

Wpływ pyłu z bocznikowania gazów z pieca cementowego na właściwości cementu portlandzkiego i hutniczego

The influence of cement kiln by-pass dust addition on the properties of Portland and slag cement

Ewelina Tkaczewska^{1*}, Grzegorz Łój¹, Agata Frątczak²

¹AGH University of Science and Technology

²Graduate student at AGH University of Science and Technology

*Corresponding author: E. Tkaczewska, e-mail: tkaczews@agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy badano wpływ pyłu z bocznikowania gazów z pieca cementowego na właściwości cementu portlandzkiego i hutniczego. Do badań przygotowano cementy CEM I 42,5R i CEM III/A 42,5N. Uwzględniając dopuszczalne stężenie jonów Cl⁻ równe 0,1% masy cementu zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012, dodatek pyłu wynosił 0,7% i 1,7%. Określono wpływ pyłu z bocznika gazów na ciepło hydratacji, wodożądność cementu, czas początku wiązania oraz wytrzymałość na ściskanie cementów. Stwierdzono, że dodatek pyłów w ilości do 1,7% nie ma negatywnego wpływu na właściwości cementu portlandzkiego i hutniczego. Cementy zachowują tę samą klasę wytrzymałości, co bez dodatku pyłów.

Słowa kluczowe: alkalia, cement, hydratacja, pył z bocznikowania gazów w piecu cementowym

Summary

In this paper, the influence of cement kiln by-pass dust on the properties of Portland cement and slag cement was studied. The reference cements used in the experiment were CEM I 42.5R and CEM III/A 42.5N. The cement kiln by-pass dust replacement of cement was 0.7% and 1.7%, to satisfy the Cl⁻ ions content in cements: lower than or equal to 0.1%, following the demand of PN-EN 197-1:2012 standard. The following properties of cements were examined: the heat of hydration, water demand for normal consistency, initial setting time and compressive strength. The results showed that the addition of cement kiln by-pass dust of up to 1.7% has no negative effect on the properties of Portland cement and slag cement. The cements represent the same strength class, as without dust addition.

Keywords: alkalis, cement, hydration, cement kiln by-pass dust

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie paliw alternatywnych w piecu obrotowym do produkcji klinkieru portlandzkiego powoduje duże problemy eksploatacyjne. Paliwa te wprowadzają do procesu znaczne ilości składników lotnych, zwłaszcza związki chloru. W przypadku chloru i potasu tworzą się kryształy chlorku potasu w postaci sylwiny, stanowiące zaczątki narostów w wymienniku cyklonowym, co prowadzi do zakłóceń pracy pieca (1). Zbyt duża zawartość składników lotnych wymaga zastosowania instalacji do bocznikowania gazów piecowych. W zależności od zawartości składników lotnych, część gazów, zwykle około 5%, jest wyprowadzana poza wymiennik ciepła. Bocznikowanie gazów wiąże się z koniecznością odpylania tych gazów i wywozu pyłów na specjalne składowiska (2, 3).

1. Introduction

The use of alternative fuels in the rotary kiln creates specific problems in their exploitation. The alternative fuels introduce significant amounts of volatile components into the process of clinker production, especially the chloride compounds. The chlorine and potassium condense in the form of sylvine [KCl] on the walls of the cyclone preheater; the build-ups may hinder proper kiln operation (1). As the chlorides condensation takes place before the gas stream can pass through the preheater in the cement kilns by-pass of gas is applied. Depending on the content of volatile components, the portion of gases, usually approximately 5%, is led outside the preheater. However, the cement kiln by-pass is

Pyły z bocznikowania gazów [PBG] z pieca cementowego mają dużą zmienność właściwości, np. wykazują dużą zmienność składu chemicznego i uziarnienia. Ich właściwości zależą w dużym stopniu od zastosowanych surowców oraz rodzaju paliw.

Skład chemiczny pyłu z bocznikowania gazów z pieca cementowych wykazuje różnice w stosunku do składu chemicznego mączki surowcowej, stanowiącej nadawę surowcową pieca do produkcji klinkieru portlandzkiego (4-9). Różnice te dotyczą przede wszystkim zawartości jonów chlorowych, która w pyłe zmienia się w granicach od 2 do nawet 20 % masowych (6, 7, 10). W przypadku mączki surowcowej chlor jest składnikiem marginalnym. Kolejną różnicą to duża zawartość alkaliów i siarki w pyłe z bocznika (5-9). W skład pyłu z bocznikowania gazów z pieców cementowych wchodzi nieprzereagowane składniki surowca, pył z klinkieru, popiół z paliw zawierających chlorki i siarczany metali alkalicznych i inne związki lotne (4). Głównym składnikiem mineralnym jest węgiel wapnia, ale w mniejszych ilościach występują również kwarc, anhydryt, siarczany i związki chloru, na przykład KCl, NaCl i KNaCl₂ (11).

Duża zawartość składników lotnych w pyłe z bocznikowanych gazów cementowych, szczególnie chlorków, powoduje, że mogą one tworzyć narosty na ścianach cyklonów oraz stwarzać trudności w transporcie pyłu z bocznika. Z tego powodu dodaje się do uzyskanych pyłów mączkę surowcową, aby zapobiec zatykaniu przewodów (6, 7, 12, 13).

Znalezienie metod wykorzystania pyłu z bocznikowania gazów z pieca cementowego stało się problemem dla przemysłu cementowego. Część pyłu można zawrócić do pieca cementowego i ponownie wykorzystać do produkcji klinkieru, ale jest to ograniczone ze względu na zwiększenie zawartości alkaliów i chlorków w klinkierze portlandzkim. Duża zawartość alkaliów może sprzyjać reakcji wodorotlenków sodu i potasu z reaktywnym kruszywem i niszczenie betonu (14, 15), podczas gdy duża zawartość jonów chlorkowych może powodować korozję stali zbrojeniowej (16). Dlatego zasadniczym działaniem w celu zagospodarowania pyłów z bocznikowania gazów z pieca cementowego jest ich stosowanie, w niewielkiej ilości, jako składnika drugorzędowego do produkowanego cementu.

Alkalia w pyłe z bocznikowania gazów cementowych mogą pełnić rolę aktywatorów dodatków mineralnych, przede wszystkim popiołu lotnego i żużla wielkopieczowego, gdy pyły z bocznikowania gazów stosowane są jako składnik cementów (17-19).

Dodatek pyłów z bocznikowania gazów cementowych do cementu powoduje zwiększenie jego wodożądności (20). Jest to prawdopodobnie wynikiem dużej zawartości wolnego tlenu wapnia w pyłe z bocznikowania, w porównaniu z cementem portlandzkim oraz większym modułem hydraulicznym pyłu, w porównaniu z klinkierem. Wolny CaO jest bardzo aktywnym składnikiem, który reaguje z wodą z utworzeniem Ca(OH)₂.

Wpływ dodatku pyłu z bocznikowania gazów z pieca cementowego na właściwości cementu żużlowego CEM III badali Heikal i in. (7). Wyniki potwierdzają, że ilość wody wymagana do uzyskania

associated with the need to dedust these gases and transporting them to special landfills (2, 3).

