

ANDRZEJ DUSZYŃSKI<sup>1)</sup>WIKTOR JASIŃSKI<sup>2)</sup>ŁUKASZ JÓRDECZKA<sup>3)</sup>MARIA BRENNER<sup>4)</sup>

## VERIFICATION OF THE SAMPLE PREPARATION PROCEDURE FOR STRENGTH TESTING OF SELECTED HYDRAULIC ROAD BINDERS

### WERYFIKACJA PROCEDURY PRZYGOTOWANIA PRÓBEK DO BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI WYBRANYCH HYDRAULICZNYCH SPOIW DROGOWYCH

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono systemy przygotowania próbek do badania wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych, obejmujące wykonanie i dojrzewanie próbek. Wykonanie obejmuje zagadnienie składu mieszanki (zaprawa lub zaczyn) wraz z doбором ilości wody. W zakresie dojrzewania próbek wyróżniono dwa sposoby: w kąpeli wodnej i w wilgotnym powietrzu. Badania przeprowadzono dla przykładowych hydraulicznych spoiw drogowych o różnej zawartości składników krzemionkowych i wapiennych. Do opisu badanych spoiw wykorzystano również badania pozostałości na sicie 45  $\mu\text{m}$ . Wyniki badań potwierdziły potrzebę wyróżnienia w badaniach wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych różnych systemów przygotowania próbek na cele klasyfikacji tych spoiw pod względem ich działania i funkcji w konstrukcji nawierzchni drogowej lub ulepszonym podłożu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** cement, dojrzewanie próbek, metodyka badań, popiół lotny krzemionkowy, popiół lotny wapienny, spoiwa drogowe, wykonanie próbek, wytrzymałość na ściskanie.

**ABSTRACT.** The article presents various systems of sample preparation for testing of compressive strength of hydraulic road binders, encompassing the manner of sample formation and curing, as well as determination of mixture composition (mortar or paste) and water content. Two methods of sample curing were taken into account: in water bath and in humid air. Research was performed on chosen hydraulic road binders with varying content of calcareous and siliceous constituents. The tested binders were also characterized in terms of proportion of material retained on 45  $\mu\text{m}$  sieve. The obtained results confirmed the need for distinction between various systems of specimen preparation in road binder compressive strength testing in order to appropriately classify the binders according to their performance and functions in road pavements or improved subgrades.

**KEYWORDS:** calcareous fly ash, cement, compressive strength, hydraulic road binders, sample preparation, siliceous fly ash, specimen curing, test methodology.

DOI: 10.7409/rabdim.021.027

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Ośrodek Badań Mostów, Betonów i Kruszyw, Filia Wrocław, 55-140 Żmigród-Węglewo; aduszynski@ibdim.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Ośrodek Badań Mostów, Betonów i Kruszyw, Filia Wrocław, 55-140 Żmigród-Węglewo; wjasinski@ibdim.edu.pl

<sup>3)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Ośrodek Badań Mostów, Betonów i Kruszyw, Filia Wrocław, 55-140 Żmigród-Węglewo; ljrdeczka@ibdim.edu.pl

<sup>4)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mbrenner@ibdim.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Właściwości użytkowe spoiw hydraulicznych wg zasadniczych charakterystyk określają normy z serii PN-EN 13282 [1] oraz – dla spoiw drogowych – Krajowe Oceny Techniczne IBDiM. W spoiwach drogowych wg Krajowych Ocen Technicznych zazwyczaj stosuje się następujące składniki:

- składniki główne wiążące:
  - cement (C),
  - klinkier cementu portlandzkiego (K),
  - wapno hydratyzowane (S),
  - wapno palone mielone (CL),
- popioły ze spalania węgla kamiennego lub brunatnego:
  - popiół lotny krzemionkowy (V),
  - popiół lotny wapienny (W),
  - popioły lotne z kotłów fluidalnych (Va),
- składniki drugorzędne:
  - siarczan wapnia (Cs),
  - składniki mineralne,
  - składniki wspomagające proces wiązania spoiwa,
  - regulatory czasu wiązania (opóźniające/przyspieszające proces wiązania spoiwa).

Do głównych składników spoiw drogowych, poza składnikami wiążącymi, należą surowce uzyskane z odpadów elektrownianych. Odpady te powstają w energetyce głównie w procesie spalania surowców energetycznych (węgiel kamienny i brunatny) oraz w wyniku oczyszczania gazów odlotowych [2]. Zalicza się do nich między innymi: żużle ze spalania węgla kamiennego, żużle ze spalania węgla brunatnego, popioły lotne z węgla kamiennego, popioły lotne z węgla brunatnego, mieszanki popiołowo-żużlowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych, mikrosfery z popiołów lotnych, stałe odpady z wapniowych metod odsiarczania spalin (w tym gips poreakcyjny [3]), odpady z odsiarczania wg metody półsuchej i suchej, jak również mieszaniny wapiennych popiołów lotnych i odpadów stałych z różnych wymienionych wcześniej źródeł [4 - 6].

W Tabl. 1 przedstawiono zestawienie składu i działania niektórych rodzajów popiołów lotnych [5 - 7]. Nie wymieniono żużli paleniskowych, które po zmieleniu – lub w przypadku ziarn poniżej 2 mm – również są stosowane jako składniki spoiw drogowych niższych klas.

## 1. INTRODUCTION

Relationships between functional properties of hydraulic binders and their basic characteristics are described in the PN-EN 13282 series of standards [1] and – for road binders – in National Technical Assessment documents issued by the Road and Bridge Research Institute (IBDiM). According to the latter, the following components are typically used in road binders:

- primary binding constituents:
  - cement (C),
  - Portland cement clinker (K),
  - hydrated lime (S),
  - ground quicklime (CL),
- fly ashes from combustion of black coal and lignite:
  - siliceous fly ash (V),
  - calcareous fly ash (W),
  - fly ashes from fluidized bed boilers (Va),
- secondary constituents:
  - calcium sulphate (Cs),
  - mineral components,
  - binder setting enhancers,
  - setting time controllers (retarders/accelerators).

Primary components of road binders, beside the binding constituents, include materials obtained from power plant waste. These materials are by-products of the power industry, collected mainly due to combustion of resources (black coal and lignite) and treatment of flue gases [2]. They include, among others: slags and fly ashes from combustion of black coal and lignite, ash-slag mixtures from wet treatment of furnace waste, fly ash microspheres, solid waste from lime-based flue gas desulphurization (including by-product gypsum [3]), waste from dry and semi-dry desulphurization, as well as mixtures of calcareous fly ashes and solid waste from the aforementioned sources [4 - 6].

Table 1 presents a comparison of composition and effect of chosen types of fly ashes [5 - 7]. Boiler slags, which were not mentioned, may also be used in road binders of lower classes – upon milling or if their grain size does not exceed 2 mm.

