

# THE INFLUENCE OF CO-COMBUSTED BIOMASS-COAL FLY ASH ON LIMITING ALKALI-SILICA REACTION

## Abstract

*The increasing application of the fossil fuels-biomass co-combustion causes the increased interest in fly ashes produced in this process. The literature data indicate that the fly ash recovered from the co-combustion of coal and biomass and conforming to the requirements defined in the standards may also influence the extent of the ASR expansion. Fly ashes contribute to better durability of concrete in terms of alkali-silica reaction effects. Biomass fly ash chemical composition is different from that of the fly ash recovered from the combustion of coal. The ashes are more finely divided and contain less unbound CaO as compared to calcareous ashes.*

**Keywords:** Alkali-silica reaction, fly ash, co-combusted biomass-coal

## 1. Introduction

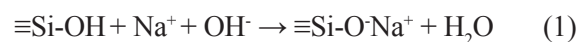
Concrete is one of the most commonly used building materials nowadays. Its properties are directly dependent on the parameters of hardened cement paste and aggregate as well as on the interaction between these two constituents. Products of this interaction affect the durability of concrete and may result in it being severely damaged, for example, due to the alkali-silica reaction (ASR). Sodium potassium silicate gel or sodium potassium calcium silicate gel produced as a result of the ASR form along cleavage planes of aggregate, in its pores and on the surface of the grains. They tend to absorb water and expand in concrete, leading to damage. Detrimental processes are very slow and appear years after the concrete was placed [9, 11].

One of the methods employed to mitigate the effects of ASR is adding mineral material to concrete in the form of an admixture or as a component of blended cement. Data from the literature indicate an advantageous role of fly ash in preventing excessive expansion [10]. As a result of a pozzolanic reaction more C-S-H phase fills the pores and decreases permeability in concrete by limiting ion mobility.

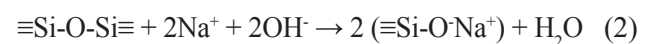
## 2. Mechanism of alkali-silica reaction

The alkali-silica reaction is the process that progresses very slowly and its deleterious effects

may appear more than ten years after the concrete was placed. The reaction mechanism is quite complex and numerous studies have shown that many issues associated with it still need to be understood. Dent Glasser and Kataoka have described the mechanism of ASR. Their model is based on the properties of colloidal silica and the hypothesis that the water-silica particle interfacial reactive zone is covered with a layer of silanol groups [9]. Silica from aggregate reacts with sodium hydroxide and potassium hydroxide solutions. Cement paste pores contain large numbers of sodium and potassium ions. The reaction starts with a specific acid-base reaction, where the acidic silanol groups react with alkali hydroxides. The action of Na<sup>+</sup> and OH<sup>-</sup> ions on the aggregate particles results in neutralization of the silanol groups.



The next stage of the reaction develops in the high pH environment and ends with the disruption of oxygen bonds. Sodium and potassium ions balance the negative charges present on the terminal oxygen ions.



Some silanol groups remain on the silica surface. The three-dimensional structure of quartz is destroyed and the polymineral, well soluble in water sodium

potassium silicate gel is formed as a result [9]. The extent of the reaction depends on the content of sodium and potassium ions in the liquid phase, their action on the reactive silica surfaces, and on the level to which the quartz structure has been disordered [8, 11]. Expansion from ASR is dependent mostly on humidity and temperature, the levels of which determine the properties of the sodium potassium silicate gel. It has been reported that the most pronounced expansion occurs at room temperature and relative humidity of 80% [8].

Fly ash is a widely recognized mineral admixture used to produce cement, concrete and multi-component binders. Its role in the alkali reaction control is significant. Fly ash added to cement helps prevent detrimental expansion in concrete or reduces the expansion to the allowable level. The requirements relating to the use of fly ash as a concrete admixture are defined in PN-EN 450-1+A1 (2012).

The literature reports three hypotheses to explain the reaction mechanism of pozzolanic admixtures: decreased permeability (reducing effective ion diffusion coefficients), bonded alkalis and consumed calcium hydroxide in the pozzolanic reaction and uniform distribution of calcium hydroxide in the mortar [6]. Despite the fact that fly ash contains more alkalis than Portland cement does, its small amount is soluble in water (approx. 0.1%  $\text{Na}_2\text{O}_e$ ) [4]. To conclude, fly ash as a pozzolanic admixture contributes to the reduction of  $\text{Na}_2\text{O}_e/\text{SiO}_2$  ratio in the silica gel. A sodium and potassium oxide content in concrete pore solutions is dependent on the percentage amount of ash to cement ( $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$  contents decrease with an increase in ash content in cement). It is assumed that the replacement of 30% cement high in sodium and potassium by fly ash in the paste and concrete may reduce the expansion [9].