The cement kiln by-pass dust [CKBD] is characterized by a large variability of parameters, for example, it exhibits high chemical and granular variability. Its properties are varied depending on the initial raw materials used and the type of fuel.

The chemical composition of CKBD differs from the chemical composition of raw materials used in the production of Portland cement clinker (4-9). This difference concerns mainly the content of chloride ions, which in by-pass dust varies from 2% up to 20% by mass (6, 7, 10); in the case of raw materials, the chlorides are a marginal component. The next difference is the higher content of alkalis in by-pass dust: K₂O and Na₂O, and sulphur in by-pass dust (5-9). CKBD consists of entrained particles of cement clinker, unreacted and partially calcined raw materials, and fuel ash enriched with alkali metal chlorides and sulphates as well as other volatile compounds (4). The main phase component is calcium carbonate, but there are also, in a lower content, quartz, anhydrite, alkali sulphates and chloride compounds, mainly: KCl, NaCl and KNaCl₂ (11).

The high concentration of volatile components in CKBD, especially chlorine, causes that they can stick to the walls of kiln preheater and create transport difficulties. For that reason, to the cement raw meal is added to prevent clogging of the lines (6, 7, 12, 13).

Finding a way to use cement kiln by-pass dust has become a rather urgent problem for the cement industry. Some dust can be returned to the kiln as raw mix, but this is limited by the tendency for the recycled by-pass dust to increase the alkalis and chloride contents of cement clinker. High alkalis contents can promote deleterious reactions with reactive aggregate particles that damage the concrete (14, 15), while chloride ions corrode reinforcing steel (16). Therefore, the priority objective to manage cement-kiln by-pass dust is their use, in a small amount, as a secondary additive for cement.

The alkalis present in cement kiln by-pass dust may play an important role in the activation of mineral additives, mainly fly ash and blast furnace slag when by-pass dust is used as a component of blended cement (17-19).

The addition of cement by-pass dust to cement causes an increase in the water demand, needed to obtain the standard consistency of cement paste (20). This is probably attributed to the high content of free lime in by-pass dust, as well as that the by-pass dust has a higher hydraulic modulus. The free CaO is a very active component that reacts with water to produce Ca(OH)₂.

The influence of cement kiln by-pass dust addition on the properties of slag cement CEM III was investigated by Heikal et al. (7). The results confirm that the required water demand for standard consistency is increasing with the increasing addition of the by-pass dust in cement. The addition of 2.5% of CKBD to slag cement retards the initial and final setting time, due to the excess

konsystencji normowej zaczynu cementowego zwiększa się wraz z ilością pyłu z bocznika w cemencie. Dodatek 2,5% masowych pyłu z bocznikowania gazów cementowych do cementu hutniczego opóźnia początek i koniec czasu wiązania. Natomiast przy dodatku pyłu od 7,5% do 10% czasy początku i końca czasu wiązania ulegają skróceniu. Pył z bocznikowania gazów cementowych wprowadza do cementu znaczną ilość alkaliów, które działają jako aktywny hydratator żużla wielkopieczowego.

W Polsce pyły z bocznikowania gazów z pieca cementowego są stosowane tylko jako drugorzędny składnik cementu. Zawartość takiego składnika jest nie większa niż 5%, zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012. Dodatek pyłu jest ograniczony całkowitą zawartością alkaliów i jonów chlorkowych w cemencie.

Zbyt duża ilość alkaliów w cemencie zawierającym w składzie pył z bocznikowania gazów cementowych może negatywnie wpływać na właściwości betonu. Przykładem jest reakcja wodorotlenków sodu i potasu z reaktywnymi odmianami krzemionki, zawartymi w kruszywie. Z tego względu, gdy kruszywo jest potencjalnie reaktywne zaleca się ograniczenie zawartości Na_2O_e do $3,0 \text{ kg/m}^3$ betonu (21). W takich przypadkach preferowany jest cement portlandzki o małej zawartości alkaliów, o ekwiwalencie Na_2O_{eq} mniejszym od 0,6% (22). Analogiczna sytuacja jest dla cementu hutniczego, ale maksymalna dopuszczalna zawartość alkaliów wynosi 2% Na_2O_{eq} . Alkalia w żużlu wielkopieczowym są zawarte w szkło, dlatego wolniej przechodzą do roztworu. Ponieważ zawartość jonów chlorkowych w pyłach z bocznikowania gazów cementowych jest większa niż w cemencie portlandzkim, ich dodatek powoduje zwiększenie udziału jonów chlorkowych w cemencie. Dopuszczalna zawartość jonów chlorowych w cemencie wynosi do 0,1% masy zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012. Dlatego pył z bocznika nie może być stosowany bez wstępnej oceny jego składu chemicznego.

Prezentowana praca przedstawia wyniki badań wpływu pyłu z bocznikowania gazów z pieca cementowego na właściwości cementu portlandzkiego i hutniczego. Dodatek pyłów wynosił 0,7% i 1,7% dla odpowiednio cementu portlandzkiego oraz hutniczego. Określono ich wpływ na ciepło hydratacji cementu, wodozjadność, czas początku wiązania i wytrzymałość na ściskanie.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

W badaniach zastosowano materiały: pył z bocznikowania gazów [PBG] z pieca cementowego, klinkier portlandzki, kamień wapienny, granulowany żużel wielkopieczowy oraz gips, jako regulator czasu wiązania. Składy chemiczne materiałów podano w tablicy 1.

Skład fazowy klinkieru portlandzkiego, obliczony według Bogue'a (23) był następujący: C_3S 63%, C_2S 14%, C_3A 8% i C_4AF 10%. Zawartość głównych składników w tym klinkierze portlandzkim jest typowa dla cementu zgodnego z normą PN-EN 197-1:2012.

Jak pokazano w tablicy 1, pył z bocznikowania gazów z pieców cementowych zawiera znacznie więcej alkaliów, chlorków, wolnego

of mixing water. With the increase in the addition of by-pass dust from 7.5% to 10%, the initial and final setting times are shortened. This may be due to the increase in the content of alkalis in cement by addition of the by-pass dust, which act as an activator for the hydration of blast furnace slag.

In Poland, the cement kiln by-pass dust is used only as a minor nonclinker component of cement, in the content of no more than 5% by mass according to PN-EN 197-1:2012 standard. The maximum content of by-pass dust in cement blend is limited by the total concentration of alkalis and chloride in cement.

Too much alkalis in the cement can negatively affect the properties of the concrete. An example is the reaction of sodium and potassium hydroxides with reactive forms of silica contained in the aggregate. Therefore, when the aggregate is potentially reactive, it is recommended to limit the Na_2O_e content to 3.0 kg/m^3 of concrete (21). In such cases, the low-alkali Portland cement with Na_2O_e up to 0.6% is preferred to use in a concrete mixture (22). The same situation is for slag cement, but the acceptable limit of alkalis content is 2% Na_2O_e , as the alkalis in the blast furnace slag are included in the slag glass. The alkalis from the glass of blast furnace slag are slowly released to the pore solution in hydrating cement paste. Since the content of chloride ions in the CKBD is higher than in Portland cement, its addition increases the chloride ions content in the cement. The maximum content of chloride in cement is up to 0.1% by mass following PN-EN 197-1: 2012 standard. Therefore, the cement kiln by-pass dust has not to be to cement, without a previous evaluation of its chemical composition.

