maciążek*

# **Wytwarzanie autoklawizowanego betonu komórkowego z zastosowaniem popiołów fluidalnych**

**AUTOCLAVED AERATED CONCRETE PRODUCTION TECHNOLOGY USING FLUIDIZED BED COMBUSTION ASH**

## **Streszczenie**

Przedmiotem referatu jest wprowadzenie innowacyjnej technologii wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) z zastosowaniem popiołów fluidalnych (patent nr 207649) w wytwórni betonu komórkowego (PPH Prefabet Bielsko-Biała). Wdrożenie to efekt wspólnych prac specjalistów Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych – Oddział Betonów CEBET, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i PPH Prefabet Bielsko-Biała Sp. z o.o. Nowoopracowana bezodpadowa technologia pozwala uzyskać wysokiej jakości wyroby przy znaczącym zmniejszeniu w recepturach betonu zużycia surowca siarczanowego, wapna i środka porotwórczego. Ponadto, uzyskuje się oszczędność w zużyciu energii na domielenie popiołów. Skutkuje to obniżeniem kosztów wytwarzania ABK i zmniejszeniem wydobycia surowców mineralnych i pozytywnów z tym związanych. W efekcie przyczynia się do oszczędności w gospodarce kraju i ochrony naturalnego środowiska.

Ochrona środowiska wynika również z faktu, iż wykorzystując popioły fluidalne zmniejsza się emisję  $SO_2$  i  $NO_x$  do atmosfery. Społeczeństwo odnosi z tego tytułu korzyści niewymierne poprzez poprawę jakości powietrza.

Wdrożenie nowoopracowanej technologii powinno przekonywać o zasadności stosowania popiołów przemysłu materiałów budowlanych, w tym do wytwarzania ABK. Tym bardziej iż technologia wytwarzania ABK jest technologią bezodpadową a jak wykazały ponad 60-letnie doświadczenia polskie zarówno proces produkcji ABK, jak i zastosowanie betonu komórkowego „wpisują się” w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju.

---

*prof. ICiMB dr inż. Genowefa Zapotoczna-Sytek – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych*

*prof. dr hab. inż. Jan Małolepszy – Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych*

*mgr Józef Ślusarczyk – PPH Prefabet Bielsko-Biała*

*mgr inż. Marek Maciążek – były pracownik PPH Prefabet Bielsko-Biała*

## **Abstract**

This is to present an autoclaved aerated concrete (AAC) production technology based on fluidized bed combustion (FBC) ash, designed through research and development work and introduced into practice at PPH Prefabet Bielsko-Biała, aerated concrete production company. 33% of FBC ash instead of siliceous fly ash can be added to AAC formula produced by PPH Prefabet Bielsko-Biała. Experience to date shows that, with the newly implemented waste-free AAC production technology, lime and sulphate content in the AAC formula can be reduced by at least 10% and 60%, respectively, depending on the ash characteristics. Also, Al powder consumption can be reduced by at least 30%, and energy consumption during fly ash milling has been cut down by around 15%.

As a result, not only are the overall AAC production costs lower, but also the extraction of mineral resources has been reduced. This contributes to more sustained economy and protection of the natural environment.

The new AAC production technology incorporating FBC ash is more environmentally-friendly as it reduces  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions. Improved air quality is a major benefit for the society at large.

## 1. Wstęp

Spośród wielu rodzajów ubocznych produktów spalania węgla, popioły lotne i odpady denne z palenisk fluidalnych wyróżniają się odmienną charakterystyką zarówno chemiczną, fizyczną, jak i fazową.

Wynika to z odmienności warunków w jakich powstają [1, 2, 3, 10]. Odmienna charakterystyka popiołów fluidalnych skutkowałą potrzebą, przeprowadzenia prac nad ich zastosowaniem m.in. do wytwarzania materiałów budowlanych.

W wyniku kompleksowych badań przeprowadzonych przez COBRPB CEBET (obecnie w strukturze ICI MB) oraz Akademię Górniczo-Hutniczą w ramach projektu badawczego rozwojowego nr R04 011 03: **Badania przydatności popiołów lotnych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)** [1], opracowano technologię wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego z zastosowaniem tych popiołów.

