



## Wpływ składu cementu na właściwości reologiczne zapraw z cementów portlandzkich żuźlowych

Małgorzata Gołaszewska<sup>1</sup>, Arkadiusz Janic<sup>2</sup>

### STRESZCZENIE:

Artykuł przedstawia wyniki badań reologicznych, które miały na celu sprawdzenie, jak zawartość mielonego granulowanego żuźla wielkopieczowego wpływa na granicę płynięcia oraz lepkość plastyczną po 5 min od zmieszania zapraw z cementów portlandzkich żuźlowych. Badane cementy portlandzkie żuźlowe otrzymane były przez mieszanie czterech cementów portlandzkich o różnym składzie chemicznym i fazowym z trzema różnymi mielonymi granulowanymi żuźlami wielkopieczowego różnego pochodzenia, w ilości 6, 10, 20 i 30% masy cementu. Granica płynięcia i lepkość plastyczna określone były za pomocą reometru Viskomat NT. Otrzymane wyniki wskazują na znaczący wpływ zawartości  $C_3A$  w cemencie na właściwości reologiczne zapraw oraz że obecność mielonego granulowanego żuźla wielkopieczowego w cemencie generalnie obniża granicę płynięcia, a także nieznacznie podwyższa lepkość plastyczną.

### SŁOWA KLUCZOWE:

właściwości reologiczne zapraw; mielony granulowany żuźel wielkopieczowy; granica płynięcia; lepkość plastyczna

## 1. Wprowadzenie

W Polsce cementy żuźlowe CEM II/A–B S i CEM III są powszechnie stosowane, a granulowany żuźel wielkopieczowy jest najczęściej wykorzystywanym surowcem wtórnym w produkcji cementu [1]. Pomimo szerokiego zastosowania granulowanego żuźla wielkopieczowego w cementach, jego wpływ na właściwości reologiczne zapraw z cementów portlandzkich żuźlowych jest ciągle przedmiotem dociekań badaczy. Dostępna literatura wskazuje, że zmielony granulowany żuźel wielkopieczowy w składzie cementu może powodować polepszenie właściwości reologicznych mieszanek betonowych i zapraw [2–4]. Wyniki badań przedstawione w pracach [5] i [6] pokazują, że wraz ze wzrostem zawartości granulowanego żuźla wielkopieczowego w składzie cementu granica płynięcia i lepkość plastyczna zapraw mogą wzrastać.

Celem przedstawionych w niniejszej pracy wyników badań była ocena, jak skład fazowy cementu portlandzkiego wpływa na właściwości reologiczne, tj. granicę płynięcia i lepkość plastyczną, wykonanych z jego udziałem cementów portlandzkich żuźlowych CEM II/A,B–S. Do badań użyto czterech cementów portlandzkich, zmieszanych z trzema mielonymi granulowanymi żuźlami wielkopieczowymi różnego pochodzenia i uziarnienia w ilości 6, 10, 20 i 30% masy cementu. Zaprawy z tak otrzymanych cementów portlandzkich żuźlowych zostały poddane badaniom w reometrze Viskomat NT po 5 min od zmieszania.

<sup>1</sup> Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: malgorzata.golaszewska@polsl.pl, orcid id: 0000-0002-5249-2639

<sup>2</sup> Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: arkadiusz.janic@polsl.pl, orcid id: 0000-0001-8765-5752

## 2. Cement i żużel użyte w badaniach

W badaniach użyte zostały cztery cementy portlandzkie: CEM I 42,5R NA, CEM I 52,5R, CEM I 42,5R O, CEM I 42,5N SR5/NA. Ich składy chemiczne i fazowe przedstawiono w tabelach 1 i 2, a właściwości fizyczne w tabeli 3.