This paper presents the results of the investigation on the influence of cement kiln by-pass dust addition on the properties of Portland and slag cements. The by-pass dust was added to each of these cements in the amounts of 0.7% and 1.7%. The following properties of blended cements were analysed: the heat of hydration, standard consistency and initial setting time as well as the compressive strength.

2. Experimental

2.1. Materials

The following materials were used in the investigations: the cement kiln by-pass dust, the Portland cement clinker, limestone, granulated blast furnace slag and gypsum, as an initial setting time regulator. The chemical composition of raw materials is presented in Table 1.

The mineral composition of Portland cement clinker as calculated by conventional Bogue's equations (23) are as follows: C_3S 63%, C_2S 14%, C_3A 8%, C_4AF 10%. Content of the main phases in this Portland cement clinker is typical for cements complying with PN-EN 197-1:2012 standard.

As it is shown in Table 1, the cement kiln by-pass dust has got higher alkalis, chlorides, free CaO and sulphates content, as compared to Portland cement clinker. This may limit the possibility

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY SUROWCÓW

CHEMICAL ANALYSIS OF RAW MATERIALS

Składnik / Component	Zawartość / Content, %				
	Pył z bocznikowania gazów cementowych [PBG] Cement kiln by-pass dust [CKBD]	Klinkier portlandzki Portland clinker	Kamień wapienny Limestone	Żużel wielkopiecowy Blast furnace slag	Gips Gypsum
Straty prażenia Loss on ignition	7.38	0.17	43.16	0.29	20.87
SiO ₂	7.08	21.56	1.78	39.50	3.88
Al ₂ O ₃	2.43	5.26	0.52	6.84	0.53
Fe ₂ O ₃	1.45	3.46	0.19	1.13	0.39
CaO	39.55	66.65	0.19	43.84	31.65
MgO	0.99	2.22	53.68	7.15	0.95
SO ₃	8.25	0.29	0.63	0.31	41.27
Na ₂ O	0.40	0.15	0.04	0.42	0.16
K ₂ O	27.28	0.22	–	0.50	0.30
Na ₂ O _e	18.35	0.29	–	–	–
Cl ⁻	5.19	0.02	–	0.04	–
CaO _{wolne} / CaO _{free}	1.60	1.42	–	–	–

CaO i siarczanów, w porównaniu z klinkierem portlandzkim. To ogranicza możliwość wykorzystania tego materiału w produkcji cementu. Zawartość alkaliów w pyłe z bocznika wynosiła: K₂O – 27,28% i Na₂O – 0,40%. W klinkierze portlandzkim, zawartość Na₂O i K₂O wynosiła odpowiednio 0,15% i 0,22%. Całkowita zawartość alkaliów w pyłe z bocznika, w przeliczeniu na Na₂O_e, wynosiła 18,35%, podczas gdy w przypadku klinkieru portlandzkiego nie przekraczała 0,3% Na₂O_e. Alkalia, pochodzące z rozpuszczania pyłu z bocznika, zwiększają alkaliczność cieczy w porach zaczynu, co z kolei będzie odgrywać ważną rolę w aktywacji żużla wielkopiecowego w cemencie hutniczym (24).

Poza dużym udziałem alkaliów, również zawartość wolnego CaO i siarczanów w pyłe z bocznikowania gazów z pieców cementowych będzie decydować o wpływie tego materiału na hydratację żużla wielkopiecowego w cemencie. Wolny tlenek wapnia z pyłu cementowego reaguje z wodą tworząc wodorotlenek wapnia, który jest aktywatorem żużla. Szkło żużlowe bogate w tlenek glinu reaguje z siarczanami pochodzącymi z pyłu cementowego z bocznika tworząc ettringit, który wpływa na rozwój wytrzymałości wczesnej, zaprawy cementowej.

Zawartość jonów Cl⁻ w pyłe z bocznikowania gazów cementowych wynosiła 5,19%, co ogranicza jego zastosowanie, jako składnika cementu. Całkowita zawartość jonów chlorkowych w cemencie nie może przekraczać 0,1%, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 197-1:2012.

Cementami wzorcowymi, zastosowanymi w badaniach były: cement portlandzki CEM I 42,5R oraz cement hutniczy CEM III/A 42,5N. Uwzględniając zawartość jonów Cl⁻ w klinkierze portlandzkim i żużlu wielkopiecowym zastosowany maksymalny dodatek pyłu z bocznikowania gazów cementowych w badanych cementach

of using this material in cement production. The alkalis content in the cement kiln by-pass dust was as follows: K₂O – 27.28% and Na₂O – 0.40%. The content of Na₂O and K₂O in Portland cement clinker was respectively 0.15% and 0.22%. The total alkalis content in investigated dust, expressed as Na₂O_e, was 18.35%, while that for Portland cement clinker – was lower than 0.3% Na₂O_e. External alkalis derived from cement kiln by-pass dust increases the alkalinity of pore liquid paste, which in turn will play an important role in the activation of blast furnace slag, in slag cement (24).

In addition to the higher content of alkalis, the high free CaO and sulphate contents may also determine the effect of this material on the hydration of blast furnace slag in cement. During the hydration of cement dust, the free CaO reacts with water to form calcium hydroxide, which acts as an activator of blast furnace slag. The alumina-rich slag glass reacts with external sulphates from by-pass kiln cement dust forming ettringite, which increases the early-age strength of cement mortar.

The high concentration of Cl⁻ ions in cement kiln by-pass dust, equal to 5.19%, limits its utilisation in cement production. The total content of chloride ions in cement has to be lower than 0.1%, following the requirements of PN-EN 197-1:2012 standard.

The reference cements used in the experiment were: Portland cement CEM I 42.5R, and slag cement CEM III/A 42.5N. Taking into account the percentage of Cl⁻ ions in Portland cement clinker and blast furnace, the maximum addition of cement kiln by-pass dust used in the blended cements studied can be 1.7%. Moreover, the dosage of 0.7% by-pass dust was also used, which in turn gave a total content of Cl⁻ ions equal to 0.05%. The by-pass dust was used as a partial replacement of Portland cement clinker. The compositions of blended cements used in the experiment,

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD BADANYCH CEMENTÓW

COMPOSITION OF BLENDED CEMENTS INVESTIGATED

Próbka Sample	Składnik / Component, %				
	Klinkier portlandzki Portland clinker	Żużel wielkopiecowy Blast furnace slag	Kamień wapienny Limestone	Gips Gypsum	Pył z bocznikowania gazów [PBG] z piców cementowych Cement kiln by-pass dust [CKBD]
CEM I	89.0	–	4.5	6.5	–
CEM I+0.7PBG	88.3				0.7
CEM I+1.7PBG	87.3				1.7
CEM III	41.0	53.5	–	5.5	–
CEM III+0.7PBG	40.3	53.5			0.7
CEM III+1.7PBG	39.3	53.5			1.7

może wynosić 1,7%. Zbadano również wpływ dodatku 0,7% pyłu z bocznika, co z kolei oznaczało całkowitą ilość jonów Cl⁻ w cementach wynoszącą 0,05%. Pył z bocznika gazów stosowano jako częściowy zamiennik klinkieru portlandzkiego w badanych cementach. Ich składy przedstawiono w tablicy 2.

