

Przemysł cementowy w dążeniu do ekologiczności

THE CEMENT-INDUSTRY IN ASPIRATION TO BE ECOLOGICAL

Streszczenie

Era industrializmu i komercjalizmu idzie w parze z nieugiętymi zasadami ekonomiczności przedsięwzięcia. Zasady te polegające na ciągłej minimalizacji kosztów związanych z produkcją i transportem wraz z jednoczesną maksymalizacją zysków były już przed erą industrializmu czynnikiem wiodącym w aspekcie produkcji i wytwarzania. Kiedy wyżyłowane procesy technologiczne nie pozwalały na kolejne oszczędności w ramach produkcji, ekonomiczność zostawała już tylko w rękach logistyki. Do rozwiązań biznesowych została ona adaptowana, jako jeden z elementów sztuki prowadzenia walk. W obszarze zainteresowań cywilnych znalazła się natomiast dopiero u zmierzchu lat 50. XX wieku. Logistyka w swoim zamyśle przewidywała planowanie i kontrolę przepływu produktów, planowania inwestycji pod względem geograficznym oraz urbanistycznym. Dzięki temu wytwarzane produkty zyskiwały kolejne aspekty ekonomiczności. Niestety owa ekonomiczność nie zawsze szła w parze z ekologią. Dopiero koniec XX wieku i naciski pozarządowych organizacji ekologicznych sprawiła, że władze Unii Europejskiej oraz niektóre państwa spoza starego kontynentu wprowadziły restrykcje odnośnie wprowadzanych do atmosfery niekorzystnie działających na klimat związków chemicznych. Zabiegi te wraz z ciągle pogłębiającą się świadomością ekologiczną, wykształciły nurt logistyki zwany ekologistyką. Współistniejąca razem z logistyką odzysku lub też odwrotną, ekologistyka kładzie szczególny nacisk na ekologiczność surowców, materiałów, wyrobów a także usług. Nowe odłamy wykształciły się głównie pod wpływem nacisku państw wysokorozwiniętych oraz niezależnych organizacji działających w celu ochrony środowiska. Ekologiczność w dziedzinie budownictwa jest jednak ciężka do osiągnięcia. Dzieje się tak ze względu na uprzemysłowienie i występujące w tej branży ogromne masy surowców i materiałów. Zaisnienie w tej dziedzinie założeń ekologistki jest możliwe jedynie za pomocą mocnej regionalizacji produkcji lub w przypadku produkcji największego pod względem ilości zastosowanego materiału, czyli betonu, użycia nowego rodzaju

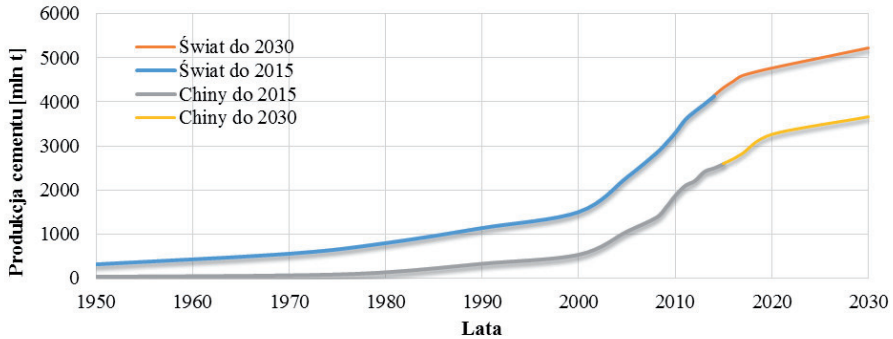
spoiw ekologicznych. Spoiwami, które w zdecydowany sposób zmniejszają emisję gazów cieplarnianych są cementowe spoiwa geopolimerowe.

Abstract

The era of the industrialism and the commercialism is matched by inflexible rules of enterprise economicalness. These rules consisting of the continuous minimization cost connected with the production and a transport together with the simultaneous profit maximisation were already before the era of the industrialism a factor leading in the aspect of production. When extorted processing did not let on following savings within the framework of production, the economicalness became already only in hands of logistics. To the business solutions it was adapted as one of elements of the art of fights leading. In the area of civil interests it was found however only at the end of fifties of XX century. The logistics in it own intention foresaw the planning and the inspection of products flow, investment planning in respect of geographical and of town-planning. Thanks to this products gained following aspects of economicalness. Unfortunately that economicalness was not always matched by the ecology. Only the end of XX century pressures of extra government ecological organizations it caused those authorities of European Union and some states from beyond the old continent introduced restrictions in relation to chemical compounds introduced to the atmosphere. These endeavour together with constantly deepening the ecological consciousness, formed the trend of logistics called ecologicistic. Concomitant together with the logistics of recycling, ecologicistic put a special pressure on eco-friendly raw materials, materials, products and also services. New trends developed mainly under the pressure of highly developed states and independent organizations working for the purpose of environmental protection. Ecological in the construction domain is however heavy to be achieved. Happens so, because of industrialization and appearing (in this branch) of o huge masse of raw and other materials. Coming into foundations of ecologicistic is possible only by means of the strong production regionalization in case of the production of greatest material (in respect of the quantity), that is concrete, using the new kind of ecological binders. The binders, which diminish the emission of greenhouse-gases, are geopolimer cement-binders.