Table 1. Composition and effect of chosen types of fly ashes (based on [5 - 7])  
 Tablica 1. Skład i działanie niektórych rodzajów popiołów lotnych (na podstawie [5 - 7])

Ash type / Rodzaj popiołu	Composition / Skład	Effect / Działanie
Fly ash from pulverized coal boilers Popioły lotne z kotłów pyłowych	<ul style="list-style-type: none"> <li>siliceous ashes formed during combustion of black coal in pulverized coal boilers / krzemionkowe powstające podczas spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pozzolanic; component of cements and hydraulic binders, an active type II additive in concrete / pucolanowe; składnik cementów i spoiw hydraulicznych oraz aktywny dodatek typu II w składzie betonu.</li> </ul>
Fly ash from black coal combustion from fluidized bed boilers Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego z kotłów fluidalnych	<ul style="list-style-type: none"> <li>high content of calcium sulfate / duża zawartość siarczanu wapnia,</li> <li>high activity of calcium oxide content / duża aktywność występującego w nich tlenku wapnia,</li> <li>high content of calcium sulfate and sometimes relatively high content of magnesium oxide / duża zawartość siarczanu wapnia i niekiedy stosunkowo duża ilość tlenku magnezu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>excessive increase in strength in later stages of hardening / nadmierny przyrost wytrzymałości w późniejszym okresie twardnienia,</li> <li>pozzolanic activity / aktywność pucolanowa,</li> <li>high specific surface area, resulting in high water demand / duża powierzchnia właściwa, stąd wysoka wodożądność.</li> </ul>
Lignite fly ash Popioły lotne z węgla brunatnego	<ul style="list-style-type: none"> <li>variable composition / zmienny skład,</li> <li>changes in composition and properties during storage on disposal sites / zmiany składu i właściwości podczas deponowania na składowiskach,</li> <li>dominating components: quartz, calcium oxide and anhydrite / dominują w nich: kwarc, tlenek wapnia oraz anhydryt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pozzolanic and hydraulic properties / właściwości pucolanowe i hydrauliczne,</li> <li>changes of: a) calcium oxide into calcium hydroxide, and subsequently into calcium carbonate; b) anhydrite into gypsum; leading to changes in fly ash properties, including setting and hardening / przemiany: a) tlenek wapnia w wodorotlenek wapnia, a następnie w węglan wapnia; b) anhydryt w gips; prowadzą do zmian właściwości popiołów lotnych, w tym wiązania i twardnienia.</li> </ul>
Fly ash from co-firing of coal and large amounts of biomass Popioły lotne ze współspalania węgla i dużych ilości biomasy	<ul style="list-style-type: none"> <li>variable chemical composition, depending on type of biomass / zróżnicowany skład chemiczny w zależności od rodzaju biomasy,</li> <li>high loss on ignition / duże straty prażenia,</li> <li>sometimes high content of alkalia, phosphates and chlorides / niekiedy duża zawartość alkaliów, fosforanów i chlorków.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>high content of alkalic components, SO<sub>3</sub>, Cl<sup>-</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO / duża zawartość składników alkalicznych, SO<sub>3</sub>, Cl<sup>-</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO.</li> </ul>
Fly ash from biomass combustion Popioły lotne ze spalania biomasy	<ul style="list-style-type: none"> <li>variable chemical and phase composition, depending on the material subjected to combustion / zróżnicowany skład chemiczny i fazowy w zależności od spalanego materiału.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>usually lack of pozzolanic properties and hydraulic activity / na ogół brak właściwości pucolanowych i aktywności hydraulicznej.</li> </ul>

W budownictwie drogowym znajdują zastosowanie spoiwa powszechnego użytku i spoiwa drogowe. W spoiwach drogowych [8, 9] i cementach [10] we właściwym zakresie wykorzystywane są popioły lotne wapienne [9 - 11] o odpowiedniej aktywności pucolanowej i hydraulicznej [11].

Przy zastosowaniu spoiw drogowych możliwy jest właściwy dobór ich składników do określonego przypadku, z uwzględnieniem matrycy gruntowej lub kruszywowej, przeznaczenia do określonej warstwy nawierzchni, jak również działania oraz ilości stosowanego spoiwa. Jednocześnie stosowanie

In road construction, general use binders and road binders may be applied. Road binders [8, 9] and cements [10] include proper content of calcareous fly ashes [9 - 11] of adequate pozzolanic and hydraulic activity [11].

Use of road binders enables proper adjustment of their composition to the individual case, taking into account the composition and grading of soil or aggregate, intended use of the material in specific pavement layer, as well as the effect and quantity of binder used. Use of aggregates with binding properties or road binders of classes up to 12.5 in

kruszywa o właściwościach wiążących (zescalających) czy spoiwa drogowego klas do 12,5 włącznie w ulepszeniach słabych gruntów jest również korzystne pod względem ekonomicznym. Spoiwa drogowo są produkowane przez zakłady produkcji spoiw lub firmy zajmujące się utylizacją popiołów lotnych, mogące z większym rozeznaniem dostosować rodzaj spoiw do potrzeb na poziomie mikro (budowy) lub makro (regionu) [12]. Stąd w przypadku spoiw drogowych nie ma uzasadnienia prowadzenie badań w sposób identyczny jak dla cementów. Istnieje wiele argumentów przemawiających za rozszerzeniem rozpoznania badawczego, między innymi:

- stabilizowany grunt lub kruszywo może nie zawierać piasków naturalnych,
- spoiwo drogowo może zawierać zarówno frakcje drobne, jak i ziarna nawet do 6,3 mm,
- wbudowanie mieszanki stabilizowanej odbywa się przy wilgotności optymalnej,
- wbudowanie oraz praca stabilizowanej lub ulepszonej warstwy w konstrukcji drogi zachodzi w warunkach wilgotnych, lecz przy pełnym odwodnieniu drogi (bez nasycenia wodą),
- spoiwo drogowo może pełnić również inne funkcje poza wiązaniem, np. osuszanie, uzupełnienie składu ziarnowego,
- spoiwo drogowo może zawierać wapno palone lub składniki szybkowiązące, szczególnie przy zastosowaniu w gruntach organicznych.

W związku z tym klasyfikacja spoiw drogowych tylko i wyłącznie w oparciu o metody badań dla cementów jest niejednokrotnie nieodpowiednia i prowadzi do ograniczenia zakresu zastosowań takich spoiw, zaniżenia ich klasy lub wręcz do ich eliminacji w dokumentach przetargowych. W pierwszej kolejności jest to związane z metodą badania wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych.

Obniżenie lub zwiększenie konsystencji normowej zaczynu obserwowano podczas niemal wszystkich prowadzonych w IBDiM badań hydraulicznych spoiw drogowych. Również w badaniach [13] dla spoiwa hydraulicznego z pyłem CBPD (ang. *cement by-pass dust*) normową konsystencję zaczynów osiągnięto po zwiększeniu współczynnika wodno-spoiwowego o 40%.