Cementy przygotowano poprzez mielenie zastawów do powierzchni właściwej 4800±100 cm²/g według Blaine'a, zgodnie z normą PN-EN 196-6:2011.

2.2. Metody badań

Ciepło hydratacji zaczynów cementowych zbadano za pomocą różnicowego mikrokalorymetru przewodzącego w temperaturze 20°C przez okres 72 godzin. Stosunek w/c we wszystkich próbkach wynosił 0,5.

Pomiary wodożądności [konsystencji normowej] i czasu początku wiązania zaczynów cementowych wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-3:2012, przy użyciu ręcznego aparatu Vicata. Konsystencję normową zaczynu cementowego określono jako ilość wody [jako procent wody w stosunku do masy suchego cementu], która umożliwiła zanurzenie bolca aparatu Vicata na głębokość 6±2 mm, nad powierzchnią płytki szklanej. Czas początku wiązania zaczynu cementowego o konsystencji normowej oznaczono jako czas, który upłynął od chwili zmieszania cementu z wodą do momentu, kiedy igła aparatu Vicata zanurza się w zaczynie na głębokość 6±3 mm, nad powierzchnią płytki szklanej.

Wytrzymałość na ściskanie cementów oznaczono zgodnie z normą PN-EN 196-1:2016. Dla każdej mieszanki cementowej przygotowano trzy próbki w postaci belek, o wymiarach 40 mm × 40 mm × 160 mm. Próbki były przechowywane przez 24 godziny w formach w temperaturze 25°C i wilgotności względnej RH>95%. Po rozformowaniu próbki przechowywano w wodzie, aż do przeprowadzenia badania. Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano po upływie 1, 2, 7 i 28 dni.

are presented in Table 2.

The cement blends were prepared by grinding sets to the specific surface area of 4800±100 cm²/g by Blaine method, according to PN-EN 196-6:2011 standard.

2.2. Experimental methods

The heat evolved during hydration of cement pastes was investigated using a differential conducting microcalorimeter at 20°C for 72 h. The w/c ratio of all samples was 0.5.

The measurements of standard consistency [water demand] and initial setting time of cement pastes were done according to PN-EN 196-3:2012 standard, using manual Vicat apparatus. The standard consistency of a cement paste was defined as the content of water, as a percentage of dry cement mass, that permits the Vicat plunger to penetrate to a depth of 6±2 mm, above the glass plate. The initial setting time of cement paste of standard consistency was defined as the time elapsed from the moment when the cement is mixed with water until the moment when the Vicat needle penetrates to a depth of 6±3 mm above the glass plate.

The compressive strength of cement mortars was determined in accordance with PN-EN 196-1:2016 standard. For each cement, three prismatic samples of mortar having 40 mm × 40 mm × 160 mm dimensions were prepared. Cement mortars were kept for 24 h in moulds at 25°C and RH>95%. After demoulding the samples were stored in water. The compressive strength measurements were performed after 1, 2, 7 and 28 days.

3. Results and discussion

3.1. Chemical analysis of cements

The chemical analysis of cements, including loss on ignition, chloride ions, alkalis, as Na₂O_e, and sulphates, as SO₃. The results are given in Table 3.

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Analiza chemiczna cementów

Analiza chemiczna cementów obejmowała oznaczenie strat prażenia, zawartości jonów chlorkowych, alkaliów (jako Na_2O_e) i siarczanów (jako SO_3). Wyniki podano w tabelicy 3.

3.2. Ciepło hydratacji

Ilość wydzielanego ciepła i szybkość jego wydzielania podczas hydratacji cementów CEM I i CEM III przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1 i 2. Całkowite ciepło hydratacji zaczynów cementowych po 24, 41 i 72 godzinach hydratacji podano w tabelicy 4.

Dodatek pyłu PBG do cementu portlandzkiego i hutniczego w ilości wynoszącej do 1,7% masowych nie wpływa zasadniczo na przebieg procesu hydratacji. Wyniki badań mikrokalorymetrycznych zaczynów cementowych z pyłem z boczniaka wykazują, że zarówno całkowita ilość wydzielonego ciepła hydratacji, jak również szybkość wydzielania ciepła w czasie, nie różnią się znacznie w porównaniu z wzorcowymi zaczynami cementowymi, bez dodatku pyłu z boczniaka.

Porównując kształt krzywych mikrokalorymetrycznych zaczynów bez i z dodatkiem pyłu z boczniakowania gazów z pieca cementowego, pokazujących zmiany szybkości wydzielania ciepła hydratacji [rysunki 1 i 2], można zauważyć, że dodatek pyłu do cementu w ilości do 1,7% nie powoduje wydłużenia okresu indukcji lub wywołuje zmiany nie przekraczające dokładności metody badawczej. Również punkty kluczowe dla tego okresu hydratacji, czyli jego początek i koniec, nie są przesunięte względem analogicznych punktów dla cementów wzorcowych.

Również wartości ciepła hydratacji oraz przebiegi szybkości wydzielania ciepła w okresie poindukcyjnym, nie wykazują znacznych różnic dla badanych cementów portlandzkich i hutniczych, bez dodatku lub z dodatkiem PBG. Można zatem stwierdzić, że wprowadzenie PBG w ilości do 1,7% masy cementu nie wpływa znacznie na przebieg procesu hydratacji zaczynu cementowego, w jego początkowej fazie.

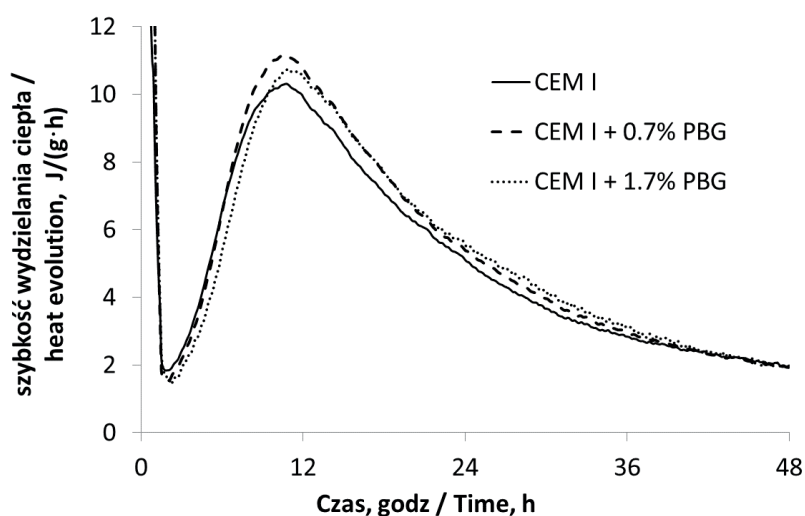
Niewielkie, zaledwie kilkuprocentowe, różnice w ilości ciepła hydratacji wydzielonego po 24, 41 i 72 godzinach są mniejsze od standardowo przyjętych zakresów powtarzalności i odtwarzalności pomiaru ciepła hydratacji. Zatem należy przyjąć, że zastosowane w badaniach dodatki PBG nie powodują dużych zmian sumarycznej ilości wydzielonego ciepła [tabela 4].