**Tabela 1**

Składy chemiczne cementów portlandzkich

Zawartość składnika [% wag.]	Rodzaj zastosowanego cementu			
	CEM I 42,5R NA	CEM I 52,5R	CEM I 42,5R „O”	CEM I 42,5N SR5/NA
SiO <sub>2</sub>	20,55	20,65	19,9	21,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,67	5,13	6,2	3,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8	2,61	2,7	3,23
CaO	64,35	64,01	62,6	66,03
MgO	1,18	1,49	1,5	0,74
Na <sub>2</sub> O	0,18	0,16	0,33	0,19
K <sub>2</sub> O	0,43	0,77	0,72	0,34
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	0,46	0,67	0,8	0,41
SO <sub>3</sub>	2,79	2,21	2,6	2,55
Cl	0,015	0,082	0,05	0,063

**Tabela 2**

Składy fazowe cementów użytych w badaniach

Składnik [% wag.]	Rodzaj zastosowanego cementu			
	CEM I 42,5R NA	CEM I 52,5R	CEM I 42,5R „O”	CEM I 42,5N SR5/NA
C <sub>3</sub> S	62,43	64,12	60,65	57,51
C <sub>2</sub> S	12,16	11,18	11,62	17,62
C <sub>3</sub> A	7,64	9,18	11,87	3,98
C <sub>4</sub> AF	8,51	7,93	8,21	9,82
CŜ	4,74	3,76	4,42	4,34

**Tabela 3**

Właściwości fizyczne cementów użytych w badaniach

Właściwość	Rodzaj cementu			
	CEM I 42,5R NA	CEM I 52,5R	CEM I 42,5R „O”	CEM I 42,5N SR5/NA
Gęstość właściwa [g/cm <sup>3</sup> ]	3,09	3,07	3,07	3,11
Początek czasu wiązania [min]	191	167	183	165
Pozostałość nierozpuszczalna [% wag.]	0,56	0,62	0,8	0,46
Straty prażenia [% wag.]	2,93	2,77	3,1	2,24
Powierzchnia Blaine'a [cm <sup>2</sup> /g]	3950	4917	4390	3360

W badaniach użyto trzech zmielonych granulowanych żużli wielkopieczowych (MGZW), oznaczonych jako: H, Z11 i Z9. Składy chemiczne mielonych granulowanych żużli wielkopieczowych przedstawiono w tabeli 4. Powierzchnie właściwe użytych żużli wielkopieczowych: H – 4700 cm<sup>2</sup>/g, Z11 – 4070 cm<sup>2</sup>/g, Z9 – 3400 cm<sup>2</sup>/g.

**Tabela 4**

Skład chemiczny mielonych granulowanych żużli wielkopieczowych

Skład chemiczny [% wag.]	Żużel H	Żużel Z11	Żużel Z9
A <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,8	8,55	7,62
CaO	38,3	44,04	42,13
Cl <sup>-</sup>	0,01	0,06	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55	1,24	1,32
MgO	9,9	5,1	6,18
SiO <sub>2</sub>	34,3	39,38	39,4
SO <sub>3</sub>	-	0,13	1,44
Na <sub>2</sub> O	-	0,51	0,44
K <sub>2</sub> O	-	0,44	0,38
strata prażenia	0,7	0,39	0,30

Cementy portlandzkie żużlowe zostały otrzymane poprzez homogenizację cementu portlandzkiego CEM I z 6, 10, 20 i 30% mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego.

### 3. Metodyka badań

Badania zostały przeprowadzone na zaprawach normowych z cementów portlandzkich żużlowych. Skład zapraw został ustalony na podstawie składu zaprawy normowej zgodnej z PN-EN 196 [7]. Jedynym odstępstwem była zmiana stosunku w/c z 0,5 na 0,55 ze względu na ograniczenia techniczne zastosowanej aparatury.

Tak przygotowane zaprawy były badane w reometrze Viskomat NT po 5 minutach od połączenia składników zaprawy. Dostępne badania, m.in. [8–10], pokazują, że pod obciążeniem zaprawy zachowują się jak lepkoplastyczne ciało Binghama. Do opracowania wyników badań reometrycznych przyjęto więc uproszczony model Binghama opisany równaniem:

$$M = g + hN \quad (1)$$

gdzie:  $M$  – moment oporu ścinania,  $g$  – graniczny opór ścinania,  $h$  – opór płynięcia lepkiego,  $N$  – prędkość obrotowa.

W zastosowanym modelu uproszczonym graniczny opór ścinania  $g$  odpowiada granicy płynięcia  $\tau_0$ , a opór płynięcia lepkiego  $h$  – lepkości plastycznej  $\eta_{pl}$  i w dalszej części artykułu tak będą nazywane.