### 3. Characteristics of coal-biomass co-combusted fly ash

Fly ashes recovered from the combustion of coal (siliceous) or lignite (calcareous) and from the co-combustion of biomass and coal are used as a mineral additive to cement. Beneficial effect of the siliceous and calcareous fly ashes on the alkali-silica reaction has been widely addressed in the literature [5, 14]. The effects of an addition of coal-biomass co-combusted fly ash have not been studied in Poland in terms of its influence on the ASR.

Biomass fly ash chemical composition is different from that of the fly ash recovered from the combustion of coal. The biomass fly ash is richer in  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,

$\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$  while containing less  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , as compared to coal-derived fly ash [3, 7]. The number of glassy components responsible for the pozzolanic reaction increases with an increasing amount of co-combusted biomass, which is the effect of the higher content of  $\text{CaO}$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$  [4]. Biomass contains approximately four times more oxygen, two times less carbon and less sulphur and nitrogen. Consequently, it has a high content of volatile matter, i.e., components emitted when the fuel is heated to over 100°C. Effective combustion of such fuels calls for special design of the combustion chamber as the air for the combustion enters the chamber above the fuel deposit, where the volatile matter occurs. Other technical challenges associated with biomass combustion include the potential for slagging and fouling in the combustor and corrosion accelerated by  $\text{KCl}$  that accumulates on the pipes. Biomass is less calorific and higher in moisture than coal. The combustion temperature decreases during biomass-coal co-combustion with a consequential decrease in the glassy phase content and increase in unburnt coal amount. The typically increased moisture content in the biomass makes the supply and storage of the biomass ash difficult.

The main advantage of the biomass, i.e., wood chips, straw, plant fibres, dried fruit, etc., as compared to fossil fuels is its availability. The EN 450-1 [4, 14] defines the physical and chemical properties of the fly ash derived from the co-combustion. Many different types and proportions of biomass for co-combustion have been studied to find that co-combustion ashes have lower bulk density, lower concentrations of naturally occurring radioactive constituents and finer size as compared to the products of coal combustion [5].

### 4. Application of biomass ash to limiting alkali-silica reaction

Biomass co-combustion-derived fly ashes are used less widely as mineral additives to cement or concrete than calcareous or siliceous ashes which are assumed to be able to prevent expansion in concrete caused by the alkali-silica reaction. The literature data indicate that the fly ash recovered from the co-combustion of coal and biomass and conforming to the requirements defined in the standards may also influence the extent of the ASR expansion. The quality and amount of the ash produced for the coal and biomass co-combustion is dependent on the type of the biomass used. Information about the chemical composition of the biomass helps

determine its suitability for use in technological processes. The properties, chemical composition of coal and biomass used, as well as a proper choice of the boiler allow obtaining desired properties of the co-combustion ashes [5, 13]. According to American standards fly ash derived from biomass co-combustion is not suitable for use in concrete. Alternatively, the latest European regulations allow for the use of co-combusted fly ash as a mineral additive, which, when its composition meets the standards, can have an advantageous influence on the ASR.

Research conducted by Shearer et al. [12], devoted to determining the effect of co-combusted biomass on the ASR, was based on the requirements laid down in ASTM C1260 [1] and ASTM C1567 [2]. They found that unlike the controls without the additive, all the samples containing fly ash contributed to suppressing expansion due to ASR.

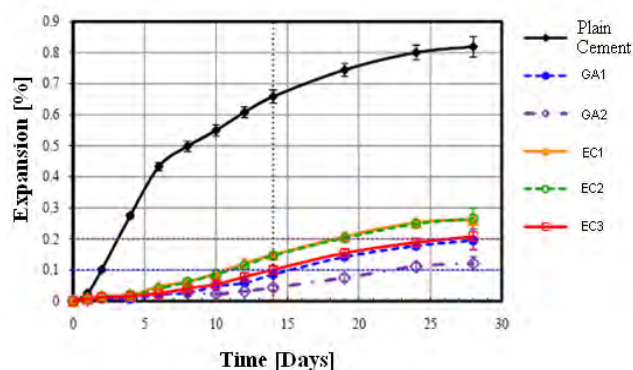


Fig. 1. Expansion of samples from coal combustion (GA1 and EC1) and coal-biomass co-combustion (GA2, EC2 and EC3) compared to the sample containing no fly ash (sample with plain cement) [11].