W przypadku zaprawy sposób oznaczania wytrzymałości na ściskanie określa norma PN-EN 196-1 [14]. Badanie wytrzymałości na ściskanie jest prowadzone tylko i wyłącznie dla zaprawy normowej o ściśle określonym składzie: 1 części wagowej cementu (450 g), 3 części wagowych piasku normowego (1350 g) i 0,5 części wagowych wody (225 g). Beleczyki o wymiarach 40 × 40 × 160 mm są wykonane w ściśle określonych

improvement of weak soils has clear economic advantages. Road binders are produced by binder production plants or companies that specialize in fly ash utilization, which may customize the binder material according to the needs of customers on micro (single project) and macro (regional) level [12]. Therefore, in the case of road binders, the fact that they are often tested in the same manner as cements is not justified. There are various arguments that indicate the need for broader test approach. They include the following aspects:

- stabilized soil and aggregate may or may not contain natural sands,
- road binders may contain fine grains as well as grains up to 6.3 mm,
- stabilized mixture layer is placed at optimum moisture,
- stabilized or improved layers are constructed and function in pavement structures in wet conditions, but the road is fully drained (material is not saturated with water),
- road binders may serve other functions apart from binding, e.g.: drying, improvement of grading,
- road binders may contain quicklime or quick-setting components, especially when used in organic soils.

Therefore, classification of road binders solely on the basis of tests typically used for cements is often insufficient and leads to unnecessary reduction in the scope of possible applications of such binders, underestimation of their class and their elimination from tender documents. The primary cause is the typically adopted method of compressive strength testing.

A decrease or increase in standard consistency of paste was observed in almost all hydraulic road binder tests performed by the IBDiM. In tests [13] of hydraulic road binder with cement by-pass dust (CBPD), the standard consistency of paste was also reached only after the water-binder ratio had been increased by 40%.

In the case of mortar, the manner of determination of compressive strength is established by the PN-EN 196-1 standard [14]. Compressive strength testing is performed only for the standard mortar of expressly defined composition (in terms of weight): 1 part cement (450 g), 3 parts standard sand (1350 g) and 0.5 parts water (225 g). Bars of dimensions 40 × 40 × 160 mm are prepared under precisely determined time and temperature conditions. After 24 hours of storage in the molds they are demolded and submerged in water. They remain stored in water until their compressive strength is tested. The essential deficiency of such a procedure in the case of road binders



warunkach termicznych i czasowych. Po stwardnieniu (po 24 godzinach od wykonania zarobów) są rozformowane i przechowywane w wodzie do czasu badania wytrzymałości na ściskanie. W odniesieniu do spoiw drogowych zasadniczym niedostatkim takiej procedury badawczej jest stały udział wody w zaprawie, niezależny od rodzaju spoiwa, oraz sposób dojrzewania w wodzie.

Wskazane powyżej argumenty dotyczące specyfiki i różnych warunków pracy warstw podbudów drogowych oraz stałości konsystencji zaprawy w badaniach cementów skłoniły IBDiM podczas przygotowania Krajowych Ocen Technicznych dotyczących spoiw drogowych do opracowania procedury badawczej poszerzającej możliwości przewidziane w PN-EN 196-1 [14]. Procedurę badawczą przygotowania próbek do badania wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych przedstawiono w całości poniżej (rozdział 2.1).

Celem podjętych badań było rozpoznanie wpływu procedury przygotowania próbek wybranych spoiw drogowych o zróżnicowanym składzie na uzyskany wynik wytrzymałości na ściskanie. Zakres badań obejmował pięć hydraulicznych spoiw drogowych zróżnicowanych między innymi pod względem zawartości cementu: trzy spoiwa zawierały poniżej 10% cementu, zaś dwa – co najmniej 40%. Pozostałymi składnikami były: wapno palone, popioły wapienne i popioły krzemionkowe.

## 2. BADANIA SPOIW DROGOWYCH

### 2.1. PROCEDURA PRZYGOTOWANIA PRÓBEK DO BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

Przygotowanie próbek do badania wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych obejmuje zarówno wykonanie (formowanie), jak i warunki dojrzewania próbek (beleczek  $40 \times 40 \times 160$  mm). Opracowana procedura przygotowania próbek jest modyfikacją i rozszerzeniem metody badania wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 196-1 [14], a zatem pozostałe, niewspomniane tutaj aspekty formowania próbek są regulowane właśnie przez tę normę. W badaniach wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych zastosowano zróżnicowany sposób przygotowania próbek ze względu na:

- skład mieszanki:
  - a) zaprawa (spoiwo z piaskiem normowym) oznaczona jako M,
  - b) zaczyn (spoiwo bez piasku normowego) oznaczony jako S,
- dojrzewanie beleczek:
  - c) dojrzewanie w kąpeli wodnej oznaczone jako W,
  - d) dojrzewanie w wilgotnym powietrzu oznaczone jako P.

is the predefined proportion of water in the mortar, irrelevant of the type of the binder and the fact that the specimens are cured in water.

Taking into consideration the above arguments regarding the specificity and different conditions of functioning of stabilized road bases as well as the constant consistency of mortar in cement testing, the IBDiM developed a broader test procedure during preparation of the National Technical Assessment documents, to expand on the options provided by the PN-EN 196-1 standard [14]. The entire developed procedure of specimen preparation for compressive strength testing of road binders will be presented below (section 2.1).

The aim of the performed research was to identify the influence of the adopted system of specimen preparation of road binders of varying content on the obtained results of compressive strength. The research encompassed five chosen hydraulic road binders that differed in terms of composition, including the differences in cement content: three binders contained below 10% of cement and two – over 40%. Other constituents included: quicklime, calcareous ashes and siliceous ashes.

## 2. ROAD BINDER TESTING

### 2.1. SAMPLE PREPARATION PROCEDURE FOR COMPRESSIVE STRENGTH TESTING

The presented procedure of preparation of samples ( $40 \times 40 \times 160$  mm bars) encompasses the manner of their formation and curing. The procedure is a modification and expansion of the compressive strength test method defined in the PN-EN 196-1 standard [14]. Therefore, all the remaining aspects that are not mentioned herein shall be regulated by the standard. In the presented research, varied systems of specimen preparation were adopted. They differed in:

- mixture composition:
  - a) mortar (binder with standard sand) labeled as M,
  - b) paste (binder without standard sand) labeled as S,
- curing of the bars:
  - c) curing in water bath, labeled as W,
  - d) curing in humid air, labeled as P.

In order to prepare the samples, it is necessary to determine the adequate water content in the standard mixtures:
 

- water content for bars of paste (without standard sand),
- water content for bars of mortar (with standard sand).

Warunkiem koniecznym wykonania próbek jest odpowiedni dobór ilości wody do mieszanek normowych:

- ustalenie ilości wody do beleczek z zaczynu (bez piasku normowego),
- ustalenie ilości wody do beleczek z zaprawy (z piaskiem normowym).

W celu umożliwienia porównania wytrzymałości na ściskanie przy różnych składach mieszanki ilość wody określano na podstawie obserwacji górnej powierzchni beleczek, przyjmując zasadę jednakowego nawilżenia  $w_g = +0$ , tj. bardzo cienkiej błyszczącej warstewki wody na powierzchni. Ocena nawilżenia górnej powierzchni beleczek ( $w_g$ : nadmiar lub niedomiar) określa się wizualnie jeszcze w formie do beleczek, zaraz po zagęszczeniu w aparacie Michaelisa wg PN-EN 196-1 [14]. Ilość wody do wykonania beleczek do następnej oceny dobiera się w zależności od obserwacji  $w_g$ , odpowiednio ją zwiększając lub zmniejszając. Kolejne pomiary przeprowadza się aż do uzyskania wilgoci górnej powierzchni beleczek  $w_g = +0$ , rejestrując stosowane ilości wody.