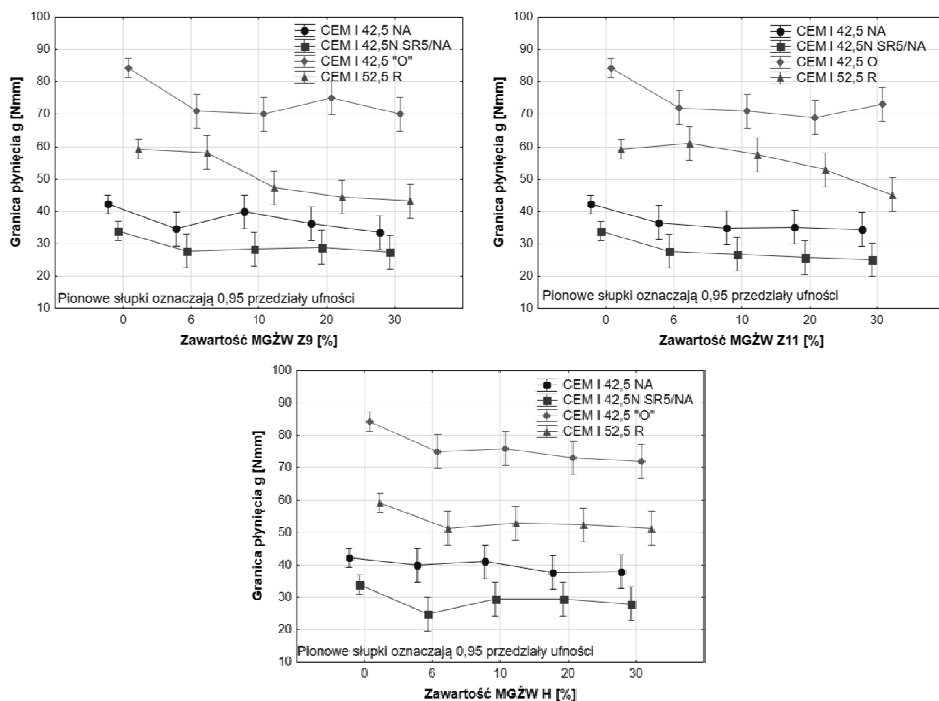
### 4. Wyniki

Wyniki badań granicy płynięcia  $g$  zapraw zostały przedstawione na rysunku 1, natomiast wyniki badań lepkości plastycznej  $h$  zapraw zostały zaprezentowane na rysunku 2.

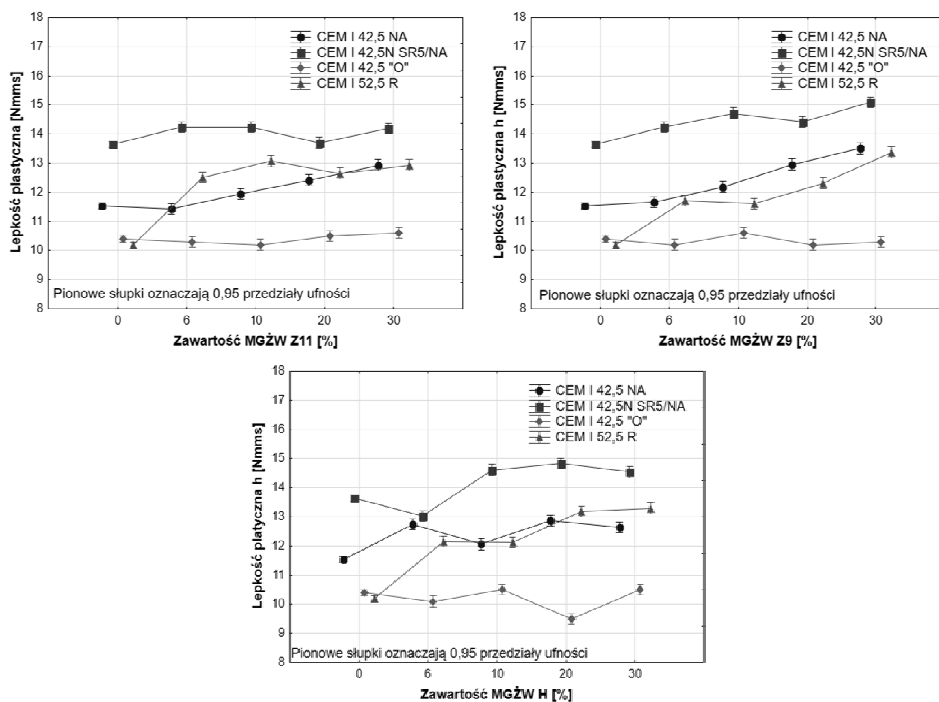
Najwyższą granicą płynięcia charakteryzowały się zaprawy z cementem CEM I 42,5R „O”, których granica płynięcia była tak wysoka, że przeprowadzenie pomiarów dla próbek bez dodatku żużla wielkopieczowego było wyraźnie utrudnione.