As the co-combustion affected the morphology, finer ash particles had a lower CaO content, thus exhibiting better pozzolanic properties. Fly ashes with high alkali or calcium contents are less effective in controlling ASR. The analysis of the results they obtained revealed that the ashes from biomass co-combustion might absorb alkalis from the pore solution, which may have an advantageous effect on mitigating the alkali-silica reaction. Coal-biomass (deciduous wood waste) yielded the best results. Expansion due to the alkali-silica reaction was 0.043% and 0.121% after 14 and 28 days, respectively. In the samples that did not contain mineral additives in the form of fly ash, the expansion reached 0.0658% at 14 days and 0.819% at 28 days [12].

## 5. Summary

The use of fly ash in cement or concrete improves the properties of fresh or hardened concrete. This characteristic helps reduce the amount of cement clinker in binders. Fly ashes contribute to better durability of concrete in terms of alkali-silica reaction effects. Little is known about the role of biomass co-combustion fly ash. The data available indicate that these ashes are more finely divided and contain less unbound CaO as compared to calcareous ashes. All these properties may have a beneficial effect on the expansion from the alkali-silica reaction.

## References

- [1] ASTM C 1260-94 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortal-Bar-Test).
- [2] ASTM C 1567-13 Standard Test Method for Determining Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortal- Bar Method).
- [3] Czech.T., Sobczyk T., Jaworek A., Krupa A.: *Porównanie własności fizycznych popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego, brunatnego i biomasy*, Konferencja POL-EMIS, Sienna 2012, pp. 73-82.
- [4] Giergiczny Z.: *Rola popiołów lotnych wapieniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [5] Giergiczny Z.: *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [6] Konopska-Piechurska M., Jackiewicz-Rek W.: *Reaktywność alkaliczna kruszyw jako czynnik zagrażający trwałości konstrukcji betonowych w Polsce*, Proc. of XXVI Conf. Awarie Budowlane, Szczecin 2013, pp. 833-842
- [7] Kosior-Kazberuk M.: *Nowe dodatki mineralne do betonu*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2011, pp. 47-55
- [8] Kurdowski W.: *Chemia cementu i betonu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [9] Owsiak Z.: *Reakcje kruszyw krzemionkowych z alkaliemi w betonie*, Polski Biuletyn Ceramiczny, 72, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2002.
- [10] Owsiak Z.: *Wpływ dodatków mineralnych na ekspansję zapraw cementowych dojrzewających w podwyższonej temperaturze*, Cement Wapno Beton, 1 (2008), pp. 33-39.
- [11] Owsiak Z., Zapała J.: *Rewiew of the Laboratory Methods Applied to Assess the Reactivity of Alkaline Siliceous Aggregate in Concrete*, Structure and Environment, 2 (2011), pp. 21-26.

- [12] Shearer C.R., Yeboah N., Kurtis E.K., Burns S.E.: *Evaluation of biomass fired and co-fired fly ash for alkali-silica reaction mitigation in concrete*, 14<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, May 20-25, 2012.
- [13] Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M.: *Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych*

- na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową*, Energetyka i Ekologia, 3 (2006), pp. 207-220.
- [14] Wolska-Kotańska Cz.: *Rola wybranych dodatków mineralnych i domieszek chemicznych w reakcjach alkalia-kruszywo w betonie*, Prace ITB, 1 (1996).

Zdzisława Owsiak  
Agnieszka Wójcik

## Wpływ popiołu lotnego pochodzącego ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na ograniczenie reakcji alkalia-krzemionka

### 1. Wstęp

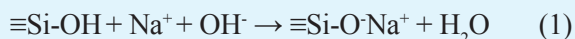
Beton jest jednym z powszechnie stosowanych materiałów budowlanych we współczesnym budownictwie. Właściwości betonu zależą od parametrów stwardniałego zaczynu, kruszywa oraz oddziaływania kruszywa z zaczynem cementowym. Produkty tych reakcji wpływają nie tylko na trwałość, ale mogą również prowadzić do destrukcji betonu, przykładem są reakcje kruszywo-alkalia. Żel krzemianu sodowo-potasowego lub żel krzemianu sodowo-potasowo-wapniowego jako produkty tej reakcji, pojawiają się w płaszczyznach łupliwości kruszywa, w jego porach, a także na powierzchni ziaren. Mają one tendencję do wchłaniania wody i tym samym powiększenia objętości, w wyniku czego następuje destrukcja betonu. Procesy destrukcji konstrukcji betonowej w wyniku reakcji alkalia-krzemionka są bardzo powolne i zwykle pojawiają się po kilku bądź kilkunastu latach [9, 11].