1. Światowa produkcja cementu

Cement jest drugim pod względem wielkości zużycia przez człowieka produktem zaraz po wodzie pitnej. Nic zatem dziwnego, że jest najpopularniejszym materiałem używanym w budownictwie. Produkcja cementu z roku na rok wzrasta (rys. 1) [1, 2]. Przewidywania dotyczące światowej produkcji spekulują, że do 2020 r. poziom produkcji wzrośnie z wytwarzanych w 2014 r. 4,1 mld ton, do ponad 4,4 mld ton. Jest to głównie zasługa regionów rozwijających się. Są to kraje wschodniej i południowej Azji oraz kraje Ameryki Południowej i Afryki. Krajami przodującymi w tym zakresie są oczywiście Chiny, Indie oraz Brazylia.



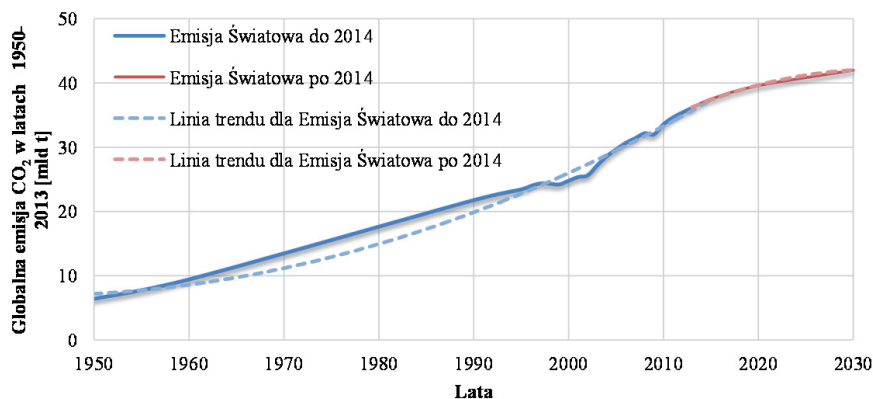
Rys. 1. Porównanie światowej produkcji cementu i produkcji państwa środka wraz z oczekiwaniami w tym zakresie [1–3]

Z roku na rok produkuje się ogromne ilości spoiwa klinkierowego. Kolejne półtorej dekady ma przynieść dalszy wzrost. Co jest niesamowite, ilość wytwarzanego cementu w roku 2030 może przekroczyć 5 mld ton. Ta niewyobrażalna na początku XXI wieku wartość byłaby zdecydowanie większa, gdyby nie zahamowanie gospodarcze. Widoczne załamanie na wykresie linii trendu, które widać na wykresie (rys. 1), zmniejsza coroczny przyrost wytworzonego klinkieru na świecie. Analizując wartości przypisane światu oraz państwu środka, dostrzec można, że produkcja cementu w Chinach stanowi obecnie ponad 60% produkcji światowej. Zgodnie z informacjami oraz spekulacjami dotyczącymi światowej produkcji, wartość produkcji cementu w Chinach na przestrzeni ostatnich 65 lat wzrosła z 7,6% do 60% i wielce prawdopodobnym jest, że w roku 2030 osiągnie niemal 70% produkcji światowej. Już teraz państwo środka pomimo gigantycznych rozmiarów konsumpcji jest dużym eksporterem cementu [3]. W roku 2012 chiński eksport był trzecią światową wartością i wyniósł ponad 12 mln ton.

2. Ekologia w aspekcie przemysłu cementowego

Konsumpcyjna gospodarka światowa nie zwraca uwagi na skutki dążenia do ciągłego zwiększania produkcji i zysku. Ma to jednak niekorzystne oddziaływanie na przyrodę i środowisko. Zachodzące zmiany klimatyczne i anomalie pogodowe są bezpośrednim efektem naszej ingerencji. Podstawową przyczyną tych zmian jest wprowadzanie do atmosfery szkodliwych gazów cieplarnianych. Są to para wodna, metan, halon, freon,

podtlenek azotu, dwutlenek węgla oraz gazy przemysłowe, takie jak HFC, PFC czy SF₆. Największe możliwości redukcji wprowadzania tych substancji do atmosfery są powiązane z dwutlenkiem węgla. Ilość dwutlenku węgla wprowadzanego do atmosfery ze źródeł naturalnych jest 20-krotnie większa od tej, której pochodzenie przypisane jest działalności człowieka [6]. Mimo tak wielkiej różnicy w ilościach wprowadzanego do atmosfery CO₂ w sposób antropogeniczny oraz naturalny, stężenie tego gazu w atmosferze podniosło się dopiero w czasie rewolucji przemysłowej [7]. W przeciągu dziesięciu tysięcy lat jego poziom był stały i wahał się pomiędzy 260 a 280 ppm. Obecnie w zależności od pory roku wynosi on średnio około 400 ppm. Wzrost tego poziomu ma znaczący wpływ na temperaturę na naszym globie. Przekroczenie wartości 350 ppm powoduje proces ocieplenia, z którym nasza planeta nie może sobie samodzielnie poradzić.