Pomimo różnego składu i powierzchni właściwej, trzy przebadane zmielone granulowane żużle wielkopieczowe wykazują podobny wpływ na właściwości reologiczne zapraw. Dodatek żużla wielkopieczowego do cementu w ilości 6% masy nie zmienia granicy płynięcia  $g$  zapraw, jednak częściej powoduje jej obniżenie. Należy przy tym zauważyć, że efekt ten jest związany z samą obecnością żużla wielkopieczowego w cemencie, a granica płynięcia praktycznie nie zmienia się wraz ze wzrostem jego zawartości.

W przypadku lepkości plastycznej wraz ze wzrostem zawartości żużla wielkopieczowego w cemencie nie zmienia się ona lub wzrasta. Zmiany związane są głównie z zawartością glinianu trójwapniowego C<sub>3</sub>A w składzie cementu portlandzkiego CEM I.

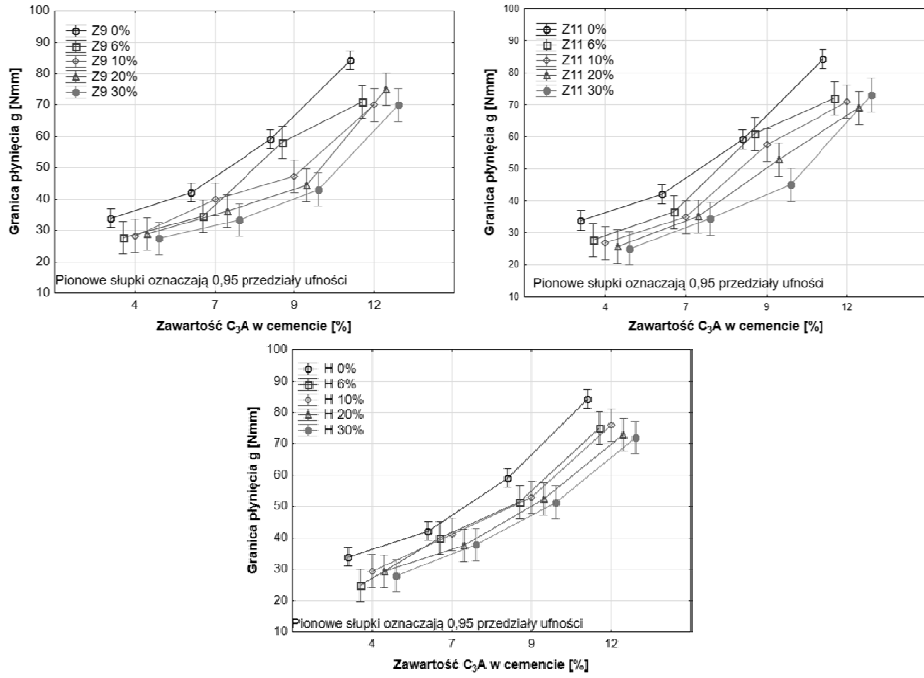


Rys. 1. Granica płynięcia zapraw z cementów z mielonym granulowanym żużlem wielkopieczowym