Tablica 3 / Table 3

ANALIZA CHEMICZNA CEMENTÓW

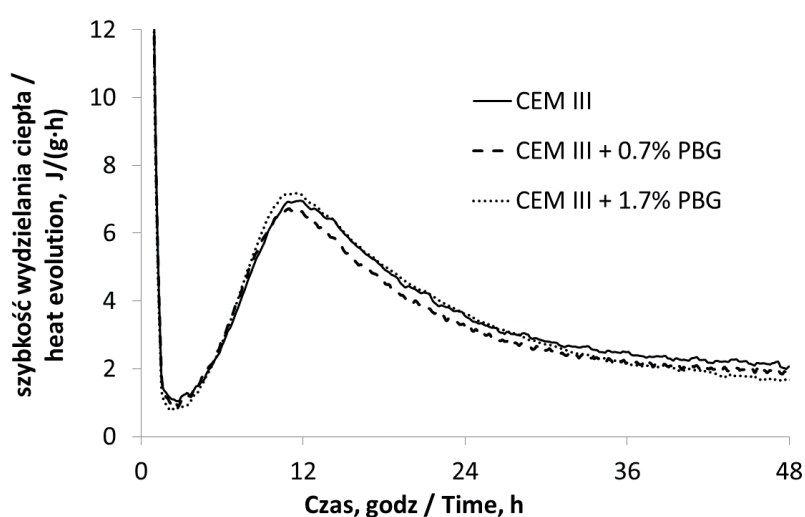
CHEMICAL ANALYSIS OF CEMENTS

Próbka / Sample	Składnik / Component, %			
	Straty prażenia Loss on ignition	Cl ⁻	Na ₂ O _e	SO ₃
CEM I	3.59	0.01	0.29	2.99
CEM I+0.7PBG	3.49	nie oz.	0.43	nie oz.
CEM I+1.7PBG	3.90	0.08	0.63	3.20
CEM III	1.19	0.01	0.55	2.76
CEM III+0.7PBG	1.04	nie oz.	0.68	nie oz.
CEM III+1.7PBG	1.18	0.09	0.88	2.96



Rys. 1. Krzywe mikrokalorymetryczne zaczynów z cementów CEM I z różnymi dodatkami PBG

Fig. 1. Microcalorimetric curves of cement pastes made from CEM I cements with different amounts of CKBD



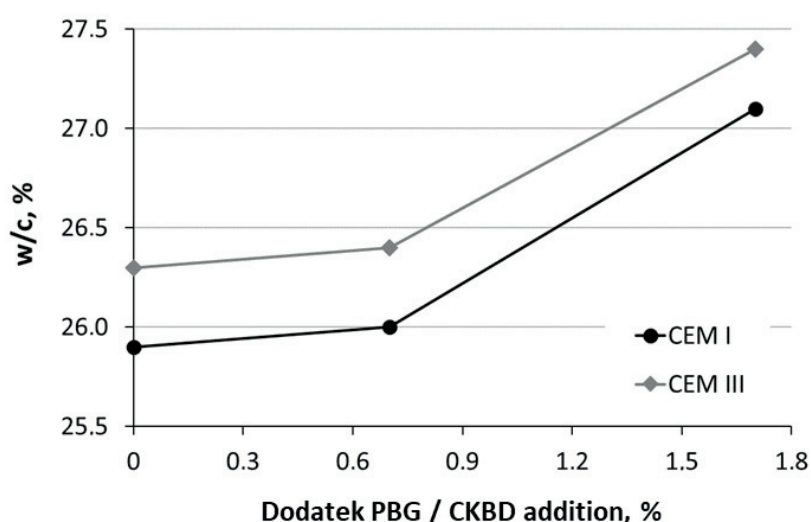
Rys. 2. Krzywe mikrokalorymetryczne zaczynów z cementów CEM III z różnymi dodatkami PBG

Fig. 2. Microcalorimetric curves of cement pastes made from CEM III cements with different amounts of CKBD

3.3. Konsystencja normowa i początek czasu wiązania

Zapotrzebowanie na wodę zarobową potrzebną do uzyskania konsystencji normowej oraz czas początku wiązania zaczynów cementowych bez dodatku PBG oraz z dodatkiem 0,7% i 1,7% PBG, pokazano odpowiednio na rysunkach 3 i 4. Zaczyn z cementu CEM I uzyskuje konsystencję normową przy nieznacznie większym udziale wody zarobowej: 131,5 g wody na 500 g cementu, w stosunku do zaczynu CEM III: 129,5 g wody na 500 g cementu. Dodatek żużla wielkopieczowego wydłuża czas początku wiązania zaczynu. Ilość wody niezbędnej do uzyskania konsystencji normowej zaczynów cementowych CEM I i CEM III z dodatkiem pyłu z boczniaka gazów z pieców cementowych, wyrażona jako stosunek w/c, zwiększa się wraz ze zwiększeniem udziału pyłu w cemencie. Może to być spowodowane wzrostem powierzchni właściwej cementu na skutek pyłu o dużej powierzchni właściwej, a także zwiększonym udziale alkaliów, siarczanów i wolnego wapna w cemencie zawierającym pył (7, 25). Z tego powodu stosowanie pyłu z boczniaka pieca cementowego wymaga większej ilości wody do uzyskania zaczynu cementowego, o konsystencji normowej. Dla zaczynu z CEM I+1.7PBG ilość koniecznej wody zarobowej zwiększa się o 4%, w porównaniu do wzorcowego zaczynu z cementu CEM I. Dla zaczynu z CEM III+1.7PBG, zwiększenie ilości koniecznej wody zarobowej wynosi 5% w stosunku do ilości wody użytej do przygotowania wzorcowego zaczynu z cementu hutniczego.

Początek czasu wiązania cementu wzorcowego CEM I wynosi 164 minuty, natomiast początek czasu wiązania cementu wzorcowego CEM III jest wydłużony do 185 minut. Jest to prawdopodobnie spowodowane częściowym zastąpieniem klinkieru portlandzkiego przez żużel wielkopieczowy w cemencie CEM III, w którym sól i potas są zawarte w szkle i reagują wolniej. Ponadto żużel wielkopieczowy sam nie wiąże z wodą lub wiąże bardzo wolno, a uaktywnia się dopiero pod wpływem środowiska alkalicznego lub siarczanowego [utajone właściwości hydrauliczne żużla wielkopieczowego] (26). Hydratację żużla wielkopieczowego w czasie można



Rys. 3. Ilość wody niezbędnej do uzyskania konsystencji normowej zaczynów cementowych z cementów CEM I z PBG

Fig. 3. Water demand for standard consistency for CEM I cement pastes containing various amounts of cement kiln by-pass dust

Tablica 4 / Table 4

HYDRATION HEAT OF CEMENT PASTES

CIEPŁO HYDRATACJI ZACZYNÓW CEMENTOWYCH

Próbka / Sample	Całkowite ciepło hydratacji Total hydration heat, J/g		
	po 24 godz. after 24 h	po 41 godz. after 41 h	po 72 h godz. after 72 h
CEM I	178.9	236.7	287.5
CEM I+0.7PBG	186.8	247.8	299.8
CEM I+1.7PBG	179.0	243.0	292.8
CEM III	116.3	162.2	213.9
CEM III+0.7PBG	111.1	153.1	199.9
CEM III+1.7PBG	117.1	160.6	207.9

3.2. Heat of hydration

The rate of heat evolution and the total heat released during the hydration of the tested cements CEM I and CEM III, are shown respectively in Figs. 1 and 2. The total heat released by cement pastes after 24, 41 and 72 hours of hydration is given in Table 4.

The addition of the cement kiln by-pass dust [CKBD] to Portland and slag cements in amount up to 1.7% by mass does not substantially alter the hydration process. The microcalorimetric curves of cement pastes containing by-pass dust show that both the total amount of evolved heat and the rate of heat evolution over time do not differ significantly, as compared to reference cement pastes without by-pass dust.

Comparing the microcalorimetric curves of cement pastes with and without cement kiln by-pass dust is showing the changes in the rate of hydration heat evolution [Figs. 1 and 2]. It can be noticed that the introduction of dust in the amount up to 1.7% does not extend the induction period nor causes the changes, exceeding the reproducibility value of the test method. Also, the key points

for this hydration period, i.e. its beginning and its end, are not shifted in relation to the analogous points for reference cements.

Also, the values of total heat evolved and its evolution in the post-induction period, do not show significant differences for the tested Portland cements and slag cements, without or with cement kiln by-pass dust addition. Therefore, it can be concluded that the introduction of cement by-pass dust in an amount of up to 1.7% does not affect the progress of hydration in its initial stage.

Small, only a few percent, differences in the hydration heat evolved after 24, 41 and 72 hours are smaller than the standard ranges of repeatability and reproducibility, of the method of measuring the heat of hydration. Therefore, it should be assumed that the investigated additions of cement kiln by-pass dust do not cause neither a decrease nor an increase, in the total amount of hydration heat released [Table 4].

przyspieszyć zwiększając jego miąłkość (27). Należy jednak pamiętać, że użyte w badaniach cementy CEM I i CEM III zostały przygotowane poprzez zmielenie surowców do takiej samej powierzchni Blaine'a [tablica 2].

Dodanie pyłu cementowego z bocznika gazów do cementów CEM I i CEM III nie wpływa znacznie na czas początku wiązania zaczynu cementowego. Początek czasu wiązania zaczynu CEM I+1.7PBG ulega nieznacznemu skróceniu, o 4 minuty w porównaniu z wzorcowym zaczynem CEM I. Dodatek PBG do cementu hutniczego powoduje większe skrócenie początku czasu wiązania. Wynika to z pozytywnego wpływu jonów chlorowych, które sprzyjają hydratacji żużla wielkopieczowego (28). Ponadto rozwinięta powierzchnia właściwa pyłu może służyć jako miejsce zarodkowania produktów hydratacji we wczesnym etapie hydratacji cementu (29). Początek czasu wiązania zaczynu z CEM III+1.7PBG jest krótszy o 10 minut w porównaniu z wzorcowym zaczynem CEM III.

3.4. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie zapraw z cementów CEM I i CEM III z dodatkiem i bez pyłu z bocznikowania gazów z pieca cementowego, zestawiono odpowiednio w tablicach 5 i 6.

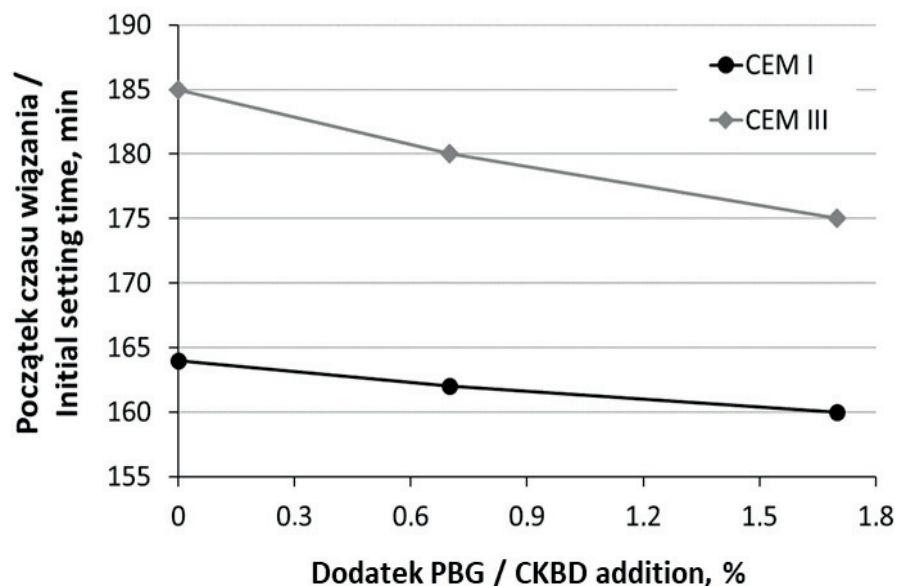
Po 1 dniu hydratacji wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementu hutniczego z dodatkiem PBG, lub bez tego dodatku, jest mniejsza niż w przypadku zapraw z cementu portlandzkiego zawierającego taką samą ilość PBG. Wynika to z mniejszej zawartości klinkieru portlandzkiego w cemencie hutniczym [wszystkie badane cementy hutnicze zawierają 53,5% żużla wielkopieczowego – tablica 2]. Wraz z upływem czasu hydratacji przyrost wytrzymałości na ściskanie zapraw z dodatkiem pyłu z bocznikowania gazów cementowych jest większy, co można przypisać większej zawartości wolnego CaO i siarczanów w pyłe. Może to powodować krystalizację wodorotlenku wapnia i ettringitu w zaprawie. Większy przyrost wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych z CEM III zawierających PBG wynika z większego przyrostu ilości produktów hydratacji [faza C-S-H] i lepszemu wypełnieniu wolnych przestrzeni

Tablica 5 / Table 5

COMPRESSIVE STRENGTH OF CEM I MORTARS

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE ZAPRAW Z CEMENTÓW CEM I

Zaprawa Mortar	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa			
	1 dzień 1 day	2 dni 2 days	28 dni 28 days	90 dni 90 days
CEM I	11.4	24.5	56.4	59.6
CEM I+0.7PBG	13.2	26.0	58.7	63.2
CEM I+1.7PBG	13.5	27,3	60.4	66.0



Rys. 4. Początek czasu wiązania zaczynów cementowych z cementów hutniczych CEM III z PBG