Opracowana technologia została opatentowana [4] i wdrożona w istniejącej wytwórni betonu komórkowego, która przed wdrożeniem do wytwarzania ABK stosowała wyłącznie popioły lotne krzemionkowe powstające ze spalania węgla kamiennego w tradycyjnych kotłach pyłowych [8].

Powyższe wdrożenie to efekt wspólnych prac specjalistów Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych – Oddział Betonów CEBET, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i PPH Prefabet Bielsko-Biała Sp. z o.o.

## 2. Przebieg wdrożenia

### 2.1. Wdrożenie technologii

Przy prowadzeniu prac wdrożeniowych w maksymalnym stopniu wykorzystano doświadczenia z prób technologicznych wytwarzania ABK z zastosowaniem popiołów fluidalnych przeprowadzonych w halach doświadczalnych ICI MB – Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie, wstępnych prób w Prefabet Łągisza oraz PPH Prefabet Bielsko-Biała [2, 7].

Zgodnie z umową licencyjną zawartą pomiędzy PPH Prefabet Bielsko-Biała a ICI MB i AGH wdrożenie technologii ABK z zastosowaniem popiołów fluidalnych (rys. 1) nastąpiło od 1 lipca 2014 r.

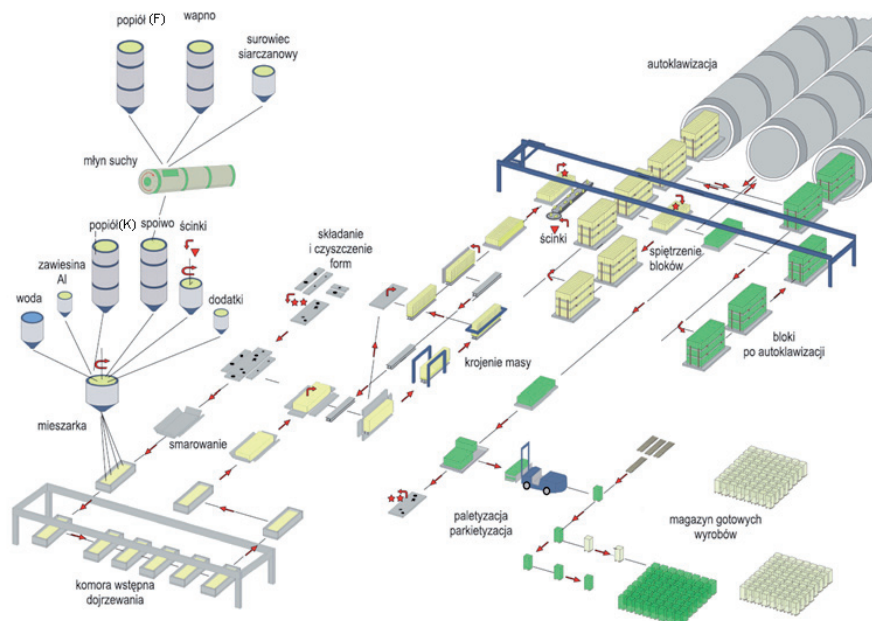
Popioły fluidalne (F) wprowadzane były do młyna „suchego” gdzie poddawano je przemiałowi łącznie z wapnem palonym, gipsem oraz tzw. kruszem (odpadem powstającym w procesie autoklawizacji oraz transportu wewnątrz zakładowego). Tak przemiłowane składniki stanowiły mieszankę spoiwową.

Jako kruszywo stosowano popioły lotne krzemionkowe (K) bez przemiału (w postaci naturalnego rozdrobnienia), a środek porotwórczy stanowił proszek aluminium, ponadto zastosowano środek powierzchniowo-czynny oraz wodę.

W recepturze stosowano również dodatek ściniek w postaci szlamu tj. woda + masa betonu „świeżego” powstała podczas operacji krojenia masy, a ściślej, z naddatków ponad zakładany wymiar elementów.

Popioły fluidalne (F) pochodziły z trzech elektrowni: F-1, F-2 oraz w niewielkiej ilości z F-3. Popioły krzemionkowe (K) z elektrowni: K-1; K-2; K-3.

Należy podkreślić, że stosowanie popiołów zarówno fluidalnych, jak i krzemionkowych z różnych źródeł stanowiło pewne utrudnienie w prowadzeniu procesu wytwarzania ABK, jako że popioły z każdego źródła mają zróżnicowane właściwości.