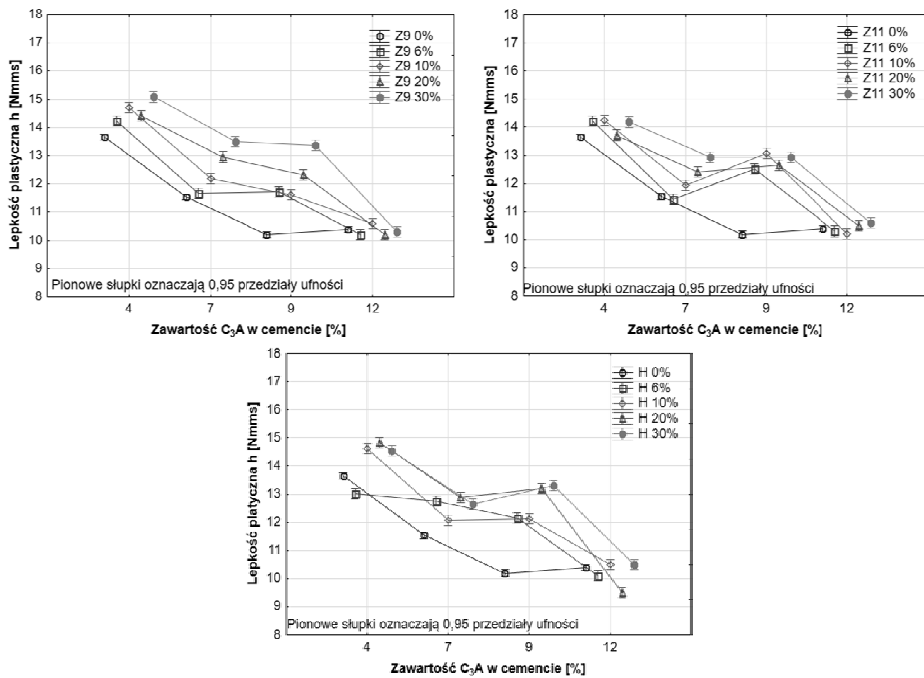


Rys. 2. Lepkość plastyczna zapraw z cementu z mielonym granulowanym żużlem wielkopieczowym

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wpływ zawartości  $C_3A$  w cemencie na granicę płynięcia i lepkość plastyczną zapraw z cementów żużlowch.



Rys. 3. Zależność pomiędzy procentową zawartością fazy  $C_3A$  w cemencie a granicą płynięcia  $g$

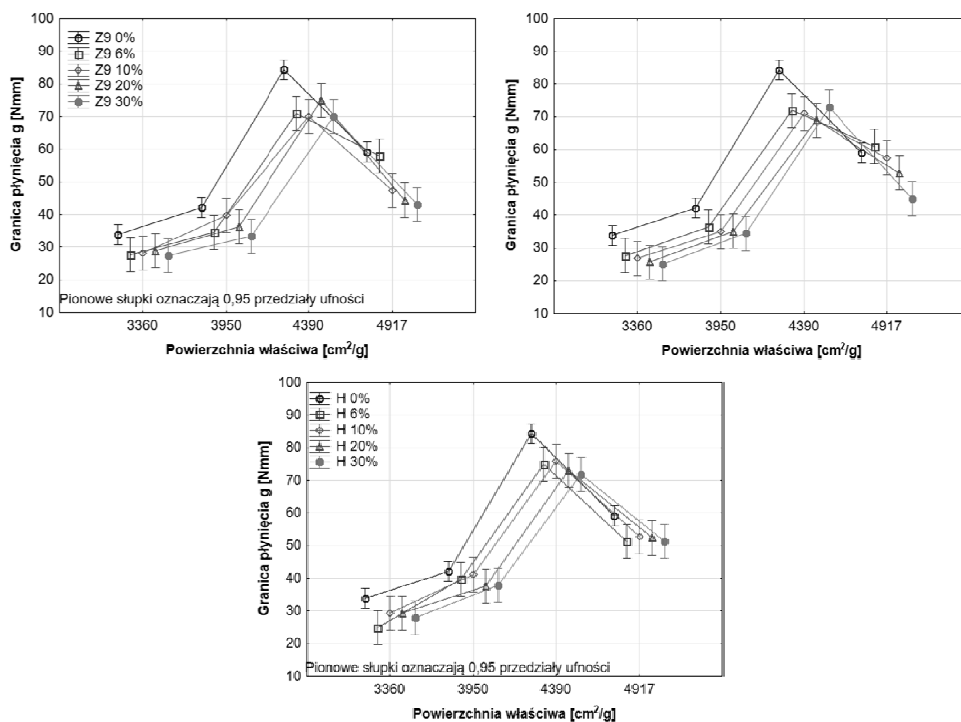


Rys. 4. Zależność pomiędzy procentową zawartością fazy  $C_3A$  w cemencie a lepkością plastyczną  $h$

Wyniki badań wskazują na zauważalną korelację pomiędzy zawartością C<sub>3</sub>A w cemencie a granicą płynięcia. Wniosek ten potwierdza informacje dostępne w literaturze, gdzie wskazywano na związek pomiędzy wysoką zawartością C<sub>3</sub>A w cemencie a wysoką granicą płynięcia zapraw [10, 11]. Należy zauważyć, że zawartość mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego do 30% masy cementu nie zmienia tej zależności, niezależnie od rodzaju użytego żużla wielkopiecowego w składzie cementu.

