

Sylwia BRELAK, Ryszard DACHOWSKI  
Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury

## WIELOKRYTERIALNA ANALIZA PORÓWNAWCZA WYROBÓW Z AUTOKLAWIZOWANEGO BETONU KOMÓRKOWEGO MODYFIKOWANEGO MATERIAŁAMI RECYKLINGOWYMI

W artykule dokonano oceny porównawczej wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego modyfikowanego dodatkami w postaci odpadów z tworzyw sztucznych i naturalnych odrzutów poprodukcyjnych za pomocą analizy wielokryterialnej. Do modyfikacji użyto regranulatu polistyrenu wysokoudarowego poddanego pulweryzacji oraz mączki chalcedonitowej powstałej jako odpad poprodukcyjny w kopalni chalcedonitu. Na podstawie przeprowadzonej analizy najkorzystniejszym materiałem do modyfikacji autoklawizowanego betonu komórkowego jest dodatek w postaci polistyrenu wysokoudarowego. Tworzywo użyte do modyfikacji jest produktem odpadowym wpływającym korzystnie na poprawę właściwości fizyko-mechanicznych badanego wyrobu. Materiał ten spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie o 40% oraz obniżenie współczynnika absorpcji wody o 37% w stosunku do tradycyjnego wyrobu.

**Słowa kluczowe:** autoklawizowany beton komórkowy, polistyren wysokoudarowy (HIPS), mączka chalcedonitowa, analiza wielokryterialna

### WPROWADZENIE

Autoklawizowany beton komórkowy jest najbardziej popularnym materiałem budowlanym do wznoszenia ścian murowych. Polski rynek produkcji ABK stanowi około 40% wszystkich materiałów ściennych oraz dostarcza na Europę jedną trzecią zapotrzebowania, a tym samym Polska jest największym producentem tego materiału w Europie. Materiał ten powstał w latach dwudziestych ubiegłego wieku w wyniku kryzysu energetycznego w Szwecji, spowodowanego ograniczeniem zużycia drewna na cele budowlane. Poszukiwano nowego tworzywa łączącego w sobie takie cechy drewna, jak: naturalne pochodzenie surowców, niska masa, wysoka izolacyjność cieplna oraz łatwość obróbki, a przy tym nieposiadającego jego wad, czyli, aby był materiałem niepalnym i niegnijącym. Rozwiązanie znalazł Axel Eriksson, który rozpoczął przemysłową produkcję betonu komórkowego o oficjalnej nazwie Ytong [1].

Ze względu na stały rozwój technologii coraz częściej prowadzone są badania m.in. nad modyfikacją materiałów budowlanych przy zastosowaniu dodatków

poprawiających właściwości fizykomechaniczne produktów ściennych. Celem artykułu jest ocena porównawcza wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego modyfikowanego materiałami recyklingowymi. Oceny gotowych produktów dokonano na podstawie przebadanych właściwości użytkowych wytworzonych wyrobów za pomocą analizy wielokryterialnej metodą sieci pajęczej.