Ustalenie ilości wody do beleczek z zaczynu (bez piasku normowego) zaczyna się od ilości wody wynikającej z konsystencji normowej  $K_n$ , ale z ewentualną korektą wody zgodnie z przedstawioną zasadą jednakowego nawilżenia  $w_g = +0$ . Określoną w ten sposób ilość wody do beleczek bez piasku normowego oznacza się jako  $K'_n$ . Zazwyczaj nie jest konieczna korekta, a wówczas ilość wody do beleczek bez piasku normowego jest równa  $K_n$ .

Ustalenie ilości wody do beleczek z zaprawy (z piaskiem normowym) prowadzi się zgodnie z przedstawioną zasadą jednakowego nawilżenia  $w_g = +0$ . Ilość wody do beleczek z piaskiem normowym oznacza się jako  $W_b$ .

Procedurę testowano dla spoiw drogowych w zależności od zawartości składników. Wyniki badań ilości wody do beleczek bez piasku normowego  $K_n$  i z piaskiem normowym  $W_b$  zamieszczono w Tabl. 2.

Table 2. Results of the quantity of water used in the bars without standard sand  $K_n$  and the quantity of water for the bars with standard sand  $W_b$   
 Tablica 2. Wyniki ilości wody do beleczek bez piasku normowego  $K_n$  i ilości wody do beleczek z piaskiem normowym  $W_b$

Property Właściwość	Result for road binder marked with (i) / Wynik dla spoiwa drogowego oznaczonego (i)						
	1	2	3	4	5	6	7
$K_n$	98	118	180	212	230	245	301
$W_b$	212.0	225.0	242.0	247.5	270.0	270.0	292.5

Zależność  $W_b(i)$  od  $K_n(i)$  jest funkcją liniową postaci:

$$W_b(i) = 0,3858 \cdot K_n(i) + 175, \quad (1)$$

przy  $R^2 = 0,958$ ; gdzie:

In order to enable comparison of compressive strength results obtained for different mixture compositions, water content was determined based on visual assessment of the upper surface of molded bars. The adopted principle of assessment was referred to a equal moisture  $w_g = +0$ , or a very thin glistening film of water on the surface. The target appearance of the molded wet mixture (paste or mortar) was characterized by a very thin layer of water visible on its upper surface, therefore the designation “+0”. The evaluation of the upper surface and possible need for corrections ( $w_g$ : excessive or insufficient) is performed on molded specimens directly after compaction in Michaelis device according to PN-EN 196-1 [14]. If correction is needed, water content used in bars prepared for subsequent  $w_g$  observations is adequately increased or decreased. Formation and assessment of specimens is repeated until the target state of  $w_g = +0$  is observed.

In the case of bars of paste (without standard sand), determination of water content is started at the quantity of water corresponding to the standard consistency  $K_n$ , but with possible corrections made according to the principles described above ( $w_g = +0$ ). The resultant water content for bars without standard sand is designated as  $K'_n$ . Usually no corrections are necessary and the quantity of water for bars without standard sand is equal to  $K_n$ .

Determination of water content in mortar bars (with standard sand) is also performed according to the above equal moisture principle  $w_g = +0$ . The obtained quantity of water for mortar bars with standard sand is designated as  $W_b$ .

The procedure was tested on road binders of varying composition. The obtained quantities of water for bars with standard sand  $W_b$  and without it  $K_n$  are presented in Table 2.

The relationship between  $W_b(i)$  and  $K_n(i)$  is a linear function of the following form:

$$W_b(i) = 0.3858 \cdot K_n(i) + 175, \quad (1)$$

- $i$  – liczba porządkowa pomiaru,  
 $K_n(i)$  – ilość wody do beleczek bez piasku normowego [g],  
 $W_b(i)$  – ilość wody do beleczek z piaskiem normowym [g],  
 $R^2$  – współczynnik determinacji.

Zależność (1), określona dla wybranych 7 spoiw drogowych i przedstawiona na Rys. 1, charakteryzuje się wysokim współczynnikiem determinacji, tj. dopasowania. Opisana procedura przygotowania próbek jest stosowana w IBDiM z powodzeniem od 2016 roku. W przypadku spoiw specjalnych lub wymagających określonej dokładności zaleca się przeprowadzenie badania doboru ilości wody do beleczek z piaskiem normowym w aparacie Michaelisa wg PN-N 196-1 [14].

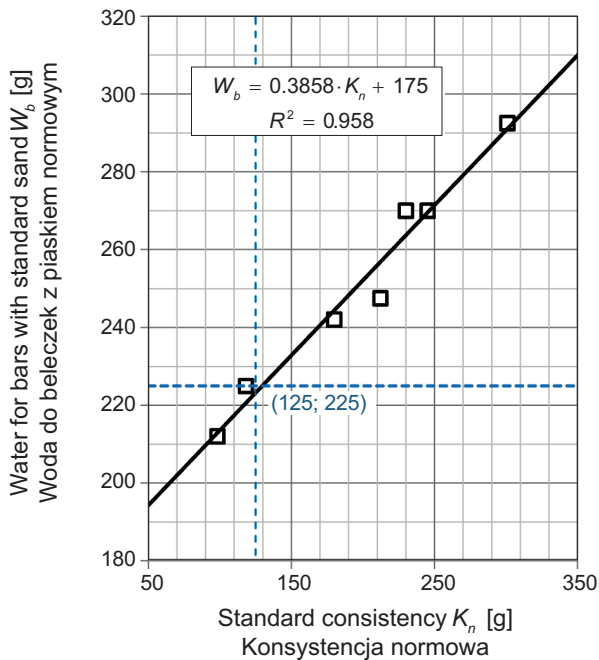


Fig. 1. Graph of the relationship between  $W_b(i)$  and  $K_n(i)$   
 Rys. 1. Wykres zależności  $W_b(i)$  od  $K_n(i)$

Po określeniu wszystkich warunków związanych z przygotowaniem beleczek do badania wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych wyróżniono i przedstawiono na Rys. 2 następujące systemy przygotowania próbek:

- system M-W – zaprawa z piaskiem normowym / dojrzewanie w kąpielii wodnej,
- system M-P – zaprawa z piaskiem normowym / dojrzewanie w wilgotnym powietrzu,
- system S-W – zaczyn bez piasku normowego / dojrzewanie w kąpielii wodnej,
- system S-P – zaczyn bez piasku normowego / dojrzewanie w wilgotnym powietrzu.

at  $R^2 = 0.958$ , where:

- $i$  – index of the measurement,  
 $K_n(i)$  – quantity of water for bars without standard sand [g],  
 $W_b(i)$  – quantity of water for bars with standard sand [g],  
 $R^2$  – coefficient of determination.

Equation (1), determined for 7 chosen road binders and presented in Fig. 1, is characterized by high coefficient of determination. The described procedure of specimen preparation has been successfully used by the IBDiM since 2016. In the case of special binders or binders requiring specific accuracy, determination of water content for bars with standard sand in Michaelis device according to PN-N 196-1 [14] is recommended.