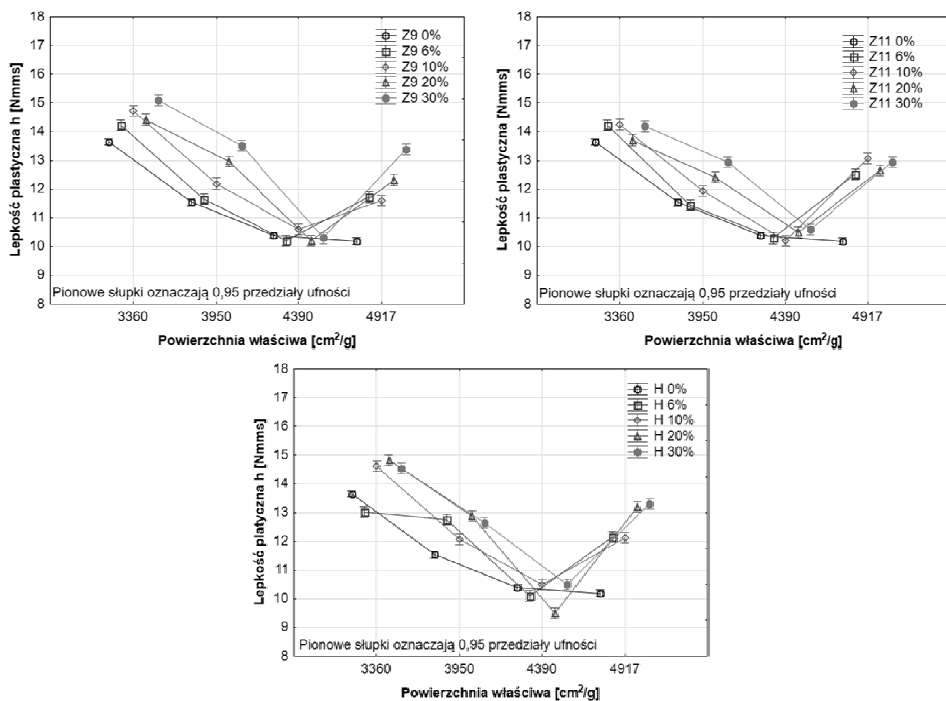
W przypadku lepkości plastycznej badania także wskazują na związek pomiędzy zawartością C<sub>3</sub>A w cemencie a lepkością plastyczną. W przypadku użytych do badań cementów portlandzkich CEM I im większa zawartość C<sub>3</sub>A w cemencie, tym niższa lepkość plastyczna. W przypadku cementów portlandzkich żużlowych użytych w badaniach związek pomiędzy lepkością plastyczną a zawartością C<sub>3</sub>A jest zależny od rodzaju żużla wielkopiecowego. Tylko w przypadku żużla Z9 zależność ta jest podobna jak w przypadku cementów bez dodatku żużla. Dla żużli H i Z11 zależności są niejednoznaczne.

Wyniki badań wskazują, że w przypadku badanych zapraw nie ma jednoznacznej zależności pomiędzy granicą płynięcia zapraw a powierzchnią właściwą cementów (rys. 5). Cementy żużlowe na bazie CEM I 42,5R „0” o powierzchni 4300 cm<sup>2</sup>/g, które nie wpisują się w zależność pomiędzy powierzchnią właściwą a granicą płynięcia, mają najwyższą zawartość C<sub>3</sub>A spośród użytych w badaniach cementów portlandzkich CEM I.



Rys. 5. Zależność pomiędzy powierzchnią właściwą cementu a granicą płynięcia  $g$

Zależności w przypadku lepkości plastycznej są inne. Tylko badane cementy portlandzkie bez dodatku żużla wielkopiecowego wykazują związek pomiędzy lepkością plastyczną a powierzchnią właściwą cementu (rys. 6). Im wyższa powierzchnia właściwa cementu portlandzkiego, tym niższa lepkość, co jest zgodne z informacjami z dostępnej literatury [13, 14]. Badane cementy portlandzkie żużlowe nie spełniają jednak tej zależności ze względu na wysoką lepkość zapraw z cementu CEM I 52,5R (najwyższa powierzchnia właściwa).