## 1. WŁAŚCIWOŚCI AUTOKLAWIZOWANEGO BETONU KOMÓRKOWEGO

Autoklawizowany beton komórkowy popularność zawdzięcza swoim właściwościom. Najistotniejszą z nich jest jego izolacyjność cieplna, która jest najwyższa spośród wszystkich materiałów konstrukcyjnych do wznoszenia ścian. Wyższą posiadają jedynie materiały niekonstrukcyjne, takie jak np. styropian czy wełna mineralna. Powoduje to możliwość wykonywania z ABK ścian jednowarstwowych, które spełniają wciąż zastrzane wymagania. Charakterystyczną cechą autoklawizowanego betonu komórkowego jest również niska masa. W Polsce klasy gęstości tego materiału mieszczą się w przedziale 300÷900 kg/m<sup>3</sup>, co powoduje, że jest to najlżejszy mineralny materiał ścienny. Niska gęstość objętościowa ABK zwiększa tempo budowy i jej ergonomiczność. Niezależnie od dużych wymiarów bloczków łatwo się je przenosi, ustawia oraz muruje, a tym samym technologia murarska jest prosta. Niewielka masa autoklawizowanego betonu przyczynia się do obniżenia kosztów transportu, ponieważ na jeden środek transportowy przypada większa ilość objętościowa tego materiału niż innych materiałów ściennych. Cecha ta przyczynia się również do racjonalnego wykorzystania zasobów naturalnych, ze względu na niższe ich zapotrzebowanie przy produkcji, w przeliczeniu na 1 m<sup>3</sup> innych materiałów ściennych. Natomiast sam proces wytwarzania nie powoduje uwalniania do środowiska substancji szkodliwych. Skład chemiczny oraz odczyn zasadowy autoklawizowanego betonu komórkowego nie sprzyja rozwojowi drobnoustrojów, co sprawia, iż materiał ten wykazuje odporność na bakterie, grzyby i pleśnie. Elementy z ABK pod względem ognioodporności zostały przypisane do klasy A1. Oznacza to, że tworzywo nie zawiera substancji palnych i nie przyczynia się do powstawania pożaru oraz nie wytwarza dymu, tym samym jest materiałem niepalnym. Przy bezpośrednim działaniu ognia autoklawizowany beton komórkowy nie nagrzewa się i przez długi czas zachowuje właściwości nośne. Obecne technologie produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego oraz właściwości gotowych wyrobów powodują, iż zarówno sam proces wytwarzania, jak i eksploatacja ABK wpisują się w konwencję zrównoważonego rozwoju [1-4].

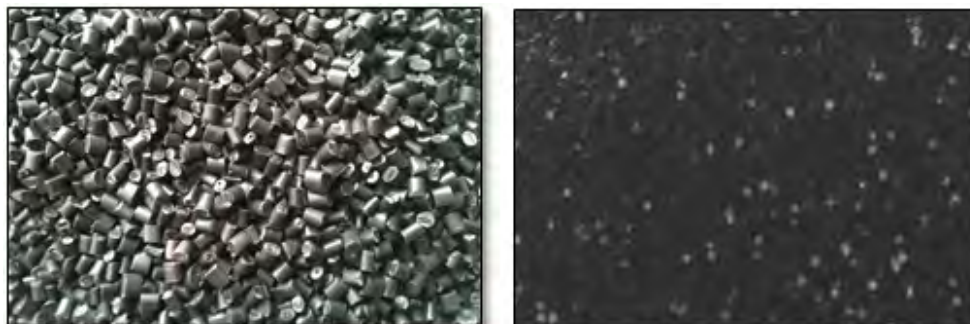
## 2. ANALIZA WIELOKRYTERIALNA METODĄ SIECI PAJĘCZEJ

Analiza wielokryterialna polega na przyjęciu od 3 do 7 kryteriów podrzędnych z grupy techniczno-ekonomicznej. Poszczególnym kryteriom przypisuje się wagi

w celu ujęcia priorytetów oceny. W oparciu o wybrane kryteria oceny przedmiotu analizy porównuje się je za pomocą klasyfikacji medianowej, np. stosując skalę punktową, uwzględniając przy tym wagi dla poszczególnych cech. Natomiast metodę sieci pajęczej stosuje się z uwagi na bardzo zróżnicowany charakter badanych kryteriów oraz stopień ich spełnienia. Metoda polega na obliczeniu pola powierzchni wielokąta określonego przez poszczególne kryteria.

W analizie wielokryterialnej metodą sieci pajęczej poddano ocenie wyroby z tradycyjnego autoklawizowanego betonu komórkowego oraz modyfikowanego dodatkami pochodzącymi z recyklingu, takimi jak polistyren wysokoudarowy (HIPS) oraz mączka chalcedonitowa. Poddane ocenie wyroby zostały wytworzone w technologii SW w warunkach półprzemysłowych w zakładzie produkcyjnym betonu komórkowego. Natomiast badania cech użytkowych zostały przeprowadzane w laboratoriach Politechniki Świętokrzyskiej [5, 6].

Polistyren wysokoudarowy (HIPS - High Impact Polystyrene) zaliczany jest do jednych z najstarszych polimerów styrenowych. Kopolimer ten otrzymywany jest w reakcji szepienia polibutadienu (PB) oraz polistyrenu (PS). Dzięki temu HIPS charakteryzuje się ulepszonymi właściwościami udarności w porównaniu z tradycyjnym PS. Polistyren wysokoudarowy cechuje się niską gęstością objętościową, wysoką sztywnością oraz odpornością na pękanie [7, 8]. Użyty do modyfikacji HIPS to regranulat o gęstości objętościowej wynoszącej  $1,05 \text{ g/cm}^3$  poddany pulweryzacji do frakcji  $630 \mu\text{m}$  (rys. 1).