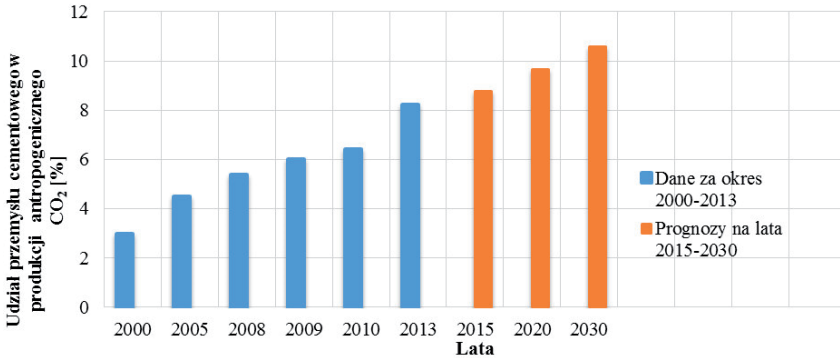
Rys. 2. Analiza globalnej emisji CO₂ spowodowanej spalaniem paliw kopalnych oraz produkcją cementu [3–5]

Obecnie, aby obniżyć zawartość CO₂ do granicy 350 ppm należałoby całkowicie przejść na ekologiczne źródła energii, co jest logistycznie niewykonalne. Ilość wprowadzanego dwutlenku węgla do atmosfery (rys. 2) zgodnie z przedstawioną linią trendu wzrasta. W budownictwie największym producentem dwutlenku węgla oraz substancji przeliczanych na ten gaz jest przemysł cementowy. Zapotrzebowanie na ogromne masy tego produktu w powiązaniu z energochłonną technologią oraz procesem wypalania węgla wapnia wg wzoru (1) powoduje, że produkcja uwalnia ogromne ilości dwutlenku węgla do atmosfery.



Szacuje się, że sam proces generuje 0,55 t CO₂ na 1 t produkowanego cementu. Dodając do tego wartość 0,4 t związaną ze spalaniem paliw kopalnych, okazuje się, że dodając ślad węglowy cementu połączony z jego transportem z łatwością przekraczamy 1 t CO₂ na 1 t wytwarzanego cementu. Wielkie koncerny cementowe mające swoje siedziby w Europie wychodzą naprzeciw wymaganiom dotyczącym redukcji CO₂. Obostrzenia emisji gazów cieplarnianych nałożone przez Radę Europejską wymuszają dążenie producentów do tego, aby produkowany cement stawał się coraz bardziej ekologiczny. Wymagania te odnoszą się jedynie do cementu produkowanego na obszarze Unii Europejskiej, tzn. do ilości cementu mniejszej niż 4% produkcji światowej (dane za rok 2014). Oznacza to, że

bardzo restrykcyjne wytyczne dotyczące produkcji ekologicznych cementów klinkierowych, nawet przy ich pełnym wdrożeniu, będą niemal nieodczuwalne w światowym zestawieniu opisującym procentowy udział przemysłu cementowego w produkcji dwutlenku węgla (rys. 3). Stąd też, analizując emisję CO₂ spowodowaną wytwarzaniem spoiw klinkierowym nie powinno się uwzględniać redukcji emisji ze względu na zastosowanie paliw alternatywnych.

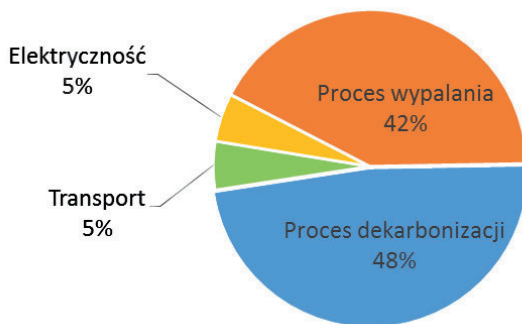


Rys. 3. Udział przemysłu cementowego w produkcji CO₂ pochodzenia antropogenicznego [3, 4, 5]