Rys. 1. Schemat technologiczny procesu wytwarzania ABK z zastosowaniem popiołów fluidalnych

Dla popiołów dostarczanych do wytwórni prowadzone były i są przez laboratorium zakładowe badania podstawowych właściwości fizyko-chemicznych. Badania składu fazowego prowadzone są okresowo. W tabeli 1 przedstawiono uśrednione właściwości fizyko-chemiczne stosowanych popiołów.

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości fizyczne popiołów lotnych

Właściwości	Jednostka	Pochodzenie popiołów					
		Popioły fluidalne			Popioły krzemionkowe		
		F-1	F-2	F-3	K-1	K-2	K-3
Strata prażenia	%	3,6	10,6	10,0	3,5	2,7	6,4
CaO+MgO całk.	%	12,4	6,1	9,9	4,9	4,4	1,7
CaO+MgO akt.	%	5,9	2,8	4,1	1,1	1,2	0,6
Zawartość gipsu	%	13,4	13,1	10,1	0,5	0,8	0,7
Wодоżądność	%	52,5	75,0	72,5	47,5	50,5	55,0
Rozdrobienie jako przepad sito □ 0,063 mm	%	63,0	71,0	72,0	67,9	74,9	66,5

Na podstawie analizy wyników badań właściwości popiołów ustalane są receptury dla różnych klas gęstości betonu z uwzględnieniem właściwości popiołów. Odważane składniki receptury kierowane są do mieszarki zarobu w kolejności i wg zasad ustalonych dla procesu wytwarzania ABK [5]. Masa zarobowa przekazywana jest do odpowiednio

przygotowanych form gdzie wyrasta i twardnieje. Następnie jest krojona na elementy o żądanych wymiarach za pomocą urządzeń umożliwiających uzyskanie prawidłowych kształtów (fot. 1, fot. 2) z zachowaniem minimalnych tolerancji wymiarowych i dużych gładkości powierzchni.



Fot. 1. Blok masy betonu komórkowego na stanowisku krojenia



Fot. 2. Widoczne wyprofilowania na pióro i wpust oraz uchwyty montażowe w masie betonu

Pokrojona masa wprowadzana jest do autoklawu celem utwardzenia nasyconą parą wodną o ciśnieniu 1,1–1,3 MPa i w temperaturze 180–190°C. Proces autoklawizacji umożliwia szybki przebieg reakcji pomiędzy składnikami masy [5, 6]. Po zakończeniu procesu autoklawizacji wyroby poddawane są badaniom fizyko-technicznym.

Należy podkreślić, że proces wytwarzania ABK jest bezodpadowy [5], wszystkie powstające w procesie uboczne produkty są ponownie wykorzystywane i tak:

- naddatki „świeżej” masy ponad założone wymiary elementów kierowane są z powrotem do produkcji w postaci szlamu;
- do produkcji kierowane są również odpady z wyrobów gotowych (po procesie autoklawizacji). Odpady te mogą być używane także do wytwarzania innych produktów, np.: ciepłochronnych zapraw murarskich, podsypek ocieplających, mogą być stosowane też w drogownictwie;
- woda z procesu autoklawizacji stanowi część wody zarobowej.

Podczas prac wdrożeniowych zawieszono dostawy popiołów fluidalnych z niektórych elektrowni (F-2; F-3), z uwagi na pogarszającą się ich jakość (zwiększone straty prażenia oraz wodożądność). ABK z tych popiołów miał niższą wytrzymałość na ściskanie i niższe były oszczędności w zużyciu wapna. Wytypowany do ciągłego stosowania popiół fluidalny (F-1) pozwalał na stabilizację produkcji, masa zarobowa prawidłowo wyrastała i wiązała. W recepturach betonu uzyskano oszczędności w zużyciu wapna minimum 10% oraz gipsu w ilości minimum 60%, w stosunku do wyjściowej produkcji na popiołach lotnych krzemionkowych. Sądzi się, że możliwa będzie większa oszczędność w zużyciu gipsu. Tok produkcji wykazał, że można również zmniejszyć i to znacząco zużycie proszku Al. (minimum 30%).

Obserwacje wskazują również, że w przypadku domielania popiołów fluidalnych (łącznie z pozostałymi składnikami mieszanki spoiwowej) można uzyskać dodatkowo pewne oszczędności w zużyciu energii (około 15%). Popioły fluidalne miały się szybciej do odpowiedniego rozdrobnienia (mniejsza twardość) aniżeli popioły krzemionkowe.