Rys. 6. Zależność pomiędzy powierzchnią właściwą cementu a lepkością plastyczną h

Przeprowadzono ponadto próbę porównania wspólnego wpływu  $C_3A$  i powierzchni właściwej, na podstawie iloczynu tych dwóch wartości, na granicę płynięcia i lepkość plastyczną badanych cementów portlandzkich żużlowych. Wyniki nie wykazały interakcji pomiędzy tymi dwoma czynnikami.

## 5. Wnioski

Przeprowadzone badania i analiza ich wyników prowadzą do następujących wniosków:

1. Dodatek mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego do cementu zmniejsza granicę płynięcia zapraw i zwiększa lub nie zmienia lepkości plastycznej.
2. Wpływ rodzaju żużla wielkopieczowego na właściwości reologiczne zapraw z cementów portlandzkich żużlowych był niewielki.
3. Granica płynięcia zapraw cementów portlandzkich żużlowych jest wyraźnie związana z zawartością  $C_3A$  w cemencie portlandzkim CEM I. Im wyższa zawartość  $C_3A$ , tym wyższa granica płynięcia zapraw.
4. Powierzchnia właściwa badanych cementów ma drugorzędny wpływ na granicę płynięcia badanych zapraw.
5. Przeprowadzone badania nie wykazują jednoznacznej zależności pomiędzy powierzchnią właściwą cementu oraz zawartością  $C_3A$  a lepkością plastyczną badanych cementów portlandzkich żużlowych.

## Literatura

- [1] 2017 – INFORMATOR SPC – przemysł cementowy w liczbach, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2017.
- [2] Fulton F.S., The Properties of Portland Cement Containing Milled Granulated Blast-Furnace Slag, Portland Cement Institute, Johannesburg 1974.
- [3] Gołaszewski J., Szwabowski J., Technologia betonu samozagęszczalnego, Polski Cement, Kraków 2010.

- [4] Wood K., *Twenty Years of Experience with Slag Cement*, University of Alabama, Brimingham 1981.
- [5] Gołaszewski J., Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 2006.
- [6] Gołaszewski J., The influence of mineral admixtures on rheology of superplasticized fresh mortars, *Cement and Concrete Research* 2007, 31, 423–440.
- [7] PN-EN 196-1:2016-07 *Metody badania cementu -- Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*,
- [8] Banfill P.F.G., *Rheology of fresh cement and concrete*, *Rheological Review* 2006, 61–130.
- [9] Roussel N., *Understanding the rheology of concrete*, Woodhand Publishing, 2011
- [10] Tattersall G., Banfill P.F.G., *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman Books Limited, Boston 1983.
- [11] Szwabowski J., *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [12] Banfill P.F.G., *The rheology of fresh cement and concrete – a review*, 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, May 2003, South Africa, 2003, 50–63.
- [13] Diamantonis N., Marinos I., Katsiotis M.S., Sakellariou A., Papathanasiou A., Kaloidas V., Katsioti M., *Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete*, *Construction and Building Materials* 2010, 24, 1518–1522.
- [14] Tregger N., Ferrara L., Shah S., *Empirical relationships between viscosity and flowtime measurements from minislump tests for cement pastes formulated from SCC*, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, 2007, 273–278.

## The influence of composition of cement on rheological properties of mortar with portland slag cements

### ABSTRACT:

The paper presents the results of rheological tests conducted to check how the content of ground granulated blast-furnace slag influences the yield stress and plastic viscosity of mortars with portland slag cement after 5 minutes from mixing. Tested Portland slag cements were obtained by mixing four Portland cements of various chemical and phase composition with three different ground granulated blast furnace slags of various origin, in an amount of 6, 10, 20 and 30% of the cement mass. The yield stress and plastic viscosity were determined using the Viskomat NT rheometer. The obtained results indicate a significant effect of the  $C_3A$  content in cement on the rheological properties of mortars, and that the presence of ground granulated blast-furnace slag in cement generally lowers the flow limit, and slightly increases the plastic viscosity.

### KEYWORDS:

rheological properties of mortars; ground granulated blast furnace slag; yield stress; plastic viscosity