3. Przemysł cementowy a logistyka

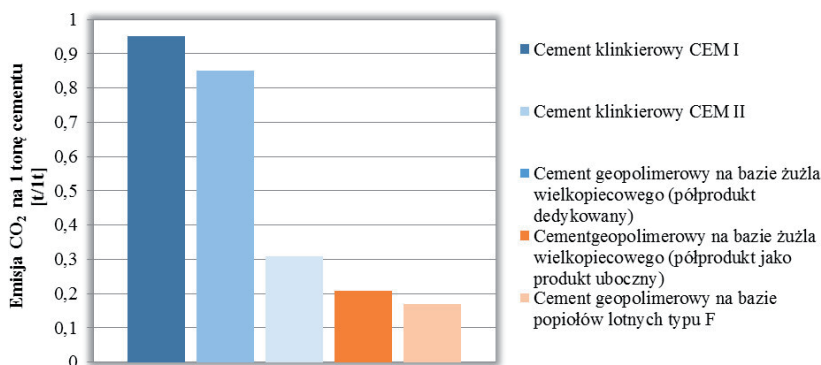
Możliwości działań logistycznych w celu usprawnienia ekonomiczności i zarazem ekologiczności przemysłu cementowego są mnogie. Niestety zakres ich działania, tudzież możliwości np. rzeczywistej redukcji emisji gazów cieplarnianych spowodowanych wytwarzaniem spoiw klinkierowych są mocno ograniczone. Związane jest to ściśle z faktem, że sam proces produkcji, który na razie nie może być zmieniony, nie daje możliwości zredukowania prawie połowy wartości CO₂ przypisanego cementowi (rys. 4) [8].

Analizując powyższe dane trzeba zauważyć niewielką możliwość zastosowania tradycyjnej logistyki sprowadzonej do transportu. Jedynie 5% bezpośredniej emisji odnosi się właśnie do niego. Postawienie czołowych producentów cementu przed wymaganiami Unii Europejskiej sprawiło, że zmuszeni zostali oni do radykalnych działań w kierunku uekologizowania produkcji. W tym celu zastosowano zasadę logistyki odzysku. Zakłada ona planowanie, kontrolę i implementację przepływu dóbr w sposób efektywny, tzn. w taki sposób, aby możliwe było całkowite lub ponowne ich wykorzystanie. Przejawia się to w odejściu od produkcji cementów portlandzkich czystych tzn. typu CEM I, na rzecz cementów portlandzkich żuźlowych czy wieloskładnikowych typu CEM II. Drugim zabiegiem jest wykorzystanie paliw alternatywnych do uzyskania wysokich temperatur w piecu cementowym. W związku z powyższym możliwa jest redukcja emisji bezpośredniej, która z wartości 1 t może być obniżona nawet do 0,8 czy 0,7 t na 1 t produktu.



Rys. 4. Składowe bezpośredniej emisji CO₂ w procesie produkcji cementu klinkierowego [8]

Niestety na razie przez wiele lat będzie to bariera nie do przeskoczenia. Jedyną możliwością dalszej redukcji emisji CO₂ do atmosfery jest ewolucja technologiczna w zakresie zmiany spoiwa cementowego. Spoiwa geopolimerowe [9], których rozwój można obecnie zaobserwować dają ogromne możliwości pod względem redukcji dwutlenku węgla (rys. 5).



Rys. 5. Porównanie średnich emisyjności dwutlenku węgla cementów klinkierowych i geopolimerowych [10]

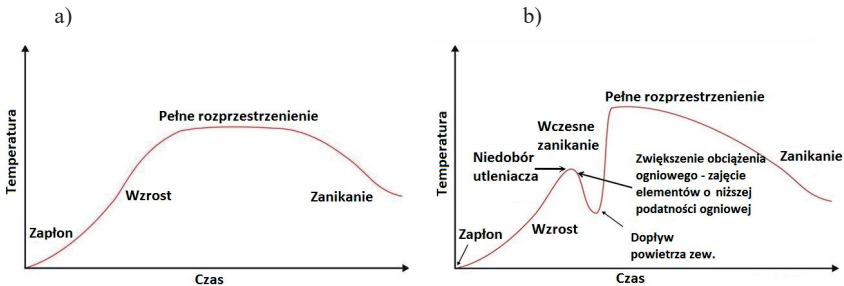
W zależności od zastosowanego produktu do wytworzenia spoiwa geopolimerowego redukcja emisji dwutlenku węgla może dojść nawet do 0,15 t na 1 t produktu. Tak znacząca redukcja nigdy nie będzie możliwa do uzyskania w przypadku obecnie używanych spoiw. Najpopularniejszym materiałem stosowanym do wytwarzania spoiwa geopolimerowego jest obecnie popiół lotny, którego ogromne ilości zalegają na hałdach elektrociepłowni. Podobnie jest w przypadku żużła wielkopiecowego. Obydwa te materiały są jedynie produktami ubocznymi, a ich wykorzystanie oprócz zagospodarowania ogromnych ilości zalegającego materiału odpadowego, daje możliwość ochrony środowiska po zastosowanie go do wytwarzania spoiw geopolimerowych. Oczywiście istnieją inne produkty możliwe do użycia, są nimi zarówno metakaolin, jak i tufy wulkaniczne. Oprócz aspektu ekologicznego, cement geopolimerowy pod żadnym względem nie ustępuje obecnie stosowanemu cementowi portlandzkiemu. Co więcej pod niemal każdym względem cement

geopolimerowy i otrzymany z niego beton geopolimerowy, wykazują właściwości dużo korzystniejsze i bardziej pożądane w budownictwie [11, 12] zarówno pod względem wytrzymałościowym, jak i odporności na warunki środowiskowe, w tym oddziaływania niskich i wysokich temperatur oraz środowisk agresywnych. Właśnie lepsze zachowanie w wysokich temperaturach jest cechą charakterystyczną dla materiałów geopolimerowych.