Rys. 1. Polistyren wysokoudarowy; w formie regranulatu  $4 \times 3 \text{ mm}$ ; o frakcji  $630 \mu\text{m}$

Chalcedonit to osadowa skała krzemionkowa składająca się głównie z chalcedonu, opalu i autogenicznego kwarcu w procentowej ilości wynoszącej  $68,3 \div 95,4\%$ , w mniejszych ilościach występuje kwarc i inne składniki terygentyczne wynoszące  $0,3 \div 6,6\%$  oraz pory wolne i wypełnione stanowiące  $2,0 \div 24,7\%$ . Z uwagi na wysoką zawartość krzemionki chalcedonit jest skałą jednorodną [9]. Chalcedonit charakteryzuje się gęstością właściwą wynoszącą od  $2,62$  do  $2,67 \text{ g/cm}^3$  oraz porowatością  $14 \div 35\%$  [10]. Do badań wykorzystano mączkę chalcedonitową (rys. 2) powstałą

jako materiał odpadowy w kopalni kruszywa chalcedonitowego posiadającą takie same właściwości jak kruszywo.

Do końcowej analizy wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego, pod uwagę wzięte zostały cztery kryteria, takie jak: K1 - cena wyrobów, K2 - ekologia, K3 - średnia wytrzymałość na ściskanie, K4 - średni współczynnik absorpcji wody.



Rys. 2. Mączka chalcedonitowa

Dla poszczególnych kryteriów zestawiono właściwości wybranych wyrobów z ABK dla odmiany 500 (tab. 1).

Tabela 1. Klasyfikacja właściwości wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego

Wyroby	Cena wyrobu [zł/m <sup>3</sup> ]	Ekologia	Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Średni współczynnik absorpcji wody [g/m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ]
Autoklawizowany beton komórkowy	180-280	duża	3,35	105
Autoklawizowany beton komórkowy z dodatkiem HIPS	210 -360	b. duża	4,70	66
Autoklawizowany beton komórkowy z dodatkiem chalcedonitu	180 - 330	b. duża	3,69	107

W tabeli 1 rozrzut cenowy w przypadku tradycyjnego wyrobu wynika z faktu, iż wyrób ten sprzedawany jest w postaci różnego rodzaju bloczków. Do łatwiejszej analizy cenę poszczególnych bloczków przeliczono na 1 m<sup>3</sup>. W przypadku modyfi-

kowanych wyrobów do ceny tradycyjnego wyrobu doliczono koszt zakupu dodatków. W literaturze powszechnej [1, 2] ABK uważany jest za materiał ekologiczny, ponieważ wpisuje się w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju, dlatego tak też został określony w tabeli. Przy wykorzystaniu materiałów pochodzących z recyklingu utylizowany jest materiał, co przyczynia się do zrównoważonego rozwoju, dlatego też wyroby te określono jako bardzo ekologiczne. Średnia wytrzymałość na ściskanie oraz średni współczynnik absorpcji wody zostały określone na podstawie badań, których wyniki przedstawiono w publikacjach [5] i [6].

W celu uwzględnienia priorytetów oceny materiałów wybranych do analizy zastosowano wagi dla poszczególnych kryteriów wg metody eksperckiej (tab. 2).

Tabela 2. **Wagi dla poszczególnych kryteriów oceny**

Cena wyrobu	K1	25%
Ekologia	K2	30%
Średnia wytrzymałość na ściskanie	K3	25%
Średni współczynnik absorpcji wody	K4	20%

W oparciu o ustalone kryteria oceny gotowych wyrobów porównano właściwości tych materiałów za pomocą klasyfikacji medianowej z uwzględnieniem wag poszczególnych właściwości (tab. 3). Przy ocenie zastosowano skalę punktacji od 1 do 5, im więcej punktów, tym lepszy wynik.

Tabela 3. **Klasyfikacja punktów z uwzględnieniem wag za poszczególne kryteria**

Wyroby	K1	K2	K3	K4
Autoklawizowany beton komórkowy	1,3	1,2	0,8	0,6
Autoklawizowany beton komórkowy z dodatkiem HIPS	0,8	1,5	1,3	1,0
Autoklawizowany beton komórkowy z dodatkiem chalcedonitu	1,0	1,5	1,0	0,6

Ze względu na bardzo zróżnicowany charakter badanych kryteriów i stopień ich spełnienia ostatecznego wyboru najlepszego z ocenianych materiałów dokonano metodą sieci pajęczej.

Wzór dla metody sieci pajęczej (pole powierzchni wielokąta)

$$F_i = 0,5 \cdot \sin\alpha \cdot (\sum Z_i \cdot Z_{i+1} + \dots + Z_n \cdot Z_1) \quad (1)$$

gdzie:

$\alpha = 72^\circ$ ;

$Z_i$  - punktacja dla pierwszego kryterium z uwzględnieniem wagi;

$Z_{i+1}$  - punktacja dla kolejnego kryterium z uwzględnieniem wagi;

$Z_n$  - punktacja dla ostatniego kryterium z uwzględnieniem wagi.

Autoklawizowany beton komórkowy

$$F = 0,5 \cdot \sin \alpha \cdot (Z_{11} \cdot Z_{12} + Z_{12} \cdot Z_{13} + Z_{13} \cdot Z_{14} + Z_{14} \cdot Z_{11})$$

$$F = 0,5 \cdot \sin 72^\circ \cdot (1,3 \cdot 1,2 + 1,2 \cdot 0,8 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 1,3) = 1,71$$

Autoklawizowany beton komórkowy z dodatkiem HIPS

$$F = 0,5 \cdot \sin \alpha \cdot (Z_{11} \cdot Z_{12} + Z_{12} \cdot Z_{13} + Z_{13} \cdot Z_{14} + Z_{14} \cdot Z_{11})$$

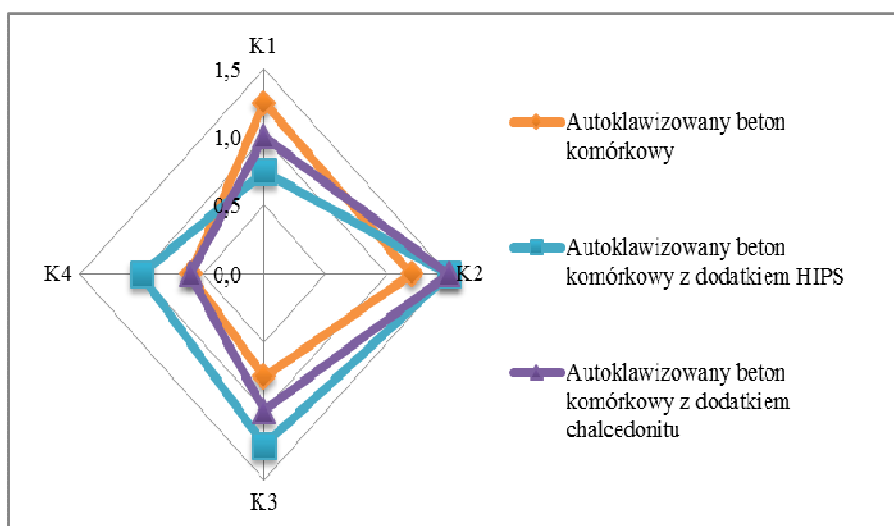
$$F = 0,5 \cdot \sin 72^\circ \cdot (0,8 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot 1,3 + 1,3 \cdot 1,0 + 1,0 \cdot 0,8) = 2,38$$

Autoklawizowany beton komórkowy z dodatkiem chalcedonitu

$$F = 0,5 \cdot \sin \alpha \cdot (Z_{11} \cdot Z_{12} + Z_{12} \cdot Z_{13} + Z_{13} \cdot Z_{14} + Z_{14} \cdot Z_{11})$$

$$F = 0,5 \cdot \sin 72^\circ \cdot (1,0 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot 1,0 + 1,0 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 1,0) = 2,00$$

Wyniki analizy w formie wykresu sieci pajęczej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres sieci pajęczej dla analizowanych materiałów