Jednym ze sposobów ograniczenia skutków reakcji alkalia-krzemionka jest zastosowanie dodatków mineralnych do betonu lub zastosowanie cementu z dodatkami. Dane literaturowe wskazują na korzystną rolę popiołów lotnych w wyeliminowaniu nadmiernej ekspansji [10]. W wyniku reakcji pucolanowej powstająca większa ilość fazy C-S-H wypełnia pory i tym samym zwiększa szczelność betonu ograniczając ruchliwość jonów.

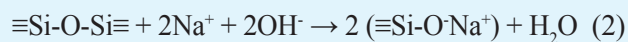
### 2. Mechanizm reakcji alkalia-krzemionka

Reakcja alkalia-krzemionka jest procesem zachodzącym bardzo powoli, a jej negatywne skutki mogą

ujawnić się dopiero po kilkunastu, bądź kilkudziesięciu latach. Przebieg tej reakcji jest bardzo złożony, a liczne badania wciąż pokazują, jak wiele zagadnień wymaga wyjaśnienia. Mechanizmy reakcji alkalia-krzemionka opisują Dent Gessler oraz Kataoka. Model ten oparty jest na właściwościach krzemionki koloidalnej oraz hipotezie, że reaktywna powierzchnia międzyfazowa woda-ziarno krzemionki pokryta jest warstwą grup silanolowych [9]. Krzemionka, która zawarta jest w kruszywie wchodzi w reakcję w roztworze wodnym z wodorotlenkami sodu lub potasu. Natomiast pory zaczynu zawierają duże ilości jonów sodu oraz potasu. Pierwszy etap reakcji alkalicznej to reakcja charakterystyczna kwasów z zasadami. Grupy silanolowe reagują z wodorotlenkiem sodu i potasu. Wynikiem oddziaływania jonów  $\text{Na}^+$  i  $\text{OH}^-$  na ziarno krzemionki jest zubożenie grup silanolowych.



Kolejnym etapem jest reakcja zachodząca w środowisku wysokiego pH. Rezultatem tej reakcji jest zerwanie mostków tlenowych. Oddziaływanie jonów sodu lub potasu powoduje zrównoważenie ujemnych ładunków niemostkowych jonów tlenu.



Część grup silanolowych nadal pozostaje na powierzchni krzemionki. Ważnym etapem przebiegu tej reakcji jest zniszczenie trójwymiarowej struktury kwarcu. Wynikiem tego procesu jest powstanie po-



limineralnego żelu krzemianu sodowo-potasowego, który jest dobrze rozpuszczalny w wodzie [9]. Zakres reakcji uzależniony jest od ilości jonów sodu i potasu w fazie ciekłej, oddziaływania jonów sodu i potasu na powierzchnie reaktywnej krzemionki, oraz poziomu zdefektowania struktury kwarcu [8, 11]. Natomiast ekspansja spowodowana reakcją alkalia-krzemionka jest w dużej mierze zależna od wilgotności i temperatury. Od parametrów tych czynników zależą właściwości powstałego żelu krzemianu sodowo-potasowego. Dane literaturowe przedstawiają, że najsilniejsza ekspansja występuje w temperaturze pokojowej, przy wilgotności względnej 80% [8].

Popioły lotne są od wielu lat cennym dodatkiem mineralnym stosowanym do produkcji cementu, betonu oraz spoiw wieloskładnikowych. Pełnią one bardzo ważną rolę w ograniczeniu reakcji alkalicznej. Dodatek do cementu popiołu lotnego pozwala zapobiec pojawieniu się ekspansji niszczącej beton lub powoduje jej obniżenie do dopuszczalnego poziomu. Wymagania dotyczące popiołów lotnych stosowanych jako dodatek do betonu określone są w normie [PN-EN 450-1+A1 2012].