Upon identification of the possible conditions of sample preparation for compressive strength testing of road binders, the following combinations were adopted as sample preparation systems (Fig. 2):

- M-W system – mortar with standard sand / curing in water bath,
- M-P system – mortar with standard sand / curing in humid air,
- S-W system – paste without standard sand / curing in water bath,
- S-P system – paste without standard sand / curing in humid air.

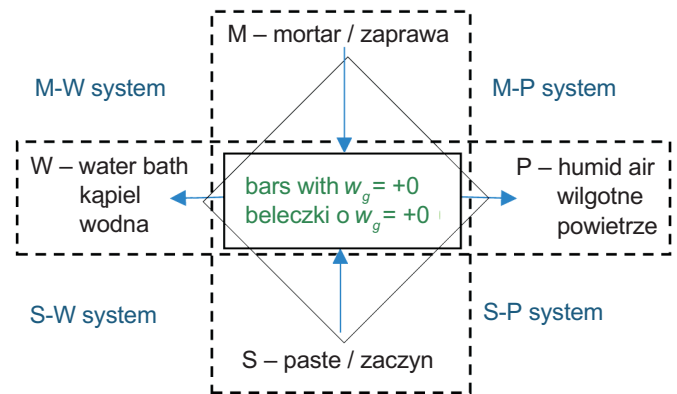


Fig. 2. Schematic representation of the conditions for preparation of beams with dimensions of 40 × 40 × 160 mm and the distinguished systems

Rys. 2. Schematyczne przedstawienie warunków przygotowania beleczek o wymiarach 40 × 40 × 160 mm i wyróżnionych systemów

## 2.2. MATERIAŁY DO BADAŃ

Do badania wpływu przygotowania próbek na uzyskaną wytrzymałość na ściskanie zastosowano następujące składniki zapraw i zaczynów:

- wybrane hydrauliczne spoiwa drogowe (HSD) wg Krajowych Ocen Technicznych IBDiM,
- piasek normowy wg PN-EN 196-1 [14].

Każde z hydraulicznych spoiw drogowych charakteryzowało się określonym składem deklarowanym przez producenta (Tabl. 3).

Table 3. Results of tests of fineness (defined as the proportion of material retained on the 45  $\mu\text{m}$  sieve), standard consistency  $K_n$  and setting time for road binders with compositions declared by the producers

Tablica 3. Wyniki badań mialkości (określanej jako pozostałość na sicie o rozmiarze oczka 45  $\mu\text{m}$ ), konsystencji normowej  $K_n$  i czasu wiązania dla spoiw drogowych o składach deklarowanych przez producentów

Property / Właściwość		Components and test results for the sample of binders labeled with the letter Składniki i wyniki badań dla próbki spoiw oznaczonych literą				
		A	B	C	D	E
Declared content Zawartość deklarowana	cement [%]	10	40	5	50	10
	quicklime / wapno palone [%]	35	5	–	–	–
	black coal ashes popioły z węgla kamiennego [%]	–	55	–	50	–
	black coal ashes – fluidised popioły z węgla kamiennego – fluidalne [%]	55	–	–	–	–
	calcareous ashes / popioły wapienne [%]	–	–	95	–	90
Fineness (material retained on 45 $\mu\text{m}$ sieve) Mialkość (pozostałość na sicie 45 $\mu\text{m}$ ) [%]		36	29	42	21	44
Standard consistency / Konsystencja normowa	[g]	263	227	252	139	319
	[%]	0.526	0.454	0.504	0.278	0.638
Initial setting time / Początek czasu wiązania [min]		11	65	60	300	40
Final setting time / Koniec czasu wiązania [min]		14	80	90	960	75

## 2.3. METODY BADAŃ

W badaniu wytrzymałości na ściskanie spoiw zastosowano przedstawioną w rozdziale 2.1. procedurę badawczą przygotowania próbek. Pomiary wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania. Oznaczenie normalnej konsystencji wykonano zgodnie z PN-EN 196-3 [15], wraz z obliczeniem stosunku  $w/c$  jako stosunku wody do spoiwa. Dodatkowo przeprowadzono badanie pozostałości na sicie 45  $\mu\text{m}$  wg PN-EN 933-1 [16] oraz badania początku i końca czasu wiązania wg PN-EN 196-3 [15], aby zasygnalizować tę ważną właściwość spoiw drogowych mieszanych.

## 3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Podstawowe zmiany wywoływane przez dodatek popiołu lotnego w spoiwie drogowym są związane z konsystencją

## 2.2. MATERIALS FOR THE TESTS

During the tests of the influence of sample preparation on the obtained compressive strength, the following materials were used in mortars and pastes:

- chosen hydraulic road binders according to the National Technical Assessment documents by IBDiM,
- standard sand according to PN-EN 196-1 [14].

Each of the selected hydraulic road binders was characterized by composition declared by the producer (Table 3).

## 2.3. TEST METHODS

Compressive strength of road binders was tested employing the sample preparation procedures described in section 2.1. Measurements of compressive strength were performed after 28 days of curing. Standard consistency was determined according to PN-EN 196-3 [15], and the  $w/c$  ratio was calculated as the ratio of water to binder. Additionally, proportion of material retained on 45  $\mu\text{m}$  sieve was determined according to PN-EN 933-1 [16]. Initial and final setting time according to PN-EN 196-3 [15] was also determined, to highlight the importance of this property of mixed road binders.

## 3. TESTS RESULTS AND DISCUSSION

The principal changes resulting from fly ash content in road binder are related to standard consistency of paste. Addition



normową zaczynu. Dodatek popiołu wapiennego może zwiększyć, zaś popiołu krzemionkowego – zmniejszyć ilość wody w zaczynie normowym. Wyniki badań konsystencji normowej zaczynu zamieszczono w Tabl. 3 i na Rys. 3. Wskazano na zależności wynikające z udziału w spoiwie drogowym popiołów wapiennych, cementu i popiołów krzemionkowych. Dla spoiwa oznaczonego literą E (z udziałem popiołów wapiennych 90%) konsystencję normową osiągnięto po zwiększeniu ilości wody o 155%, co stanowi wartość znacznie większą niż w badaniach [13] spoiwa hydraulicznego z pyłem CBPD. W Tabl. 3 można zauważyć, że pozostałość na sicie 45  $\mu\text{m}$  wyższa niż 30% została stwierdzona w przypadku popiołów fluidalnych i wapiennych przy stosunkowo niskiej zawartości cementu, co najwyżej 10%. W tym przypadku jest widoczny wyraźny wpływ takich składników na zwiększenie konsystencji normowej zaczynu. Natomiast przy popiołach z węgla kamiennego, krzemionkowych a przede wszystkim – przy stosunkowo dużej zawartości cementu, rzędu 40% i 50% – pozostałość na sicie 45  $\mu\text{m}$  wyniosła poniżej 30%, a wpływ na konsystencję normową był mniejszy.