4. Wpływ wysokich temperatur na spoiwa cementowe i geopolimerowe

Od momentu rozpowszechnienia cementu i betonu, ogień w konstrukcjach staje się coraz mniejszym zagrożeniem. Nie oznacza to jednak, że powinien zostać marginalizowany, gdyż nadal stanowi bardzo poważny problem. Badania materiałów na działanie wysokich temperatur odbywają się na podstawie rzeczywistych i teoretyzowanych funkcji temperatury i czasu pożaru. Obecnie istnieją dwie podstawowe krzywe charakteryzujące tę zależność [13]. Są to:

- tradycyjna krzywa rozwoju pożaru (rys. 6a),
- typowa krzywa rozwoju pożaru w nowoczesnym budownictwie (rys. 6b).



Rys. 6. Krzywe tradycyjnego i typowego rozwoju pożaru [13]

Obydwie funkcje czasowo-temperaturowe opisują możliwy przebieg pożaru. Pierwsza z nich opisuje tradycyjny model, który dotyczy sytuacji z ograniczonym ładunkiem spalnego materiału. Sytuacja ta może mieć miejsce w budynkach o wysokim stopniu izolacyjności ogniowej, w których rozprzestrzenienie się ognia jest ograniczone, a spalany materiał nie pozwala na podniesienie się temperatury i trwania pożaru dłużej, niż przegrody są w stanie powstrzymać działanie temperatury. W drugim przypadku, który zachodzi obecnie dużo częściej uwzględniony został dostęp do czynnika podtrzymującego spalanie tj. tlenu. Dzieje się tak, ponieważ ówczesne budowle są duże szczelniejsze. Często brak w nich jest tradycyjnego systemu wentylacyjnego

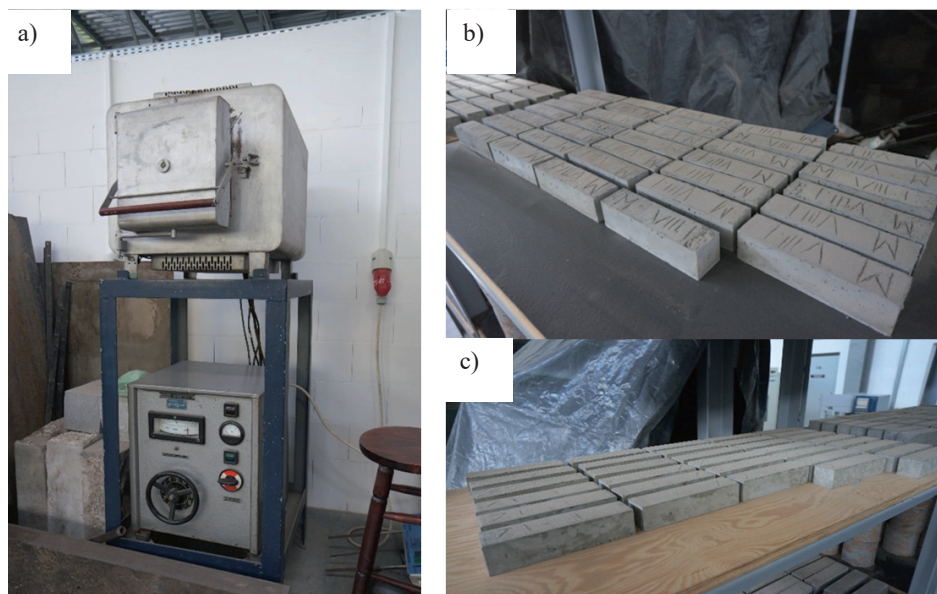
Na wysokość temperatury, jaka może zostać osiągnięta w trakcie trwania pożaru mają wpływ cztery podstawowe czynniki [14]:

- ilość i wielkość spalnego ładunku,
- rodzaj i wydajność wentylacji występującej w budynku,
- geometryczny kształt i rozmiar pomieszczeń trawionych przez ogień,
- właściwości ogniowe zastosowanych przegród.

Uzależnienie temperatury od czasu w postaci krzywej oznaczonej w standardzie ISO 834, przedstawia usystematyzowane odzwierciedlenie występującej temperatury pożaru do czasu jego trwania. Krzywa ta została opracowana w latach 30. XIX wieku na podstawie informacji uzyskanych z rzeczywistych pożarów mających miejsce w mieszkaniach i biurach [15]. Krzywa ta w bardzo trafny sposób odzwierciedlała opisywaną zależność w budownictwie tradycyjnym. Od określenia opisywanej krzywej minęło jednak sporo czasu. Od tamtej pory budownictwo ewoluowało. Zmieniły się standardy i materiały, z jakich wykonywana jest konstrukcja oraz pozostałe elementy budynków.

O trwałości każdego materiału świadczy również jego zachowanie się w wysokich temperaturach, szczególnie w trakcie pożaru. W celu oceny systemowych materiałów cementowych i geopolimerowych wykonano badania ich odporności na temperatury pożarowe.

Do badań użyto elektrycznego pieca wysokotemperaturowego (Fot. 1a). Na podstawie analizy krzywej temperatura-czas, wartość temperatury została ustalona w przedziale od 100°C do 800°C w skokach co 100 stopni. Czas wygrzewania próbek był stały i wynosił 240 min dla każdego zakresu temperaturowego. Próbkki zostały przygotowane w postaci klasycznych beleczek cementowych o wymiarach 4x4x16cm (Fot. 1 b, c). Wymiar próbek został wymuszony faktem, że badane spoiwo było materiałem naprawczym, którego producent nie zalecał stosowania w warstwach grubszych niż 4 cm.



Fot. 1. Widok zastosowanego pieca (a) i zastosowanych próbek (b, c)

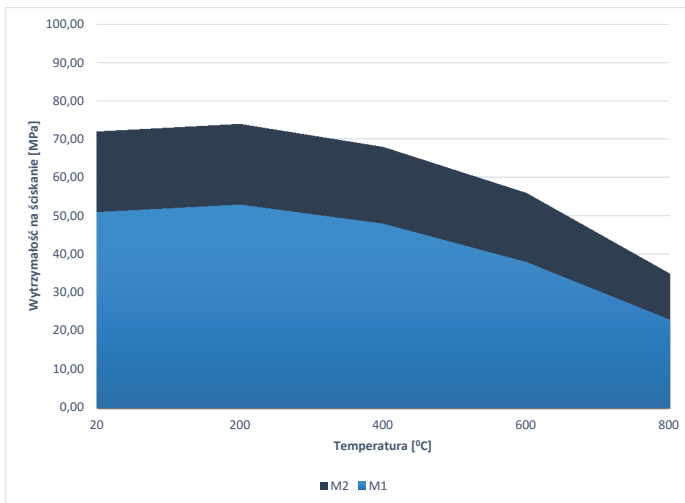
Badania wykonano dla czterech typów materiałów produkowanych przez wiodących producentów na naszym rynku. Dwa pierwsze były materiałami na bazie spoiw geopolimerowych, a następne dwa bazowały na tradycyjnym cemencie portlandzkim (tabela 1). W tabeli zawarto najważniejsze dane zastosowanych materiałów. Przedstawiono typy zastosowanych spoiw, rekomendowany wskaźnik wodno-mieszkankowy (W/M), klasę zaprawy zgodnie z Euronormą 1504 i wymiar ziarna zastosowanego kruszywa.

Wynikiem wykonanych badań są wartości wytrzymałości na ściskanie otrzymane w zależności od temperatury wypieku. Próbkę po zarobieniu zostały przechowywane w warunkach powietrzno-suchych w temperaturze 20°C i wilgotności względnej wynoszącej 50%. Następnie zostały umieszczone w piecu i poddane nagrzewaniu.

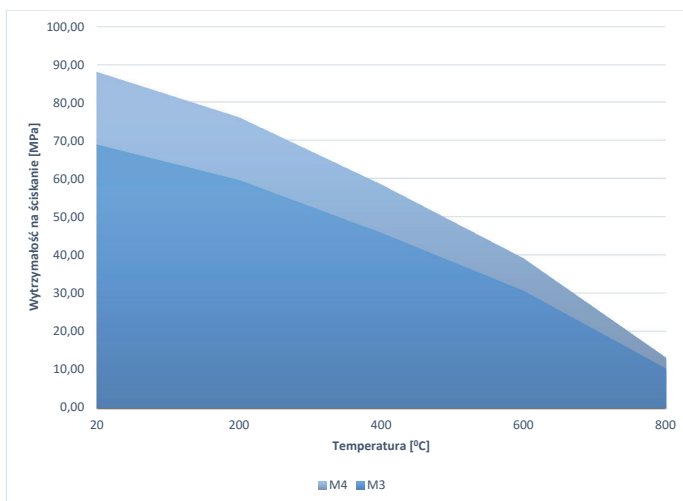
Tabela 1. Właściwości zastosowanych materiałów

Symbol materiału	Typ spoiwa	Wskaźnik W/M	Klasa zaprawy (zgodnie z EN 1504)	Wymiar ziarna [mm]
M1	geopolimer	0,18	R4	0-0,5
M2	geopolimer	0,14	R4	0-2,5
M3	Cement portlandzki	0,16	R4	0-4
M4	clinker modified by polymer	0,16	R4	0-2