Na podstawie danych literaturowych przedstawia się trzy hipotezy tłumaczące mechanizm działania dodatków pucolanowych: zmniejszenie przepuszczalności (powoduje to zmniejszenie efektywnych współczynników dyfuzji jonów), wiązanie alkaliów oraz wodorotlenku wapnia w reakcji pucolanowej i równomierne rozmieszczenie wodorotlenku wapnia w zaczynie [6]. Pomimo iż popioły lotne w swoim składzie zawierają więcej alkaliów niż cement portlandzki, z tego względu, że występują w szkło, to niewielka ich ilość jest rozpuszczalna w wodzie (ok. 0,1%  $\text{Na}_2\text{O}_e$ ) [4]. Reasumując można stwierdzić, że popiół lotny jako dodatek pucolanowy wpływa na zmniejszenie stosunku  $\text{Na}_2\text{O}_e/\text{SiO}_2$  w żelu krzemionkowym. Ilość tlenków sodu i potasu znajdująca się w porach betonu zależy od procentowej zawartości popiołu w stosunku do cementu (zawartość  $\text{Na}_2\text{O}$  i  $\text{K}_2\text{O}$  maleje wraz ze wzrostem zawartości popiołu w cemencie). Przyjmuje się, że zastąpienie 30% cementu o dużej zawartości sodu i potasu przez popiół lotny w zaprawie i betonie może powodować redukcję ekspansji [9].

### 3. Charakterystyka popiołu lotnego pochodzącego ze współspalania biomasy i węgla kamiennego

Popioły lotne pochodzące ze spalania węgla kamiennego (krzemionkowe), węgla brunatnego (wapienne) oraz współspalania biomasy z węglem ka-

miennym, są stosowane jako dodatek mineralny do cementu. Pozytywny wpływ dodatku popiołu lotnego krzemionkowego i wapiennego na reakcję alkalia-krzemionka jest szeroko opisywany w literaturze [5, 14]. Natomiast dodatek popiołu lotnego pochodzącego ze współspalania węgla kamiennego z biomasą nie był w Polsce badany pod kątem reakcji alkalicznej.

Popioły ze współspalania biomasy mają bardziej zróżnicowany skład chemiczny niż popioły ze spalania węgla. Charakteryzują się większą zawartością  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  oraz  $\text{P}_2\text{O}_5$ , i mniejszą ilością  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , w porównaniu z popiołami ze spalania węgla [3, 7]. Ilość składników szklitych, które odpowiadają za reakcję pucolanową, wzrasta wraz ze zwiększającą się ilością współspalanej biomasy, jest to efekt wyższej zawartości  $\text{CaO}$  i  $\text{P}_2\text{O}_5$  [4]. Biomasa zawiera średnio około czterokrotnie więcej tlenu, dwukrotnie mniej węgla, oraz mniej siarki i azotu. Konsekwencją tego składu jest wysoka zawartość części lotnych, czyli składników wydzielających się przy podgrzewaniu paliwa powyżej  $100^\circ\text{C}$ . Efektywne spalanie tego typu paliw wymaga specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych m.in. komór spalania, powietrze do spalania wprowadzane jest powyżej złoża paliwa, tam gdzie pojawiają się części lotne. Podczas spalania biomasy pojawiają się również zagrożenia związane z zanieczyszczeniem się powierzchni komór spalania oraz korozją. W przypadku spalania samej biomasy wydziela się  $\text{KCl}$ , który kumuluje się na rurach przyspieszając proces korozji. Biomasa ma niższą niż węgiel kaloryczność oraz wyższą wilgotność. Podczas jej współspalania z węglem obniża się temperatura spalania, a co za tym idzie, zmniejsza się zawartość fazy szklitej, natomiast zwiększa ilość nie spalonego węgla. Duża wilgotność biomasy jest również problemem przy transportowaniu i magazynowaniu tego typu popiołów.

Główną zaletą zastosowania biomasy jest jej dostępność w porównaniu z paliwami kopalnymi. Materiałami roślinnymi współspalanymi z węglem mogą być: wióry drzewne, słoma, włókna roślinne, susz owocowy i itp. Właściwości fizyczne i chemiczne popiołów lotnych pochodzących ze współspalania muszą spełniać wymagania określone w normie EN 450-1 [4, 14]. Badania jakie zostały przeprowadzone przy użyciu wielu rodzajów biomasy, spalanych w różnych proporcjach z węglem ukazują, że popioły ze współspalania charakteryzują się mniejszą gęstością objętościową i mniejszym stężeniem naturalnych pierwiastków promieniotwórczych oraz drob-

niejszym uziarnieniem w porównaniu do produktów pochodzących ze spalania samego węgla [5].