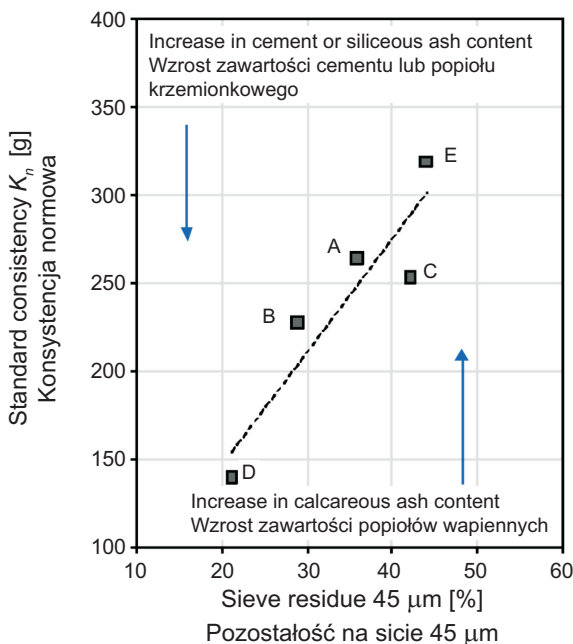


Fig. 3. Influence of fineness of the road binder (proportion of material retained on 45  $\mu\text{m}$  sieve) on the standard consistency  $K_n$ , Rys. 3. Wpływ miążkości spoiwa drogowego (określonej jako pozostałość na sicie o rozmiarze oczka 45  $\mu\text{m}$ ) na konsystencję normową

Wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wg PN-EN 196-1 [14], uzyskane w czterech różnych systemach przygotowania próbek (wg punktu 2.1) zostały przedstawione w Tabl. 4 i na Rys. 4. Wyróżnić można dwa rodzaje spoiw drogowych:

of calcareous ash may increase the needed quantity of water in the standard paste, while addition of siliceous ash may decrease it. Results of testing of standard consistency of paste are presented in Table 3 and Fig. 3. Relationships resulting from proportion of calcareous ashes, cement and siliceous ashes in road binders were analyzed. For binder labeled with letter E (containing 90% of calcareous ashes), the standard consistency was obtained upon increasing the quantity of water by 155%, to a value considerably higher than in the research [13] devoted to hydraulic binder with CBPD. As shown in Table 3, proportion of material retained on 45  $\mu\text{m}$  sieve greater than 30% was noted in the case of fluidized-bed ashes and calcareous ashes with relatively low cement content (up to 10%). In the case of such materials, the effect on standard consistency is visible. In the case of black coal combustion ashes and siliceous ashes – and primarily: at relatively high cement content, around 40% and 50% – the proportion of material retained on 45  $\mu\text{m}$  sieve was lower than 30% and the impact on standard consistency was less pronounced.

Values of 28-day compressive strength according to PN-EN 196-1 [14], obtained in four different systems of sample preparation (as described in section 2.1) are shown in Table 4 and Fig. 4. Based on the results, the tested binders may be divided into two groups:

- binders with compressive strength below 10 MPa (binders A, C and E),
- binders with compressive strength between 20 MPa and 50 MPa (binders B and D).

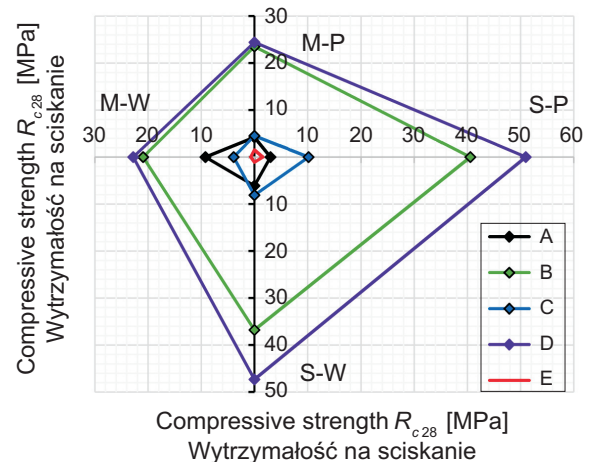


Fig. 4. Compressive strength after 28 days of curing according to PN-EN 196-1 [14] in various sample preparation systems according to section 2.1  
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wg PN-EN 196-1 [14] w różnych systemach przygotowania próbek według punktu 2.1

- o wytrzymałości na ściskanie poniżej 10 MPa, oznaczonych A, C i E,
- o wytrzymałości na ściskanie od 20 MPa do 50 MPa, oznaczonych B i D.

Table 4. Results of compressive strength tests after 28 days of curing according to PN-EN 196-1 [14] for samples prepared according to section 2.1  
 Tablica 4. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wg PN-EN 196-1 [14] uzyskane dla próbek przygotowanych wg punktu 2.1

Property / Właściwość	Test results for binder sample labeled / Wyniki badań dla próbki spoiwa oznaczonego				
	A	B	C	D	E
Compressive strength – bars stored in water bath (W) / Wytrzymałość na ściskanie – beleczki przechowywane w kąpielii wodnej (W)					
with standard sand (M) z piaskiem normowym (M) [MPa]	9.2	20.9	3.9	22.8	0.7
without standard sand (S) bez piasku normowego (S) [MPa]	6.1	36.8	8.1	47.3	1.1
Compressive strength – bars stored in humid air (P) / Wytrzymałość na ściskanie – beleczki przechowywane w wilgotnym powietrzu (P)					
with standard sand (M) z piaskiem normowym (M) [MPa]	4.2	23.5	4.5	24.4	1.5
without standard sand (S) bez piasku normowego (S) [MPa]	3.0	40.6	10.2	51.0	1.6

Badane spoiwa oznaczone literami B, C, D i E charakteryzują się około 10% wzrostem wytrzymałości na ściskanie  $R_{c28}$  przy przejściu z systemu M-W na system M-P oraz – analogicznie – z S-W na S-P. Wynika stąd, że wpływ sposobu dojrzewania jest stosunkowo niewielki w odniesieniu do wpływu, jaki ma współczynnik wody do spoiwa przy określonym sposobie wykonania próbek. Przykład takiej zależności dla spoiwa drogowego oznaczonego literą B przedstawiono na Rys. 5. Jak można zauważyć, w przypadku tego spoiwa różnica wytrzymałości na ściskanie  $R_{c28}$  przy tych samych metodach dojrzewania próbek jest większa od 15 MPa. Wyjątkiem jest zawierające 35% wapna palonego spoiwo oznaczone literą A, dla którego dojrzewanie w systemie M-W wyróżnia największą wytrzymałość na ściskanie. Zastosowanie wapna palonego w takim udziale i dojrzewanie w kąpielii wodnej prawdopodobnie wpływa znacząco na kompensację początkowych naprężeń wynikających z wiązania, a w konsekwencji – na wytrzymałość na ściskanie.

Zasadniczym czynnikiem determinującym wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania spoiw drogowych jest udział cementu. Wyznaczone współczynniki determinacji tej zależności dla każdego z systemów przygotowania próbek, nawet przy badaniu tylko pięciu spoiw drogowych, zawierają się w zakresie od 0,90 do 0,96.

Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania dla danego spoiwa (poza A) największe wartości osiąga w systemie S-P, tj. bez piasku normowego (S) i przy przechowywaniu beleczek w wilgotnym powietrzu (P). W przypadku spoiw oznaczonych literami B i D wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania badana w systemie M-W jest około 2-krotnie niższa niż w systemie S-P.