Na podstawie rysunku 3 stwierdza się, iż największe pole powierzchni wielokąta różnobocznego osiągnął autoklawizowany beton komórkowy z dodatkiem HIPS. Osiągnął on o 39% większe pole niż dla tradycyjnego wyrobu i o 19% niż dla ABK z dodatkiem chalcedonitu. Wyrób ten największą ilość punktów osiągnął dla kryteriów: K3 - średnia wytrzymałość na ściskanie i K4 - średni współczynnik absorpcji wody. Ponadto, osiągnął taką samą liczbę punktów dla kryterium K2 - ekologia, jak dla ABK z dodatkiem chalcedonitu. Autoklawizowany beton komórkowy

z dodatkiem chalcedonu osiągnął o 17% większe pole powierzchni wielokąta różnobocznego niż tradycyjnego wyrobu. Natomiast najmniejsze pole osiągnął autoklawizowany beton komórkowy bez dodatków.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przyjętych kryteriów w analizie metodą sieci pajęczej najkorzystniejszym wariantem pod względem wybranych kategorii jest autoklawizowany beton komórkowy zawierający dodatek w postaci polistyrenu wysokoudarowego. Pomimo wyższego kosztu gotowego wyrobu w stosunku do tradycyjnego ABK, uwzględniając inne cechy produktu zawierającego HIPS jest on najlepszym materiałem do wznoszenia ścian spośród analizowanych. Za jego wyborem przemawiają przede wszystkim argumenty ekologiczne, czyli wykorzystanie surowca odpadowego. Dodatkowym argumentem skłaniającym do modyfikacji autoklawizowanego betonu komórkowego polistyrenem wysokoudarowym jest znaczna poprawa właściwości fizykomechanicznych gotowego wyrobu.

## LITERATURA

- [1] Zapotoczna-Sytek G., Balkovic S., Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia, właściwości, zastosowanie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [2] SPB, Prawie wszystko o betonie komórkowym, Zeszyt 1, Warszawa, 2015.
- [3] Major M., Major I., Wykorzystanie odpadów gumowych w budownictwie zrównoważonym, Budownictwo o Z optymalizowanym Potencjale Energetycznym 2014, 2(14), 38-45.
- [4] Major M., Major I., Kompozyty w budownictwie zrównoważonym - przegląd rozwiązań i przykłady zastosowań, Budownictwo o Z optymalizowanym Potencjale Energetycznym 2015, 1(15), 126-133.
- [5] Dachowski R., Kapała S., Modyfikacja autoklawizowanego betonu komórkowego polistyrenem wysokoudarowym, Materiały Budowlane 2016, 6, 69-70.
- [6] Kapała S., Dachowski R., The influence of the chalcedony on the properties of autoclaved aerated concrete, Procedia Engineering 2016, 699-703.
- [7] Alfarraj A., Nauman E. B., Super HIPS: improved high impact polystyrene with two sources of rubber particles, Polymer 2004, 45, 8435-8442.
- [8] Vilaplana F., Ribes-Greus A., Karlsson S., Chromatographic pattern in recycled high-impact polystyrene (HIPS) - Occurrence of low molecular weight compounds during the life cycle, Polymer Degradation and Stability 2010, 95, 172-186.
- [9] Michel M.M., Charakterystyka chalcedonitu ze złoża Teofilów pod kątem możliwości wykorzystania w technologii uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, Gospodarka Surowcami Mineralnymi 2011, 27, 1, 49-67.
- [10] Tchórzewska D., Pabis J., Kosk I., Nieć M., Nowe zastosowania chalcedonitu jako sorbentu w procesie oczyszczania wód, Przegląd Geologiczny 2001, 49/4, 303-306.

## MULTICRITERIA COMPARATIVE ANALYSIS OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE PRODUCT MODIFIED MATERIALS RECYCLED WASTE

The article presents comparative evaluation of autoclaved aerated concrete products modified additives in the shape of waste plastic material and natural discards of post-production using multicriteria analysis. To modify was used pulverized regrind high-impact polystyrene and meal chalcidonite produced as a waste product in the mine chalcidonite. Based on the analysis carried out, the most preferred material for the modification of autoclaved aerated concrete is a high impact polystyrene additive. The material used for the modification is a waste product that improves the physico-mechanical properties of the product to be tested. This material resulted in an increase in compressive strength by 40% and a reduction in the water absorption coefficient by 37% compared to traditional traction.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, high-impact polystyrene (HIPS), chalcidonite meal, multicriteria analysis