Stwierdzono natomiast podwyższone zużycie wody. Stosunek woda/składniki suche zwiększył się od 0,40÷0,46 do 0,47÷0,60. Jest to zrozumiałe z uwagi na podwyższoną wodożądność popiołów fluidalnych.

## 2.2. Właściwości betonu komórkowego

### 2.2.1. Właściwości fizyko-techniczne

Na podstawie doświadczeń wdrożeniowych spośród wymienionych wcześniej popiołów fluidalnych z trzech elektrowni (oznaczonych F-1; F-2; F-3) wybrano popioły fluidalne F-1 do ciągłej produkcji ABK, jako że z ich zastosowaniem uzyskiwało się najwyższe wytrzymałości na ściskanie.

W tabeli 2 przedstawiono (wg badań laboratorium zakładowego) uśrednione wyniki gęstości w stanie suchym oraz wytrzymałości na ściskanie ABK wykonanego z zastosowaniem różnych wariantów popiołów krzemionkowych. W tabeli 3 przedstawiono uśrednione wyniki gęstości ABK z zastosowaniem popiołów fluidalnych.

Tabela 2. Właściwości ABK – Gęstość 550 – z zastosowaniem popiołów lotnych krzemionkowych (K-1; K-2; K-3)

Pochodzenie popiołu		Właściwości ABK <sup>***)</sup>	
Miejsce podania		Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość na ściskanie (±0,1) [MPa]
Młyn <sup>)</sup>	Dozownia <sup>**)</sup>		
K-1	K-2	560	4,7
K-2	K-3	540	4,9
K-2	K-2	555	4,5

Tabela 3. Właściwości ABK – Gęstość 550 – z zastosowaniem popiołów lotnych fluidalnych jako części spoiwa oraz popiołów lotnych krzemionkowych jako kruszywo

Pochodzenie popiołu		Właściwości ABK <sup>***)</sup>	
Miejsce podania		Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość na ściskanie (±0,1) [MPa]
Młyn <sup>)</sup>	Dozownia <sup>**)</sup>		
F-1	K-1	575	4,4
	K-2	550	4,2
	K-3	580	4,5
F-2	K-3	555	4,1
	K-2	570	3,6
F-3	K-2	540	3,2
	K-3	545	4,1

<sup>)</sup> do mieszanki spoiwowej (jako składnik spoiwa)

<sup>\*\*)</sup> jako kruszywo

<sup>\*\*\*)</sup> średnie dla wyrobów z danego zestawu popiołowego

Analiza wyników badań gęstości i wytrzymałości na ściskanie ABK wykazała że:

- gęstości ABK zarówno z zastosowaniem wyłącznie popiołów krzemionkowych, jak i mieszaniny popiołów fluidalnych i krzemionkowych mieszczą się w granicach ±30 kg/m<sup>3</sup> w stosunku do deklarowanych w danej gęstości. Według normy PN-EN 771-4 p. 5.4.3. dopuszczalne odchyłki zmierzonej gęstości w stanie suchym od deklarowanej wartości tej gęstości nie powinny przekraczać ±50 kg/m<sup>3</sup>.
- wytrzymałość na ściskanie elementów zarówno z zastosowaniem wyłącznie popiołów krzemionkowych, jak i mieszaniny popiołów fluidalnych i krzemionkowych, była wyższa od minimalnej wytrzymałości na ściskanie (min. 2,5 MPa) dla gęstości 550 podanej w załączniku informacyjnym krajowym normy PN-EN 771-4.

Z betonów na mieszaninie popiołów F+K najkorzystniejsze wyniki uzyskiwano dla ABK wykonanego na popiołach F-1. Należy dodać, że badania wyrobów z zastosowaniem popiołów fluidalnych przeprowadzone przez laboratorium ICiMB z prób wdrożeniowych w Prefabet Bielsko-Biała wykazały również korzystne właściwości ABK – przy gęstości 560-570 kg/m<sup>3</sup> w stanie suchym uzyskiwano wytrzymałość na ściskanie powyżej 4 MPa. Przebieg prac wdrożeniowych wykazuje, że z zastosowaniem popiołów fluidalnych można również wytwarzać ABK gęstości 450 kg/m<sup>3</sup> o wytrzymałości na ściskanie powyżej 2 MPa.