Fig. 4. Initial setting time for CEM III cement pastes with various contents of cement kiln by-pass dust

3.3. Standard consistency and initial setting time

The water demand for standard paste consistency and setting time for Portland and slag cements without and with 0.7% and 1.7% by-pass dust addition, are plotted respectively in Figs. 3 and 4. The standard consistency of the paste made of CEM I require a little more water: 131.5 g water per 500 g of cement, compared to paste CEM III: 129.5 g water per 500 g of cement. The addition of the blast furnace slag causes the prolongation of the initial setting time of cement pastes. The water demand of cement pastes CEM I and CEM III with the addition of cement kiln by-pass dust, expressed as a w/c ratio, is increasing with an increase in the content of dust in cement, as shown in Fig. 3. This may be attributed to the increase in surface area of cement due to cement kiln by-pass dust addition, as well as, high alkali content, sulphates and free lime in cement containing by-pass dust (7, 25). For this reason, the use of cement kiln by-pass dust requires more water to obtain cement paste, of standard consistency. For paste CEM I+1.7CKBD, the water needed to prepare the cement paste of standard consistency is increased by 4%, in comparison to reference paste CEM I. For paste CEM III+1.7CKBD, the increase in water demand is 5%, as compared to reference paste CEM III.

Tablica 6 / Table 6

COMPRESSIVE STRENGTH OF CEM III MORTARS

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE ZAPRAW Z CEMENTÓW CEM III

Próbka / Sample	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa			
	1 dzień 1 day	2 dni 2 days	28 dni 28 days	90 dni 90 days
CEM III	11.5	26.3	48.8	56.6
CEM III+0.7PBG	11.6	27.7	50.4	57.5
CEM III+PBG	11.8	29.7	52.7	58.6

w twardniejącym zaczynie cementowym (7, 26, 30). Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie zaprawy z cementu hutniczego przez dodatek PBG wynika również z potencjalnej aktywacji żużla wielkopieczowego przez alkalia pochodzące od i intensywniejszemu wytrącaniu się produktów hydratacji żużla (24, 31). Dzięki temu mikrostruktura twardniejącej zaprawy z cementu CEM III z dodatkiem pyłu cementowego z bocznika gazów jest mniej porowata, a tym samym ma większą wytrzymałość i większą szczelność.

Wytrzymałość na ściskanie cementów CEM I i CEM III zawierających dodatek 0,7% lub 1,7% pyłu z bocznikowania gazów cementowych wykazują różnice, ale na tyle niewielkie, że nie wpływają one na klasę wytrzymałości tych cementów w porównaniu z wzorcowymi cementami CEM I i CEM III bez dodatku pyłu. W każdym przypadku, niezależnie od ilości wprowadzonego dodatku PBG, są to nadal cementy odpowiednio typu i klasy CEM I 42,5R lub CEM III/A 42,5N według normy PN-EN 197-1:2012.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości cementów CEM I i CEM III zawierających pył z bocznikowania gazów z pieca cementowego w ilości do 1,7% masy cementu, co wynikało z ograniczenia całkowitej zawartości jonów chlorkowych w cementach, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 197-1:2012. Konsystencja normowa i początek czasu wiązania zaczynu cementowego z dodatkiem do 1,7% pyłu nie wykazuje dużych zmian, w stosunku do zaczynu bez dodatku pyłu. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych z dodatkiem pyłu wykazuje pewne różnice, jednak są one niewielkie i nie wpływają na klasę wytrzymałości analizowanych cementów. Uzyskane wyniki badań wskazują na możliwość zastosowania pyłu z bocznikowania gazów z pieców cementowych jako składnika drugorzędowego do cementów CEM I i CEM III, bez wpływu na ich właściwości użytkowe. Potencjalne zastosowanie pyłu z bocznikowania gazów jako częściowego zamiennika klinkieru portlandzkiego w cemencie, wymaga kontroli zawartości alkaliów, siarczanów i chloru w pyłe. Duża zawartość alkaliów w dodawanym do cementu pyłe z bocznika gazów cementowych stwarza potencjalne problemy z reakcją kruszyw krzemionkowych z wodorotlenkiem sodu i potasu, rozpuszczonymi w fazie ciekłej zaczynu. Ze względu na dużą zawartość jonów chlorkowych, stosowanie tych pyłów może powodować korozję stali w żelbecie.

Literatura / References

1. W. Kurdowski, M. Soboń, Mineral composition of build-up in cement kiln preheater, *J. Thermal. Anal.* **55**, 1021-1029 (3) (1992).
2. J. Duda, W. Putra, Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego, *Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych – wydanie specjalne*, Opole, 2004.
3. W. Kalinowski, L. Janecka, Zakłócenia procesu wypalania klinkieru przy zwiększonym udziale paliw alternatywnych, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* **15**, 33-44 (2013).
4. D.L. Abeln, R.J. Portland Cement Association., R.J. Schreiber, C. Yonley, Detailed Illustration of Contingent Management Practices for Cement Kiln

The initial setting time of reference cement CEM I is 164 minutes, whereas the initial setting time of reference CEM III cement is increased to 185 minutes. This is due to the substitution of a part of Portland cement clinker by blast furnace slag in cement CEM III in which Na and K are in slag glass and react slowly. The blast furnace slag does not set itself when mixed with water or sets very slowly, and it becomes active only under the influence of alkaline or sulphate environment [latent hydraulic properties of blast furnace slag] (26). The hydration of blast furnace slag over time can be accelerated by increasing its fineness (27). However, it must be remembered that cements CEM I and CEM III used in the experiment were prepared by grinding raw materials to obtain the same Blaine fineness (Table 2).

The addition of cement kiln by-pass dust to CEM I and CEM III cements does not significantly influence their initial setting time. The initial setting time of paste CEM I+1.7CKBD is marginally decreased, by 4 minutes, as compared to that of the reference cement CEM I. The addition of the cement kiln by-pass dust to slag cement causes the greater shortening of initial setting time. This is due to the positive influence of chloride ions, which promotes hydration of blast furnace slag (28). Moreover, the high surface area of the dust may serve as the nucleation site during the early hours of cement hydration process (29). The initial setting time of cement CEM III+1.7PBG is decreased by 10 minutes, as compared to reference cement CEM III.

3.4. Compressive strength

The compressive strength of cement mortars made from CEM I and CEM III cements, with and without cement kiln by-pass dust are given in Tables 5 and 6 respectively.

At 1 day of hydration, the compressive strength of all slag cement mortars, with or without cement kiln by-pass dust, is lower than those of Portland cement mortars containing the same addition of dust. This is due to the lower content of Portland cement clinker in slag cement, caused by partial substitution of this component by blast furnace slag [all slag cements contain 53.5% of blast furnace slag – Table 2]. With the time of hydration, the increase in compressive strength of cement mortars CEM I and CEM III containing cement by-pass dust is greater than that without cement by-pass dust, which may be attributed to a higher content of available free lime and sulphates in investigated by-pass dust, contributing toward higher strength of cements by forming the calcium hydroxide and ettringite. The greater development of compressive strength of hardened slag cement mortar CEM III in the presence of cement kiln by-pass dust results from the increase of the amount of hydration products, such as C-S-H phase, and their accumulation within the available spaces, between unreacted cement grains (7, 25, 30). In addition, the increased values of compressive strength of slag cement mortar with the addition of by-pass dust is due to the potential activation of blast furnace slag fraction in slag cements, with the alkalis present in the dust, and more intensive precipitation of hydration products of blast furnace slag (24, 31). As a result, the microstructure of hardening cement mortar CEM III with cement

Dust, Serial No. SP 115T, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1993.