#### 4. Zastosowanie popiołu z biomasy w ograniczeniu reakcji alkalia-krzemionka

Zastosowanie popiołów lotnych pochodzących ze współspalania biomasy jako dodatków mineralnych do cementu czy betonu nie jest tak rozpowszechnione jak użycie popiołów wapiennych i krzemionkowych. Obecnie przyjmuje się, że właściwe wykorzystanie popiołów lotnych krzemionkowych oraz wapiennych może zapobiec ekspansji wywołanej reakcją alkalia-krzemionka w betonie. Dane literaturowe wskazują, że także popioły pochodzące ze współspalania biomasy spełniające wymagania zawarte w normach mogą korzystnie oddziaływać na ograniczenie wielkości ekspansji alkalicznej. Jakość oraz ilość popiołu jaki powstaje ze spalania mieszaniny węgla i biomasy jest uwarunkowana rodzajem używanej biomasy. Informacja o składzie chemicznym biomasy pozwala na określenie możliwości jej zastosowania w procesach technologicznych. Biorąc pod uwagę właściwości, skład chemiczny surowca węglowego i biomasy oraz dobierając odpowiedni typ kotła, można wpłynąć na właściwości popiołów wytwarzanych podczas spalania [5, 13]. Według amerykańskich standardów popioły pochodzące ze współspalania biomasy nie nadają się do stosowania jako dodatek mineralny do betonu, jednak według najnowszych standardów europejskich istnieje możliwość stosowania takiego popiołu, a co więcej przy odpowiednim składzie chemicznym może mieć pozytywny wpływ na reakcję alkalia-krzemionka.

Badania wykonane przez Shearera i innych [12] mające na celu określenie wpływu popiołu ze współspalania biomasy na reakcję alkalia-krzemionka zostały przeprowadzone w oparciu o normy ASTM C1260 [1] oraz ASTM C1567 [2]. Badania wykazały, że wszystkie próbki zawierające popioły lotne przyczyniają się do zmniejszenia ekspansji w porównaniu do próbek kontrolnych nie zawierających popiołów. Wyniki przedstawiono na rysunku 1.

Współspalanie popiołów miało wpływ na morfologię, drobniejsze cząstki popiołu miały niższą zawartość CaO, a co za tym idzie, lepsze właściwości pucolanowe. Popioły lotne z dużą zawartością alkaliów lub wapnia są mniej skuteczne w kontrolowaniu reakcji alkalia-krzemionka. Analiza wyników badań wykazała również, że popioły pochodzące ze współspalania biomasy mogą adsorbować alkalia z roztworu porowego,

co może mieć korzystny wpływ na łagodzenie przebiegu reakcji alkalicznej. W przeprowadzonym badaniu najlepsze wyniki otrzymano w próbce zawierającej popioły pochodzące ze współspalania węgla z biomasą (odpady z drzew liściastych). Ekspansja w wyniku reakcji alkalicznej po 14 i 28 dniach w tej próbce wynosiła odpowiednio 0,043% i 0,121%. Natomiast w próbkach nie zawierających dodatków mineralnych w postaci popiołu lotnego ekspansja wynosiła 0,0658% po 14 dniach i 0,819% po 28 dniach [12].

#### 5. Podsumowanie

Zastosowanie popiołu lotnego w składzie cementu lub betonu poprawia właściwości mieszanki betonowej czy stwardniałego betonu. Pozwala ograniczyć ilość klinkieru cementowego w spoiwie. Wykorzystanie popiołów poprawia trwałość betonu ze względu na reakcję alkalia-krzemionka. Niewiele jest wyników badań dotyczących roli popiołów lotnych pochodzących ze współspalania biomasy. Dostępne dane wskazują, że popioły te charakteryzują się lepszym rozdrobnieniem oraz mniejszą zawartością niezwiązanego CaO w porównaniu do popiołów wapiennych. Takie właściwości popiołów pochodzących ze współspalania mogą wpływać na zmniejszenie ekspansji spowodowanej reakcją alkalia-krzemionka.