

# Wpływ skrócenia czasu autoklawizacji na właściwości użytkowe betonu komórkowego

THE IMPACT OF REDUCTION TIME AUTOCLAVING ON PROPERTIES OF AERATED CONCRETE

## Streszczenie

W Polsce autoklawizowany beton komórkowy jest wytwarzany wg technologii SW oraz Unipol. Niezależnie od stosowanej technologii proces produkcji składa się z kilku etapów: przygotowania surowców, mieszania składników, wyrastania i wstępnego twardnienia masy w formach, krojenia masy na docelowe elementy, obróbki hydrotermalnej – autoklawizacji, przygotowania wyrobów do transportu po kontroli jakości wyrobów. Jednym z kluczowych etapów w wytwarzaniu ABK jest obróbka hydrotermalna. Jest to etap w którym w masie betonu przebiegają reakcje chemiczne głównie między  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . W artykule przedstawiono badania wpływu skrócenia czasu autoklawizacji na wytrzymałości na ściskanie betonu komórkowego, otrzymanego wg technologii piaskowej SW. Badania prowadzono dla betonów otrzymanych wg różnych receptur i z różnymi dodatkami mineralnymi.

## Abstract

In Poland, autoclaved aerated concrete is generally produced in two different technologies, i.e. SW and Unipol. The AAC technology comprises the following stages of concrete production: compound mixing, concrete mix foaming, preliminary curing, autoclaving. The concrete is autoclaved at 180-200°C and 1.1-1.3 MPa water vapour pressure. Autoclaving time varies from 10h to up to 14h, depending on the density of aerated concrete and its volume. This process is aimed to increase the concrete strength and to stabilize its microstructure, and in particular, the porosity produced during the foaming and curing process. In order to identify new phase products formed in AAC, it is necessary to analyse the underlying system of  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . The article presents a research impact

reduction time autoclaving on compressive strength AAC (received by technology SW). The study was conducted for concrete obtained by different recipes and with various mineral additives.

## 1. Wstęp

Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) jest wytwarzany wg wielu technologii [1]. Niezależnie od stosowanej technologii proces produkcji składa się z kilku etapów: przygotowania surowców, mieszania składników, wyrastania i wstępnego twardnienia masy w formach, krojenia masy na docelowe elementy, obróbki hydrotermalnej – autoklawizacji, przygotowania wyrobów do transportu po kontroli jakości wyrobów. Pomimo prawie stuletniej tradycji autoklawizowanego betonu komórkowego każdy z etapów produkcji wciąż ulega modyfikacji w dążeniu do poprawy właściwości użytkowych gotowego wyrobu. Zmianą ulegają szczególnie warianty recepturowe, sposoby przygotowania surowców (są one wymuszane chociażby ze względu na zmienność surowców w czasie). Prowadzone są również badania nad dodatkami i domieszkami chemicznymi, jak i modernizowane są węzły krojenia bloków wstępnie związanej masy, aby zwiększyć dokładności wymiarów elementów.

Jednym z kluczowych etapów w wytwarzaniu ABK jest obróbka hydrotermalna. Jest to etap w którym w masie betonu przebiegają reakcje chemiczne głównie pomiędzy  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . W zależności od stosunku molowego  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , czasu trwania reakcji i temperatury powstają różne uwodnione krzemiany wapniowe, które decydują o końcowej wytrzymałości, mrozoodporności oraz ograniczeniu skurczu tworzywa [2–5].

W artykule przedstawiono badania zależności: wytrzymałości na ściskanie ABK od ciśnienia maksymalnego nasyconej pary wodnej podczas autoklawizacji i od czasu trwania III fazy cyklu.

## 2. Ogólna charakterystyka autoklawizacji

W zakładach proces autoklawizacji przebiega w środowisku pary nasyconej pod ciśnieniem 1,1–1,3 MPa w temperaturze 180–200°C. Czas i sposób prowadzenia obróbki hydrotermalnej jest zależny od kilku czynników: gęstości betonu komórkowego, wymiarów elementów, wytrzymałości tworzywa wprowadzanego do autoklawu, maksymalnego ciśnienia roboczego w autoklawie, warunków przenoszenia ciepła do wnętrza elementów (metody autoklawizacji) [6]. Dla optymalnego procesu wytwarzania betonu komórkowego istotne są operacje przed procesem autoklawizacji. Kluczowe jest zapobieganie schłodzeniu materiału przed autoklawizacją oraz maksymalne usunięcie powietrza z autoklawu podczas przedmuchu (w metodzie klasycznej) i w okresie działania podciśnienia. Powietrze w autoklawie bardzo utrudnia wymianę ciepła między betonem komórkowym a parą, ponieważ współczynnik oddawania ciepła paropowietrznej mieszaniny (w zależności od ilości powietrza i gęstości betonu) waha się od 0,46 do 7,0  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  podczas, gdy współczynnik przy kondensacji czystej pary wodnej (w zależności od gęstości betonu) wynosi od 23,2 do 46,5  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Nagrzewanie betonu komórkowego odbywa się głównie na skutek konwekcyjnej wymiany ciepła, w wyniku napływu pary w kapilary materiału i jej kondensacji.

Ilość pary przenikającej w jednostce czasu w beton komórkowy zależy od wolnej powierzchni elementów, stopnia porowatości materiału, różnicy temperatury między parą wodną w autoklawie, a powierzchnią nagrzewanego betonu komórkowego oraz od obecności powietrza w autoklawie. Z tego wynika, że ciepła masa betonu z możliwie niską zawartością wody daje możliwość skrócenia czasu autoklawizacji, co powoduje zredukowanie kosztów energii oraz zapobiega uszkodzeniom materiału w trakcie procesu.

Stosowane są dwie podstawowe metody autoklawizacji: metoda klasyczna i metoda z podciśnieniem na początku procesu obróbki [6]. W metodzie klasycznej cykl autoklawizacji jest umownie podzielony na cztery fazy:

- I faza – przedmuch autoklawu parą wodną (po zamknięciu dekla i przy otwartych zaworach wylotowych pary) – następuje usunięcie powietrza z autoklawu;
- II faza – podnoszenie ciśnienia i temperatury do uzyskania roboczego ciśnienia maksymalnego;
- III faza – utrzymywanie stałego ciśnienia i temperatury;
- IV faza – obniżenie ciśnienia do ciśnienia atmosferycznego 0,1 MPa.

Różnica pomiędzy metodą klasyczną, a metodą z zastosowaniem podciśnienia jest w pierwszej fazie procesu. W metodzie z zastosowaniem podciśnienia, po załadowaniu do autoklawu materiału do obróbki następuje zamknięcie autoklawu i obniżenie w nim ciśnienia do około 0,05-0,06 MPa. Powietrze usunięte jest wtedy nie tylko z wolnej od materiału części autoklawu, ale i w znacznej części z otwartych porów betonu komórkowego. Dzięki temu para wodna ma łatwiejszy dostęp do masy betonu i faza wzrostu ciśnienia może być krótsza. Najważniejsze zadanie tego etapu autoklawizacji to jak najefektywniejsze usunięcie powietrza z wnętrza autoklawu.

II faza to faza wzrostu temperatury poprzez doprowadzenie pary wodnej do autoklawu. Liniowy wzrost temperatury masy betonu jest uważany za optymalny parametr dla tej fazy procesu. Jest to w praktyce trudne do osiągnięcia, ponieważ wzrost temperatur masy betonu jest zależny nie tylko od ciśnienia wprowadzanej pary wodnej, ale od gęstości betonu, różnej ilości wody i powietrza pozostałych w porach betonu. Liniowy wzrost temperatury w masie betonu nie oznacza liniowego wzrostu temperatury i ciśnienia pary doprowadzanej do autoklawu. W praktyce na początku ciśnienie jest podnoszone wolniej. Wiąże się to również z tym, że funkcja temperatury i ciśnienia nasyconej pary wodnej jest funkcją wykładniczą. Praktycznie czas podnoszenia temperatury w zakładach produkcyjnych trwa od 150 do 220 minut, w zależności od gęstości i struktury materiału oraz możliwości technicznych.

III faza autoklawizacji to stałe ciśnienie i temperatura (1,1–1,3 MPa; 180–200°C). W tej fazie następuje wyrównanie temperatury w autoklawie i w warstwach bloków betonu. Czas wyrównania temperatury pomiędzy środkiem i zewnętrzną częścią elementów zależy od wymiarów elementów i gęstości betonu (dla grubości elementu 15 cm i gęstości betonu 500 kg/m<sup>3</sup> wyrównanie temperatury następuje z chwilą zakończenia II fazy cyklu; dla grubości elementu 30 cm i gęstości 900 kg/m<sup>3</sup> wyrównanie temperatury następuje po około 8 godzinach III fazy cyklu). Intensyfikacja procesów fizykochemicznych pomiędzy spoiwem i kruszywem (w wyniku tych reakcji powstają uwodnione krzemiany wapnia typu C-S-H) następuje w temperaturze powyżej 170°C, a więc właśnie w trzeciej fazie autoklawizacji. Dla jednorodności wytrzymałości betonu komórkowego ważne jest, aby wymagana temperatura była w całym przekroju materiału przez czas odpowiedni do zajścia procesów pomiędzy spoiwem i kruszywem. W zakładach produkcyjnych ten czas wynosi od 7 do 14 godzin. W literaturze [7] podawane jest, że czas ten powinien trwać przynajmniej 4 godziny. Oznacza to, że teoretycznie stwarzając sprzyjające warunki jest możliwość skrócenia czasu tej fazy o kilka godzin.

W IV fazie autoklawizacji następuje obniżanie temperatury masy betonu, które powinno przebiegać liniowo – równomiernie. Istotne jest powolne zmniejszanie ciśnienia, szczególnie w końcowej fazie procesu. W czasie wzrostu ciśnienia pory betonu komórkowego są wypełniane parą wodną. Jeżeli redukcja ciśnienia pary wodnej następuje zbyt szybko

na końcu fazy redukcji ciśnienia to: więcej wody na jednostkę czasu wyparuje w masie betonu niż są w stanie przepuścić pory. Powoduje to pęknięcia i łuszczenia materiału.

### 3. Analiza wpływu ciśnienia i/lub czasu autoklawizacji na wytrzymałość betonu komórkowego

Głównym założeniem badań była taka modyfikacji autoklawizacji, aby przy skróceniu czasu III fazy procesu właściwości (wytrzymałość na ściskanie) otrzymywanego ABK nie ulegały pogorszeniu.

Badania prowadzono wg metody klasycznej w autoklawie badawczym w ICiMB. Ustalono czas pierwszej fazy – przedmuchu na 5–7 minut. Okres podwyższania ciśnienia do ciśnienia maksymalnego (faza II) i zmniejszania ciśnienia (faza IV) do atmosferycznego zależał od maksymalnego ciśnienia w danym cyklu i wynosił od około 110 minut dla ciśnienia 1,0 MPa, do około 160 minut dla ciśnienia 1,4 MPa. Zmiany szybkość wzrostu i spadku ciśnienia były stałe. Na początku II fazy i na końcu IV fazy zmiany były mniejsze niż na końcu II fazy i początku IV fazy. Czas trzeciej fazy – utrzymania stałego ciśnienia – wynosił – 4, 6 lub 8 godzin. Najkrótszy czas autoklawizacji dla III fazy ustalono na 4 godziny, biorąc pod uwagę doniesienia literaturowe [3], a najdłuższy 8 godzin to czas, w którym zazwyczaj prowadzona jest autoklawizacja w wytwórniach ABK przy standartowych recepturach.

Podczas badań przeprowadzono autoklawizację betonów komórkowych wykonanych wg technologii piaskowej SW (A – z lekką przewagą cementu w spoiwie; D – z dwukrotną przewagą wapna nad cementem w spoiwie; S – z dwu i pół krotną przewagą cementu nad wapnem w spoiwie).

W tabeli 1 zestawiono procentowe zmiany wytrzymałości na ściskanie badanych ABK, w zależności od ciśnienia pary wodnej podczas autoklawizacji, dla trzech czasów III fazy autoklawizacji.

Tabela 1. Procentowa zmiana wytrzymałości na ściskanie ABK w zależności od maksymalnego ciśnienia pary wodnej podczas autoklawizacji, dla poszczególnych czasów III fazy autoklawizacji

|           |   | Zmiana wytrzymałości ABK przy III fazie autoklawizacji trwającej 4 godziny [%] |                |                | Zmiana wytrzymałości ABK przy III fazie autoklawizacji trwającej 6 godzin [%] |                |                | Zmiana wytrzymałości ABK przy III fazie autoklawizacji trwającej 8 godzin [%] |                |                |
|-----------|---|--|----------------|----------------|---|----------------|----------------|---|----------------|----------------|
|           |   | 1,0 do 1,2 MPa   | 1,2 do 1,4 MPa | 1,0 do 1,4 MPa | 1,0 do 1,2 MPa  | 1,2 do 1,4 MPa | 1,0 do 1,4 MPa | 1,0 do 1,2 MPa  | 1,2 do 1,4 MPa | 1,0 do 1,4 MPa |
| Receptura | A | 8  | 7              | 16             | 3   | 14             | 20             | 0   | 7              | 7              |
|           | D | 35   | 0              | 35             | 17  | 0              | 17             | 14  | 7              | 25             |
|           | S | 17   | 14             | 35             | -3  | 7              | 3              | 15  | 3              | 18             |

Analizując uzyskane wyniki z tabeli 1, należy stwierdzić, że dla różnych wariantów recepturowych ABK, bez dodatków mineralnych, we wszystkich przypadkach wraz ze wzrostem stałego maksymalnego ciśnienia pary wodnej podczas autoklawizacji wzrasta

wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego. Największy procentowy przyrost wytrzymałości na ściskanie ABK (35%) obserwujemy przy wzroście ciśnienia autoklawizacji z 1,0 do 1,4 MPa, dla receptury D i S, przy czasie III fazy – 4 godziny.

Również w procesach, gdy czas fazy stałego ciśnienia pary wodnej podczas autoklawizacji ABK wyniósł 6 i 8 godzin, wraz ze wzrostem maksymalnego ciśnienia autoklawizacji następował wzrost wytrzymałości na ściskanie badanego ABK. Jedynie dla receptury S nastąpił niewielki spadek wytrzymałości, jest on jednak w granicach błędu 0,1 MPa.

Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że największy przyrost wytrzymałości na ściskanie nastąpił przy podwyższeniu stałego ciśnienia autoklawizacji z 1,0 MPa do 1,2 MPa.

W tabeli 2 pokazano procentowe zmiany wytrzymałości ABK w zależności od czasów III fazy autoklawizacji dla maksymalnych ciśnień prowadzenia procesu 1,0; 1,2 i 1,4 MPa.

Tabela 2. Procentowa zmiana wytrzymałości na ściskanie ABK w zależności od czasów III fazy autoklawizacji dla poszczególnych maksymalnych ciśnień prowadzenia procesu

|           |   | Zmiana wytrzymałości ABK przy maksymalnym ciśnieniu pary wodnej 1,0 MPa [%] |          |          | Zmiana wytrzymałości ABK przy maksymalnym ciśnieniu pary wodnej 1,2 MPa [%] |          |          | Zmiana wytrzymałości ABK przy maksymalnym ciśnieniu pary wodnej 1,4 MPa [%] |          |          |
|-----------|---|---|----------|----------|---|----------|----------|---|----------|----------|
|           |   | 4 do 6 h  | 6 do 8 h | 4 do 8 h | 4 do 6 h  | 6 do 8 h | 4 do 8 h | 4 do 6 h  | 6 do 8 h | 4 do 8 h |
| Receptura | A | 40  | 23       | 72       | 37  | 16       | 59       | 45  | 10       | 59       |
|           | D | 45  | 24       | 80       | 26  | 11       | 52       | 26  | 32       | 67       |
|           | S | 30  | 10       | 43       | 7   | 31       | 41       | 0   | 26       | 26       |

Analizując tabelę 2 można dojść do wniosku, że przy tym samym maksymalnym ciśnieniu pary wodnej podczas autoklawizacji, wraz z wydłużeniem czasu fazy III, dla wszystkich badanych receptur wzrasta wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego. Zależność tą obserwujemy dla wszystkich receptur i różnych maksymalnych ciśnień pary wodnej podczas autoklawizacji.

Największy procentowy przyrost wytrzymałości na ściskanie ABK od 43% do 80%, dla wszystkich receptur, następuje w autoklawizacji przy ciśnieniu maksymalnym pary wodnej 1,0 MPa. Najmniejsze przyrosty wytrzymałości na ściskanie, niezależnie od długości trwania III fazy i maksymalnego ciśnienia autoklawizacji były obserwowane dla receptury S od 26% do 43%.

Przy stałym maksymalnym ciśnieniu pary wodnej 1,0 MPa w III fazie, największy wzrost wytrzymałości (30–45%) obserwuje się, gdy wydłużono czas tej fazy z 4 do 6 godzin. Dla ciśnienia 1,2 MPa i 1,4 MPa największe wzrosty wytrzymałości na ściskanie odnotowano zarówno przy wydłużeniu III fazy z 4 do 6 godzin (37% i 26% dla receptury A i D przy ciśnieniu 1,2 MPa; 45% dla receptury A przy ciśnieniu 1,4 MPa), jak i z 6 do 8 godzin (31% dla receptury S przy ciśnieniu 1,2 MPa; 32% i 26% dla receptury D i S przy ciśnieniu 1,4 MPa) w zależności od receptury.

## 4. Analiza wpływu ciśnienia i/lub czasu autoklawizacji na beton komórkowy z dodatkiem mineralnym

Celem kolejnego etapu badań było określenie możliwości stosowania zeolitu, jako dodatku mineralnego, który mógłby przy skróceniu III fazy cyklu autoklawizacji zwiększyć wytrzymałość materiału. W tabeli 3 i 4 przedstawiono uzyskane wyniki badań ABK otrzymanego z dodatkiem zeolitu w recepturze.

Tabela 3. Wytrzymałości na ściskanie ABK z dodatkiem zeolitu i ich zmiana w zależności od maksymalnego ciśnienia pary wodnej podczas autoklawizacji, dla poszczególnych czasów III fazy autoklawizacji

|                                   |               | Wytrzymałości ABK i ich zmiana przy III fazie autoklawizacji trwającej 4 godziny |         |                | Wytrzymałości ABK i ich zmiana przy III fazie autoklawizacji trwającej 8 godzin |         |                |
|-----------------------------------|---------------|--|---------|----------------|---|---------|----------------|
|                                   |               | 1,0 MPa  | 1,4 MPa | 1,0 do 1,4 MPa | 1,0 MPa   | 1,4 MPa | 1,0 do 1,4 MPa |
| Ciśnienie III fazy autoklawizacji |               | [MPa]  | [MPa]   | [%]            | [MPa]   | [MPa]   | [%]            |
| Jednostka                         |               | [MPa]  | [MPa]   | [%]            | [MPa]   | [MPa]   | [%]            |
| Receptura                         | A             | 2,7  | 3,3     | 22             | 3,5   | 4,0     | 14             |
|                                   | A+20% zeolitu | 3,3  | 4,05    | 23             | 4,6   | 4,5     | -2             |
|                                   | A+40% zeolitu | 2,6  | 3,4     | 30             | 3,4   | 3,8     | 12             |

Tabela 3 obrazuje, że dla badanych receptur i czasu trwania III fazy autoklawizacji 4 i 8 godzin wraz ze wzrostem maksymalnego ciśnienia wytrzymałość na ściskanie ABK wzrasta (z wyjątkiem receptury A+20% zeolitu – 8 godzin). Wzrost wytrzymałości na ściskanie ABK jest wyższy dla czasu autoklawizacji w III fazie cyklu (4 godziny). Spowodowane jest to tym, że podwyższenie ciśnienia autoklawizacji dla czasu 4 godziny powoduje w betonie przyspieszenie reakcji uwodnionych krzemianów wapnia sprzyjających zwiększeniu wytrzymałości na ściskanie.

Tabela 4. Wytrzymałości na ściskanie ABK z dodatkiem zeolitu i ich zmiana w zależności od czasów III fazy autoklawizacji dla maksymalnych ciśnień prowadzenia procesu 1,0 i 1,4MPa

|               |               | Wytrzymałości ABK i ich zmiana przy maksymalnym ciśnieniu pary wodnej 1,0 MPa |           |          | Wytrzymałości ABK i ich zmiana przy maksymalnym ciśnieniu pary wodnej 1,4 MPa |           |          |
|---------------|---------------|---|-----------|----------|---|-----------|----------|
|               |               | 4 h [MPa]   | 8 h [MPa] | 4 do 8 h | 4 h [MPa]   | 8 h [MPa] | 4 do 8 h |
| Czas III fazy |               | [MPa]   | [MPa]     | [%]      | [MPa]   | [MPa]     | [%]      |
| Jednostka     |               | [MPa]   | [MPa]     | [%]      | [MPa]   | [MPa]     | [%]      |
| Receptura     | A             | 2,7   | 3,5       | 30       | 3,3   | 4,0       | 21       |
|               | A+20% zeolitu | 3,3   | 4,6       | 39       | 4,05  | 4,5       | 11       |
|               | A+40% zeolitu | 2,6   | 3,4       | 30       | 3,4   | 3,8       | 12       |

Analizując otrzymane wyniki badań zestawione w tabeli 3 i 4 należy stwierdzić, że w przypadku zastąpienia 20% piasku zeolitem następuje wzrost wytrzymałości na ściskanie w każdych badanych warunkach obróbki hydrotermalnej (różne ciśnienie i czas III fazy cyklu).

Wyniki badań przedstawione w tabeli 3 pokazują, że przy tym samym czasie III fazy autoklawizacji, 20 % dodatek zeolitu w recepturze powodował, że wyniki wytrzymałości na ściskanie ABK z tym dodatkiem są na poziomie wyników wytrzymałości ABK bez tego dodatku, otrzymanego przy wyższym ciśnieniu. Przykładowo dla czasu III fazy autoklawizacji  $t=4h$ , wytrzymałość na ściskanie ABK bez dodatku przy ciśnieniu cyklu  $p=1,4$  MPa wynosi  $R=3,3$  MPa, podczas gdy dla ABK z 20% dodatkiem zeolitu taką wytrzymałość uzyskano dla ciśnienia cyklu 1,0 MPa. Dla czasu III fazy autoklawizacji  $t=8h$  wytrzymałość na ściskanie ABK bez dodatku przy ciśnieniu cyklu  $p=1,4$  MPa wynosi  $R=4,0$  MPa, gdy dla ABK z 20% dodatkiem zeolitu uzyskano wyższą wytrzymałość  $R=4,6$  MPa, przy niższym ciśnieniu autoklawizacji  $p=1,0$  MPa.

Natomiast analizując badania zawarte w tabeli 4 należy stwierdzić, że przy tym samym ciśnieniu III fazy autoklawizacji 20% dodatek zeolitu w kruszywie spowodował, że wyniki wytrzymałości na ściskanie ABK z tym dodatkiem są na poziomie wyników wytrzymałości ABK bez tego dodatku otrzymanego przy dłuższym czasie autoklawizacji.

W przypadku zastąpienia 40% piasku zeolitem wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu przy tych samych warunkach autoklawizacji są na poziomie wyników ABK bez dodatku.

## 5. Analiza wyników badań

W oparciu o przedstawione wyniki badań należy stwierdzić, że podwyższenie ciśnienia oraz temperatury ma mniejszy wpływ na wzrost wytrzymałość na ściskanie (przy czasie trwania III fazy cyklu 8 godzin). W ciągu tego czasu niezależnie czy ciśnienie wynosi 1,0 MPa czy 1,4 MPa warunki podczas autoklawizacji były wystarczające, aby w tym czasie zaszła większość reakcji pomiędzy spoiwem a kruszywem (w wyniku tych reakcji powstają uwodnione krzemiany wapnia typu C-S-H). W próbkach poddanych obróbce w warunkach, które wiążą się z wydłużeniem III fazy cyklu autoklawizacji zaobserwowano większy przyrost wytrzymałości na ściskanie przy ciśnieniu 1,0 MPa, niż przy 1,4 MPa. Taką zależność należy tłumaczyć tym, że przy wyższym ciśnieniu i temperaturze warunki termodynamiczne reakcji w betonie, prowadzące do powstania uwodnionych krzemianów wapnia są korzystniejsze i zachodzą w krótszym czasie niż podczas autoklawizacji przy niższym ciśnieniu pary wodnej.

Podsumowując całokształt otrzymanych wyników badań należy stwierdzić, że:

- wytrzymałość na ściskanie ABK przy tym samym czasie autoklawizacji wzrasta wraz ze wzrostem maksymalnego ciśnienia nasyconej pary wodnej podczas procesu;
- wytrzymałość na ściskanie ABK przy tym samym maksymalnym ciśnieniu nasyconej pary wodnej podczas procesu bardzo wyraźnie wzrasta wraz z wydłużeniem fazy stałego ciśnienia;
- podniesienie ciśnienia autoklawizacji jest korzystne ze względu na lepsze właściwości fizyko-techniczne – wytrzymałości na ściskanie – otrzymywanego betonu komórkowego;
- skrócenie czasu III fazy wpływa niekorzystnie na wytrzymałość na ściskanie;
- drogą do ewentualnego skrócenia czasu autoklawizacji jest zastosowanie dodatków mineralnych (zeolit), które mogą powodować zwiększenie albo utrzymanie na tym



samym poziomie właściwości fizyko-technicznych ABK pomimo skrócenia czasu III fazy cyklu.

## **Literatura**

- [1] S. Balkovic, G. Zapotoczna-Sytek, Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia. Właściwości. Zastosowanie, PWN Warszawa 2013.
- [2] H. F.W Taylor, The chemistry of cements, Academic Press, London 1964.
- [3] Kurdowski W., Chemia materiałów budowlanych, Uczelniane wydawnictwa naukowo-techniczne, Kraków 2000.
- [4] Hong S.-Y., Glasser F.P., Phase relations in the CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system to 200°C at saturated steam pressure, *Cem. Conc. Res.* (34), 2004, s. 1529–1534.
- [5] F. Liu, L. Zeng, J. Cao, J. Li: Preparation of ultra-light xonotlite thermal insulation using carbide slag *Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 25 (2010), s. 295–297.
- [6] F. Grudziński, *Procesy cieplne w technologii betonów*, PWN Warszawa 1976.
- [7] M. Haas, Optimal autoclaving, 4th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, London, 2005.