Dla wyrobów wykonanych z zastosowaniem popiołów fluidalnych oznaczono również:

- współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$  (wg PN ISO 8301)

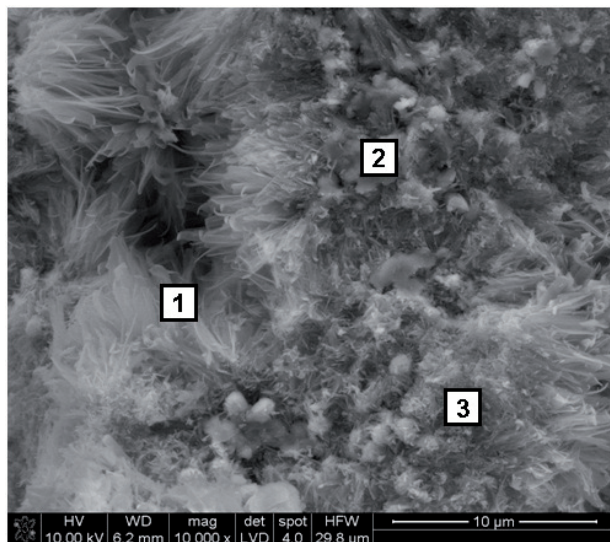
Tabela 4. Wyniki współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od gęstości materiału

Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]
570	0,1176
575	0,1230
550	0,1140
450	0,0950

Są to wartości korzystniejsze aniżeli określone dla tych gęstości w normie PN-EN 1745. Wyroby spełniają dopuszczalne odchyłki wymiarów elementów murowych o kształtach regularnych. Długość, szerokość  $\pm 1,5$  mm oraz wysokość  $\pm 1,0$  mm. Rygorystyczne tolerancje wymiarowe kwalifikują wyrób do wyrobów o dużej dokładności wymiarowej (grupa TLMB wg normy PN-EN 771-4).

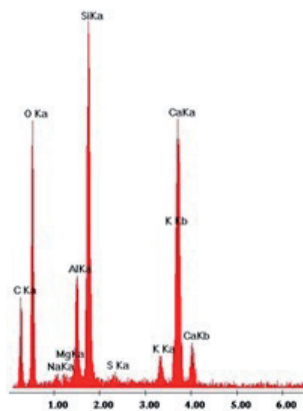
### 2.2.2. Skład fazowy betonu komórkowego

Oceny składu fazowego betonu komórkowego dokonano na podstawie wyników badań rentgenograficznych (XRD) oraz obserwacji wykonanych przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) wykorzystując punktową analizę składu chemicznego (EDS). Stwierdzono, że zasadnicze różnice pomiędzy próbkami betonu komórkowego z wykorzystaniem popiołu krzemionkowego a betonów, w których zawarty jest popiół fluidalny, dotyczą zwiększonej zawartości hydrograntów typu katoit w tych ostatnich (fot. 3. punkt 2.). We wszystkich próbkach stwierdzono występowanie fazy C-S-H i tobermorytu. W betonie komórkowym z zastosowaniem popiołu fluidalnego występują również kalcyt oraz anhydryt. Przykładową mikrostrukturę betonu komórkowego z zastosowaniem popiołów fluidalnych ze spalania węgla kamiennego przedstawiono na fotografii 3.

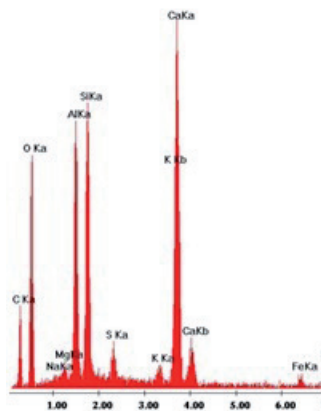


Fot. 3. Analiza SEM ABK z zastosowaniem 33% popiołów fluidalnych ze spalania węgla kamiennego oraz analiza EDS wykonana w punktach 1, 2 i 3 zaznaczonych na zdjęciu