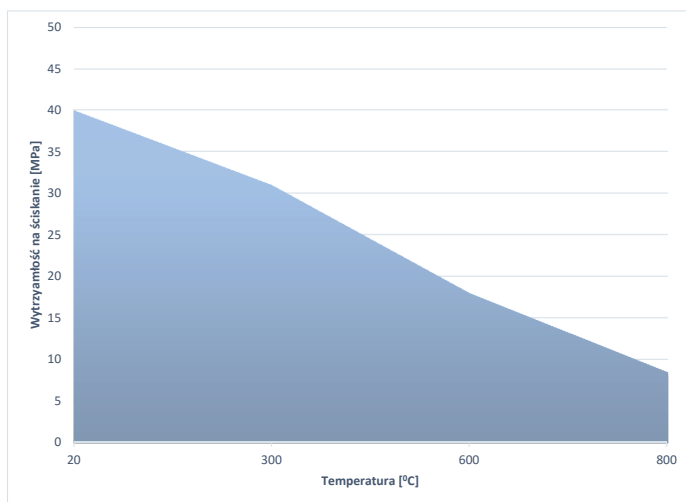
Po uzyskaniu zadanej temperatury próbki przebywały w piecu przez 240 min, co odpowiada średniemu czasowi trwania pożaru, a następnie pozostawały w nim do wystudzenia. Następnie zostawały poddawane próbie wytrzymałościowej (Rys. 7, 8).



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie materiałów geopolimerowych

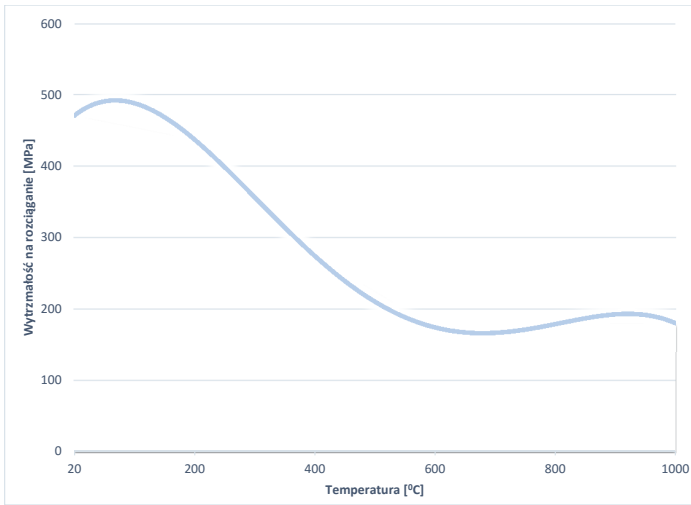


Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie materiałów na bazie cementu portlandzkiego



Rys. 9. Wytrzymałość na ściskanie betonu C30/37 [16]

Jak widać z przedstawionych wyników badań, które zostały dodatkowo porównane z wynikami badań klasycznego betonu cementowego klasy C30/37 (rys. 9) [16] oraz kompozytu geopolimerowego zastosowanego przez Davidovicza (rys. 10) [17], wszystkie krzywe są do siebie w charakterze zbliżone. Na uwagę zasługuje fakt nieliniowego zmniejszenia wytrzymałości spoiwa geopolimerowego poddanego działaniu wysokiej temperatury. Sytuacja ta została potwierdzona w wielu niezależnych wynikach badań. Przy czym należy zaznaczyć, że w przypadku materiałów geopolimerowych nastąpił dwukrotnie mniejszy spadek wytrzymałości w trakcie oddziaływania całego zakresu temperatur.

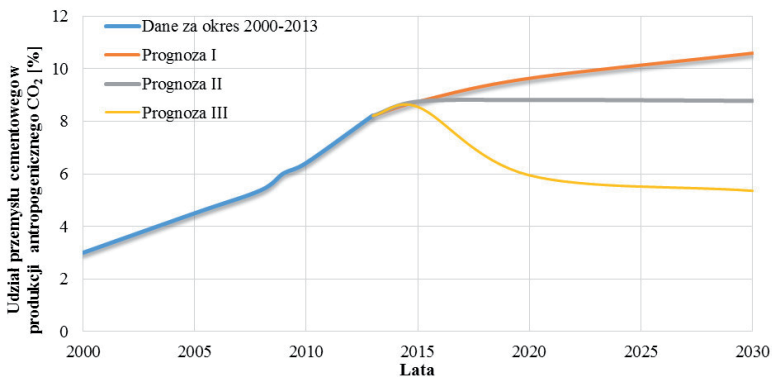


Rys. 10. Wytrzymałość na rozciąganie kompozytu geopolimerowego [17]

Oczywiście spoiwo geopolimerowe jest pozyskiwane głównie jako materiał odpadowy, dlatego też w chwili obecnej trudno jest mówić o usystematyzowaniu badań i tworzeniu wytycznych projektowych.

5. Ekologiczne skutki wdrożenia spoiw geopolimerowych

Wdrożenie technologii spoiw geopolimerowych może znacznie obniżyć stężenie tego gazu w atmosferze (rys. 11). Biorąc pod uwagę, że corocznie niemal 10% produkcji cementu portlandzkiego może zostać zastąpione przez cementy geopolimerowe na bazie popiołów lotnych i mielonego żużla wielkopieczowego, tylko z tego względu sama emisja CO₂ może spaść do 8,5% względem wcześniejszych przewidywań (rys. 3).

Rys. 11. Prognozy udziału emisji CO₂ względem światowej produkcji

Przedstawione na rysunku 11 prognozy udziału emisji dwutlenku węgla w światowej produkcji zakładają stałą wartość emisji spowodowaną spalaniem paliw kopalnych. Prognoza I nie zakłada wprowadzania spoiw geopolimerowych. Prognoza II uwzględnia zastąpienie części wytwarzanego cementu klinkierowego spoiwem geopolimerowym wytwarzanym z substancji odpadowych, takich jak popioły lotne i żużle wielkopiecowe, pochodzących z bieżącej produkcji. Prognoza III zakłada natomiast, że co najmniej połowa produkcji cementu portlandzkiego zostanie zastąpiona cementem geopolimerowym wytwarzanym zarówno z materiałów odpadowych, jak i materiałów dedykowanych, tj. wytwarzanych specjalnie na potrzeby produkcji geopolimerów. Jak widać już przy prognozie II dochodzi do zatrzymania wzrostu produkcji dwutlenku węgla, natomiast przy prognozie III wartość wprowadzanego do atmosfery gazu cieplarnianego mimo ogromnych ilości wytwarzanego cementu notuje tendencję spadkową.

6. Wnioski

Przedstawiona w artykule symulacja jest tylko jednym z elementów możliwych do zastosowania w celu ochrony środowiska przed niekorzystnym wpływem gazów cieplarnianych. Pewnym jest, że problem efektu cieplarnianego nigdy nie zostanie rozwiązany bez wprowadzenia odpowiednich regulacji prawnych. Co istotne to nie kraje wysoko rozwinięte, a te które dopiero wchodzi w fazę industrializmu powodują największe emisje CO₂. Tu powstaje spór dotyczący tego, kto powinien wziąć na swoje barki odpowiedzialność za zaistniałą sytuację. Najbliższe lata nie przyniosą zapewne wielkich zmian w aspekcie wdrożenia tej nowej technologii. Musi minąć jeszcze dużo czasu połączonego z ogromnym nakładem pracy i badań zanim omawiane w artykule prognozy będą mogły wejść w życie. Do tego czasu pozostaje nam wierzyć, że ogromna ilość pracy włożona w propagowanie świadomości ekologicznej zapoczątkuje w zmianie podejścia i aktywizacji do działań w trosce o środowisko [18].

Literatura

- [1] The European Cement Association, Activity Report 2014, Bruksela 2014.
- [2] Statista GmbH, Cement: Global cement production from 1990 through 2030, Hamburg 2015.
- [3] Statista GmbH, Cement: Global emissions from 1995 to 2013, Hamburg 2014.
- [4] Thomas Armstrong, International Cement Review, Insights from the Global Cement Report 10th Edition, XXX Technical Congress FICEM-APCAC, Peru 2013.
- [5] Carbon Dioxide, Information Analysis Center, Global Carbon Budget 2014, Copernicus Publications 2015.
- [6] Vital Climate Graphics UNEP/GRID-Arendal - Publications - Vital Climate Graphics.
- [7] Kenneth L. Denman, Guy Brasseur, Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-88009-1, 2007.
- [8] Tomasz Z. Błaszczczyński, Maciej R. Król, Czy beton może być naprawdę ekologiczny, XXI Ogólnopolska Interdyscyplinarna Konferencja Naukowo-Techniczna, Bielsko-Biała 2013,
- [9] Tomasz Z. Błaszczczyński, Maciej R. Król, Geopolimery w Budownictwie, Izolacje nr 5/2013, 38–44.
- [10] Benjamin C. McLellan, Ross P. Williams, Janine Lay, Arie van Riessen, Glen D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, Journal of Cleaner Production 2011, 1080–1090.
- [11] Tomasz Błaszczczyński, Maciej Król, Usage of green concrete technology in civil engineering, Procedia Engineering 122, 2015, 296–301.

- [12] Tomasz Błaszczczyński, Maciej Król, Durability of cement and geopolymer composites, 18th International Conference on Composite Structures ICCS18, Lisboa, 15-18.06.2015.
- [13] P.J. Norwood, F. Ricci, Ventilation limited fire: Keeping it rich and other tactics based off science, www.fireengineering.com 2014.
- [14] Z. Ma, P. Makelainen, Parametric temperature-time curves of medium compartment fires for structural design, *Fire Safety Journal* 34 (2000), p. 361–375,
- [15] J. Zehfuss, D. Hosser, A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey building, *Fire Safety Journal* 42 (2007) p. 115–126,
- [16] Z. Bednarek, R. Krzuwobłocka-Laurów, T. Drzymala, Effect of high temperature on the structure phase composition and strength of concrete, *Zeszyty naukowe SGSP nr 38, Warszawa 2009*, p. 5–25,
- [17] J. Davidovits, M. Davidovics, Geopolymer: ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites, *Geopolymer Tooling Material, Saint Quentin, France 1991*, p. 1939–1949
- [18] Piecuch I, Piecuch T. Environmental Education and Its Social Effects. *Annual Set - The Environment Protection* 2013, 46(9), 1561-8.