The tested binders labeled with letters B, C, D and E display an approx. 10% increase in compressive strength  $R_{c28}$  upon change from the M-W system to the M-P system and – analogously – from S-W to S-P. This fact implies that the impact of curing method is relatively low in comparison to the impact of water/binder ratio for a given manner of preparation. An example of such relationship for road binder labeled with letter B is presented in Fig. 5. It is observable that for this binder the difference in compressive strength  $R_{c28}$  between samples cured in the same conditions is greater than 15 MPa. The one exception is binder A, containing 35% of quicklime – as opposed to other binders, it reached its greatest compressive strength after curing in the system M-W. It is probable that the proportion of quicklime and curing in water bath had significant impact on compensation of the initial setting-related stresses and, consequently, on compressive strength.

A major factor that determines the 28-day compressive strength of road binders is the cement content. Coefficients of determination obtained for this relationship for each of the four sample preparation systems ranged from 0.90 to 0.96, despite the fact that only five binders were tested.

The values of compressive strength after 28 days of curing for a given binder (apart from A) are the highest in the S-P preparation system, i.e. without standard sand (S) and after curing in humid air (P). In the case of binders B and D, compressive strength after 28 days of curing obtained in the M-W system is approx. two times lower than in the S-P system.

Ważną właściwość spoiw drogowych stanowi czas wiązania, który jest ściśle związany ze składem spoiwa (Tabl. 3). Spoiwo drogowe oznaczone literą D, zawierające w swoim składzie popiół krzemionkowy i cement, charakteryzuje się czasem początku wiązania większym niż 120 minut. W przypadku pozostałych spoiw drogowych początek wiązania następuje przed upływem 65 minut. W tych spoiwach wynika to z dużych udziałów popiołów wapiennych. W przypadku spoiwa drogowego oznaczonego literą A, zawierającego oprócz popiołów wapiennych również wapno palone w dużym udziale, początek wiązania następuje po zaledwie 11 minutach. Zaobserwowane czasy początku wiązania spoiwa poniżej 120 minut wymagają wyjaśnienia. Oczywiście na początek wiązania spoiwa oznaczonego literą A, który określa się w literaturze jako „błyskawiczny” (ang. *flash setting*), wpływa przede wszystkim zawartość wapna palonego. Jednocześnie – tak jak w przypadku spoiw oznaczonych literami A, B, C i E – przyczyną stosunkowo krótkiego czasu początku wiązania jest znaczna zawartość popiołów wapiennych. Może w związku z tym dochodzić do natychmiastowego tzw. fałszywego wiązania (ang. *false setting*). Brak metody badawczej dotyczącej czasu wiązania nie pozwala na postawienie odpowiednich wymagań odnośnie właściwości użytkowych dla zastosowań w budownictwie drogowym. Liczba publikacji omawiających procesy fizykochemiczne zachodzące podczas wiązania i twardnienia spoiw zawierających popioły oraz mechanizmy procesów wiązania i twardnienia mieszanek o dużej zawartości popiołów lotnych jest niewielka [5]. W związku z tym zasadniczą charakterystykę, jaką jest początek czasu wiązania, dla spoiw drogowych oznaczonych literami A, C i E należy traktować jako właściwość identyfikacyjną spoiwa drogowego. Właściwe rozpoznanie wpływu czasu wiązania czy natychmiastowego utwardzenia na wytrzymałość lub nośność w warunkach drogowych można przeprowadzić na poltku doświadczalnym. Wiedza ta jest niezbędna do odpowiedniego określenia zagęszczenia i grubości warstwy przy ulepszeniu gruntów podłoża i stabilizacji kruszywa.

#### 4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań spoiw drogowych o różnych składach uzyskano następujące wnioski:

1. Zasadniczy wpływ na obniżenie konsystencji normowej zaczynu ma zawartość cementu lub popiołu krzemionkowego, natomiast na wzrost – zawartość popiołów wapiennych. Przybliżoną miarę odniesienia do konsystencji normowej może stanowić miąższość badanych spoiw drogowych określana wg PN-EN 933-1 [16] jako pozostałość na sicie o rozmiarze oczka 45  $\mu\text{m}$ .

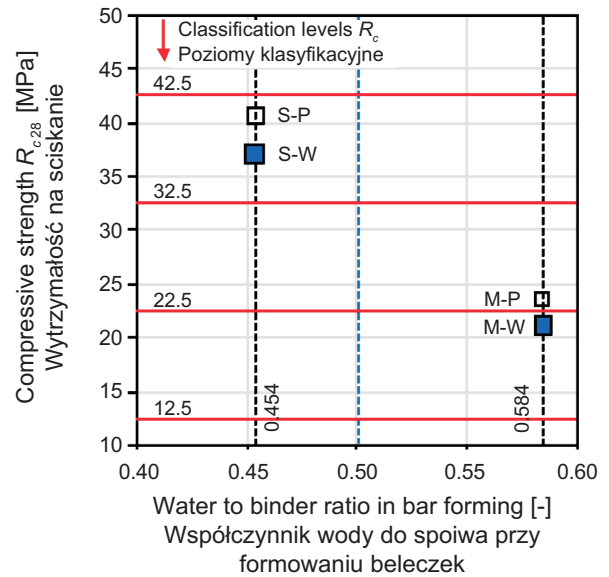


Fig. 5. Compressive strength test results  $R_{c28}$  obtained in specific sample preparation systems depending on the water to binder ratio during bar formation for road binder B  
Rys. 5. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie  $R_{c28}$  otrzymane w określonych systemach przygotowania próbek w zależności od współczynnika wody do spoiwa przy wykonaniu próbek dla spoiwa drogowego oznaczonego B

Essential properties of road binders include setting time, which is closely related to the composition of the binder (Table 3). Road binder D, containing siliceous ash and cement, is characterized by initial setting time greater than 120 minutes. For the remaining road binders the initial setting time was shorter than 65 minutes, which resulted from high proportion of calcareous ashes. In the case of binder A, which also included considerable quantities of quicklime, the initial setting time equaled only 11 minutes. The observed initial setting times greater than 120 minutes require explanation. Obviously, the initial setting time of binder A, which would have been referred to in the literature as “flash setting”, results primarily from the content of quicklime. At the same time – as is the case also with binders B, C and E – the relatively quick initiation of setting is related to considerable content of calcareous ashes. It may also instantly cause the so-called “false setting”. Lack of a defined method for setting time testing prohibits formulation of adequate requirements regarding functional properties of binders in road construction. There is a relatively low number of publications describing the physicochemical processes occurring during setting and hardening of binders with ashes or mechanisms of setting and hardening of mixtures with high fly ash content [5]. Therefore, the basic parameter of initial setting time



2. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania badana w różnych systemach przygotowania próbek największe wartości osiąga w systemie S-P, tj. bez piasku normowego (S) i przy przechowywaniu próbek w wilgotnym powietrzu (P). Wyjątek stanowi spoiwo z dużą zawartością wapna palonego, oznaczone literą A.
3. Przy ustalonym sposobie wykonania próbek określonym przez współczynnik wody do spoiwa sposób dojrzewania próbek ma stosunkowo niewielki wpływ na wytrzymałość na ściskanie  $R_{c28}$ .
4. Wyróżnione systemy przygotowania próbek spoiw drogowych do badania wytrzymałości na ściskanie (M-W, M-P, S-W, S-P) ujmują specyfikę wykonania próbek (w tym skład spoiwa) i dojrzewania beleczek. Przyjęta zasada jednakowego nawilżenia, tzn. lśniącej powierzchni, pozwala na porównanie wytrzymałości na ściskanie przy różnym przygotowaniu próbek. Ze wskazanych w rozdziale 1 warunków budowy i pracy konstrukcji nawierzchni drogowych wynika, że jako miarodajne do oceny spoiw powinno zostać przyjęte dojrzewanie próbek w wilgotnym powietrzu (P). Ponadto w przypadku gruntów pozbawionych frakcji piaszczystych badania spoiw, szczególnie o wytrzymałości na ściskanie poniżej 10 MPa, powinny być prowadzone na zaczynie bez piasku normowego (S). Niejednokrotnie w badaniach wytrzymałości na ściskanie spoiw drogowych wykonanych z zaprawy na piasku normowym stwierdzano bardzo niekorzystne działanie ziaren o wielkości powyżej 0,5 mm. Takich efektów nie stwierdzono w przypadku zaczynu bez piasku normowego.