5. K.E. Daugherty, A.O. Wist, Review of Cement Industry Pollution Control, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **52**, 189 (1975).
6. W. Nocuń-wczelik, K. Stolarska, Calorimetry in the studies of by-pass cement kiln dust as an additive to the calcium aluminate cement, *J. Therm. Anal.* **138**, 4561-4569 (2019).
7. M. Heikal, I. Aiad, I.M. Helmy, Portland cement clinker, granulated slag and by-pass cement dust composites, *Cem. Concr. Res.* **32**, 1805-1812 (2002).
8. W.S. Adaska, P.E., D.H. Taubert, *EEE Cement Industry Technical Conference Record*, p. 210, Miami, 2008.
9. M.Y. Al-Aghbari, R.K. Dutta, Effect of cement and cement by-pass dust on the engineering properties of sand, *Int. J. Geotechn. Sci.* **2**, 427-433 (2008).
10. H.M. Mostafa, E.M. Rashed, A.H. Mostafa A.H., 9th International Water Technology Conference, p. 133, Sharm El-Sheikh, 2005.
11. W.I. Abdel-Fattah, H. El-Didamony, Thermal investigation on electrostatic precipitator kiln dust, *Thermochim. Acta* **51**, 297-306 (1981).
12. K.S. Al-Jabri, R.A. Taha, M. Al-Ghassani, Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials, *Cem. Concr. Aggregates* **24** (1), 7-12 (2002).
13. K.S. Al-Jabri, R.A. Taha, A. Al-Hashmi, A.S. Al-Harthy, Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* **20** (5), 322-331 (2006).
14. A.M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th edition, Pearson United Kingdom, 2011.
15. P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concrete, Microstructure, Properties and Materials*, 3rd ed., McGraw Hill, 2006.
16. U. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete – A review, *Cem. Concr. Res.* **39**, 1122-1138 (2009).
17. E. Štepanková, L. Kalina, V. Bílek, E. Bartonicková, Utilization of by-pass cement kiln dust in alkali-activated materials, *Key. Eng. Mater.* **761**, 23-26 (2018).
18. S.D. Wang, K.L. Scrivener, P.L. Pratt, Factors affecting the strength of alkali-activated slag, *Cem. Concr. Res.* **24**, 1033-1043 (1994).
19. C. Shi, R.L. Day, Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends, *Adv. Cem. Res.* **11**, 189-196 (1999).
20. P. Czapik, J. Zapała-Sławeta, Z. Owsiak, P. Stępień, Hydration of cement by-pass dust, *Constr. Build. Mater.* **231**, 117-139 (2020).
21. W. Kurdowski, *Chemistry of cement and concrete*, Springer, Dordrecht, 2014.
22. W. Zapaśnik, Przyczyny oraz przykłady występowania reakcji alkalia-kruszywa (AAR) w betonie, na podstawie doświadczeń amerykańskich i australijskich. Część 1. Przyczyny reakcji alkalia-kruszywa (aar) w betonie, *Drogownictwo* **8**, 259-265 (2015).
23. R.H. Bogue, Calculation of the Compounds in Portland Cement, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* **1**, p. 192-197 (1929).
24. M.S. Konsta-Gdoutos, S.P. Shah, Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag, *Cem. Concr. Res.* **33**, 1269-1276 (2003).
25. S. Abd El-Aleem, M. Abd El-Aziz, M. Heikal, H. El-Didmomy, Effect of cement kiln dust substitution on chemical and physical properties and compressive strength of portland and slag cement, *Arab. J. Sci. Eng.* **30**, 263 (2005).

kiln by-pass dust, shows greater compactness, lower porosity, and as a consequence, higher strength.

The compressive strength of cements CEM I and CEM III with 0.7% or 1.7% addition of cement kiln by-pass dust show differences, but these differences are small and the addition of cement kiln by-pass dust does not affect the strength class of these cements as compared to reference cements CEM I and CEM III, without the addition of dust. In each case, regardless of the content of the cement kiln by-pass dust in cement, they are still cements type CEM I 42.5R or CEM III/A 42,5N respectively, according to PN-EN 197-1:2012 standard.

4. Conclusions

The paper presents the results of investigations of the properties of cements CEM I and CEM III containing cement kiln by-pass dust in the amount of up to 1.7%, which resulted from the limitation of the total amount of chloride ions in cements following requirements of PN-EN 197-1:2012 standard. The standard consistency and the initial setting time of cements with the addition of up to 1.7% of dust, does not show significant differences with respect to cements without dust. The compressive strength of hardened cement mortars with the addition of dust shows some differences, but these differences are small and do not affect the strength class of cements. In each case, cements are still CEM I 42.5R or CEM III/A 42,5N respectively. The results indicate the possibility of using of cement kiln by-pass dust as a secondary component for cements CEM I and CEM III, without affecting on their physical and mechanical properties. However, the potential application of cement kiln by-pass dust as partial replacement of Portland cement clinker in cement, requires the control of alkalis, sulphates and chlorides content in by-pass dust. The high alkalis content in cement by-pass dust presents potential problems with the alkali-silica reaction in cement mortar or concrete. Due to the high concentration of chloride ions, the use of cement kiln by-pass dust with high chloride content may cause corrosion of steel in reinforced concrete.

26. Ł. Gołek, E. Kapeluszna, K. Rzepa, Investigations of the glass activity in municipal and special incinerating plants waste, *Cement Wapno Beton* **22** (1), 77-89 (2017).
27. J. Pawluk, P. Zajd, The importance of grinding technology in the strength development of blastfurnace cement CEM III/A, *Cement Wapno Beton* **22** (2), 138-144 (2017).
28. D.P. Bentz, F. Zunino, D. Lootens, Chemical vs. Physical Acceleration of Cement Hydration, *Concr. Int. Des. Constr.* **38**, 37-44 (2016).
29. R. Wang, G. Wang, Acceleration effect of rice husk ash on hydration of styrene-acrylic ester/cement composite pastes, *Cement Wapno Beton* **23** (5), 396-406 (2018).
30. Z. Osmanovic, N. Haračić, J. Zelić, Properties of blastfurnace cements (CEM III/A,B, C) based on Portland cement clinker, blastfurnace slag and cement kiln dusts, *Cem. Concr. Compos.* **91**, 189-197 (2018).
31. M.S. Konsta-Gdoutos, S.P. Shah, S. Bhattacharja, Development and performance of cement kiln dust-slag cement, *Challenges Concr. Constr.* **5**, 403-410 (2002).