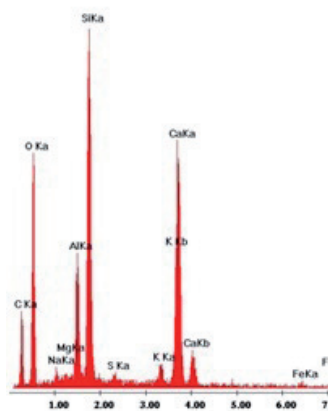




Punkt 1. – faza C-S-H plus tobermoryt



Punkt 2. – hydrogranaty



Punkt 3. – faza C-S-H

Analiza właściwości ABK wykazała, że właściwości ABK z zastosowaniem popiołów fluidalnych są porównywalne do właściwości betonu komórkowego wytwarzanego z wykorzystaniem wyłącznie popiołów krzemionkowych powstających ze spalania węgla kamiennych w tradycyjnych kotłach pyłowych.

### 3. Podsumowanie

1. Podejmując decyzję o wprowadzeniu do wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego popiołów fluidalnych, należy pamiętać, że warunkiem efektywnego ich stosowania jest ciągły monitoring ich jakości. Jest to nowy surowiec, wymaga on bardzo szczegółowego nadzoru przez kadrę technologiczną.
2. Właściwości użytkowe betonów komórkowych z zastosowaniem popiołów fluidalnych są porównywalne, a w niektórych przypadkach korzystniejsze, w stosunku do betonów komórkowych wytwarzanych wyłącznie z popiołów krzemionkowych powstających ze spalania węgla kamiennych w tradycyjnych paleniskach pyłowych.
3. Z dotychczasowego przebiegu wdrożenia produkcji betonu komórkowego w Przedsiębiorstwie Produkcyjno-Handlowym Prefabet Bielsko-Biała wynika, że w ich warunkach w recepturze ABK popiół krzemionkowy można zastąpić popiołem fluidalnym w ilości około 33%.
4. Nowo opracowana, wdrożona technologia wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) z zastosowaniem popiołów fluidalnych jest efektywna na skutek oszczędności w zużyciu surowców (wapna – minimum 10%, surowca siarczanowego – minimum 60%, proszku aluminiowego – minimum 30%) i energii (około 15%) i powinna być pomocna w łamaniu barier stosowania popiołów do wytwarzania ABK. Tym bardziej iż technologia wytwarzania ABK jest technologią bezodpadową, w tym przypadku wykorzystywany jest surowiec wtórny, zatem technologia ta jeszcze bardziej „wpisuje się” w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju.

### Literatura

- [1] Projekt badawczy nr R04 011 03: *Badania przydatności popiołów lotnych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)*. Sprawozdanie ICiMB Oddział Betonów CEBET, Warszawa 2010.
- [2] G. Zapotoczna-Sytek, K. Łaskawiec, P. Gębarowski, J. Małolepszy, J. Szymczak: *Popioły lotne nowej generacji do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego*. Monografia. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Warszawa 2013
- [3] K. Łaskawiec, P. Gębarowski, G. Zapotoczna-Sytek, J. Małolepszy, *Zastosowanie popiołów ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych do produkcji betonów komórkowych*, „Cement, Wapno, Beton” 2012, nr 1 s. 14.
- [4] Patent nr 207649 Mieszanka do wytwarzania betonu komórkowego
- [5] G. Zapotoczna-Sytek, S. Balkovic: *Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia, Właściwości, Zastosowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Stowarzyszenie Producentów Betonu, Warszawa 2013,
- [6] W. Kurdowski, *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenia Producentów Cementu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków – Warszawa 2010
- [7] G. Zapotoczna-Sytek: *Perspektywy popiołów fluidalnych w technologiach produkcji betonu komórkowego XXI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki*, Zakopane 22-24 października 2014 r. red. Andrzej Kornacki. Wyd. Polska Unia UPS s. 99–113 Warszawa
- [8] G. Zapotoczna-Sytek: *Autoklawizowany beton komórkowy na popiołach lotnych*”. Materiały Budowlane 2/2015 s. 53–56

- [9] Polska Norma PN-EN 771-4 „Wymagania dotyczące elementów murowych Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego”
- [10] K. Łaskawiec, P. Gębarowski, G. Zapotoczna-Sytek, J. Małolepszy: „Popioły lotne nowej generacji jako surowiec do wytwarzania ABK”. 5. Międzynarodowa konferencja dotycząca autoklawizowanego betonu komórkowego. Bydgoszcz, 14-17 września 2011, s. 127–138