Przedstawione systemy przygotowania próbek do badania wytrzymałości na ściskanie ułatwiają poszerzenie zakresu charakterystyki spoiw drogowych do zastosowań w budownictwie drogowym. Zasygnalizowane w tym artykule czasy wiązania dla spoiw drogowych z dużą zawartością popiołów wapiennych lub takich składników jak wapno palone należy traktować jako właściwość identyfikacyjną. Wyznaczenie wpływu czasu wiązania czy utwardzenia na wytrzymałość lub nośność stabilizowanej warstwy w warunkach rzeczywistych i przy założonej technologii wbudowania należałoby przeprowadzić na podstawie badań poletku doświadczalnym.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] PN-EN 13282 Hydrauliczne spoiwa drogowe
- [2] *Szczygielski T., Tora B., Kornacki A., Hycnar J.J.*: Popioły fluidalne – właściwości i zastosowanie. *Inżynieria Mineralna*, **18**, 1, 2017, 207-216
- [3] *Hycnar J.J.*: Stan i perspektywy zagospodarowania produktów poreakcyjnych z odsiarczania spalin za pomocą związków wapnia. *Energetyka*, **44**, 6, 1991, 207-215

should be treated as the differentiating characteristic in the case of such road binders as A, C and E. Proper identification of the effect of setting time or rapid hardening of the mixture on the strength and bearing capacity obtained in field should be performed on a test section. Such knowledge is necessary for adequate determination of compaction and thickness of the layer in soil improvement and aggregate stabilization.

## 4. CONCLUSIONS

Based on the tests performed on road binders of various compositions, the following conclusions were formulated:

1. Cement or siliceous ash content has strong impact on decrease in standard consistency, while calcareous ash content – on increase in standard consistency. Binder fineness determined according to PN-EN 933-1 [16] as the proportion of material retained on 45  $\mu\text{m}$  sieve may serve as an approximate reference measure for standard consistency.
2. Compressive strength after 28 days of curing tested in various systems of sample preparation reaches the highest values in the S-P system, i.e. without standard sand (S) and after curing in humid air (P). The one exception is binder A, which contains high quantity of quicklime.
3. For a given water/binder ratio, the method of curing has relatively low effect on the obtained compressive strength  $R_{c28}$ .
4. The distinguished systems of road binder sample preparation for compressive strength testing (M-W, M-P, S-W, S-P) capture the specificity of bar formation (including the composition of binder) and curing. The adopted principle of equal moisture ("glossy surface") enables comparison of compressive strength of samples prepared in different manners. As implied by the conditions of construction and service of road pavement structures listed in section 1, curing in humid air (P) is the method that better reflects real conditions and should be adopted in binder evaluation. Moreover, in the case of soils that do not contain sand fractions, especially with binder compressive strength below 10 MPa, the tests should be performed on samples of paste without standard sand (S). In compressive strength testing of road binders on bars of mortar it was frequently noted that grains over 0.5 mm had very unfavorable effect. Such influence was not observed in the case of paste without standard sand.

The presented systems of specimen preparation for compressive strength testing facilitate broadening of the scope



- [4] Jiang Y., Wu M-Ch.M., Su Q., Liu M., Lin Ch.: Dry CFB-FGD by-product utilization – International Prospectives. World of Coal Ash (WOCA) Conference, 9-12 May 2011, Denver, Colorado, USA, <http://www.flyash.info/2011/189-Wu-2011.pdf> (access 04.12.2021)
- [5] Gawlicki M., Małolepszy J.: Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie – zagrożenia. Nowoczesna Gospodarka Odpadami, **8**, 1-2, 2015, <http://e-gospodarkaodpadami.pl/rynek/wykorzystanie-odpadow-przemyslowych> (dostęp 04.12.2021)
- [6] Baran T., Ostrowski M., Giergiczny Z.: Wykorzystanie mieszanych popiołów lotnych z oddzielnego spalania pyłu węglowego i paliw wtórnych w produkcji spoiw wiążących. Materiały Budowlane, **12**, 2015, 37-40, DOI: 10.15199/33.2015.12.11
- [7] Baran T., Pichniarczyk P., Gawlicki M.: Właściwości popiołów lotnych z równoczesnego spalania węgla kamiennego i paliwa wtórnego. Cement Wapno Beton, **20/82**, 5, 2015, 284-294
- [8] Baran T., Garbacik A., Synowiec K., Żak A.: Zastosowanie popiołu lotnego jako aktywnego składnika spoiw drogowych. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **12**, 1, 2013, 17-30, DOI: 10.7409/rabdim.013.002
- [9] Giergiczny Z.: Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Monografia 325, Seria „Inżynieria Lądowa”, Politechnika Krakowska, Kraków, 2006
- [10] Dziuk D., Giergiczny Z., Garbacik A., Ostrowski M.: Popiół lotny wapienny jako składnik główny cementu powszechnego użytku. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **12**, 1, 2013, 57-70, DOI: 10.7409/rabdim.013.005
- of road binder characterization for road construction applications. In the case of road binders with high content of calcareous ashes or such components as quicklime, their setting times, highlighted in this article, should be treated as a characteristic property for their identification. Determination of the effect of setting and hardening times on strength and bearing capacity of stabilized layers placed in real conditions using specific construction technology should be performed on a field trial section.
- [11] Giergiczny Z., Garbacik A., Ostrowski M.: Aktywność pucolanowa i hydrauliczna wapiennych popiołów lotnych. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **12**, 1, 2013, 71-81, DOI: 10.7409/rabdim.013.006
- [12] Serdar M., Bjegović D., Štirmer N., Pečur I.B.: Research challenges for broader application of alternative binders in concrete. Građevinar, **71**, 10, 2019, 877-888, DOI: 10.14256/JCE.2729.2019
- [13] Owsiak Z., Czapik P., Zapala-Sławeta J.: Badania hydratacji mieszanek na bazie cementu, hydratyzowanego wapna i pyłu z instalacji by-passu. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **19**, 2, 2020, 135-147, DOI: 10.7409/rabdim.020.009
- [14] PN-EN 196-1:2016 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości
- [15] PN-EN 196-3:2016 Metody badania cementu – Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości
- [16] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania