



ROHOLLAH ROSTAMI<sup>1)</sup>  
AGNIESZKA J. KLEMM<sup>2)</sup>

## INFLUENCE OF SUPERABSORBENT POLYMERS ON PROPERTIES OF FIBER REINFORCED MORTARS CONTAINING FLY ASHES

## WPŁYW SUPERABSORBENTÓW NA WŁAŚCIWOŚCI ZBROJONYCH WŁÓKNAMI ZAPRAW ZAWIERAJĄCYCH POPIOŁY LOTNE

**STRESZCZENIE.** Wysoka podatność na przedwczesne spękania wywołane samoosuszaniem stanowi istotny problem w przypadku płyt betonowych i betonowych segmentów pomostów, gdzie często zachodzi bardzo szybkie parowanie wody. Wewnątrz pielęgnacja zapewniona przez superabsorbenty (SAP) może rozwiązać ten problem, wspomagając przebieg procesu hydratacji i zapewniając kontrolę nad dostępnością wody, zarówno w mieszance jak i stwardniałym betonie. W artykule omówiono wpływ trzech rodzajów SAP na właściwości mieszanek i stwardniałych zbrojonych włóknami zapraw zawierających popioły lotne (FRM-FA). Analiza potwierdziła, że SAP o mniejszych wymiarach cząstek (< 80 µm) ma dominujący wpływ na złagodzenie skurczu autogenicznego i ułatwia formowanie gęstszej i trwalszej matrycy cementowej. Pomimo początkowego spadku wytrzymałości spowodowanej zapadaniem się SAP, właściwości mechaniczne zapraw ulegają znacznej poprawie dzięki przedłużeniu hydratacji zapewnionemu przez działanie SAP oraz ponowne wypełnienie porów pozostałych po SAP. Wpływ ten jest znacznie wyraźniejszy w przypadku drobniejszych polimerów (< 80 µm).

**SŁOWA KLUCZOWE:** popiół lotny (FA), superchłonne polimery (SAP), włókna polimerowe (PF), zrównoważony rozwój.

**ABSTRACT.** High susceptibility to early cracking induced by self-desiccation processes is a major problem in concrete slabs and bridge decks segments, which are often subjected to a rapid evaporation of water. Internal curing provided by superabsorbent polymers (SAPs) can address the problem by facilitating hydration process and controlling water supply in both fresh and hardened states. The paper discusses the influence of three SAPs on fresh and hardened properties of fibre reinforced mortars containing fly ash (FRM-FA). The analysis confirmed that SAP with smaller particle sizes (< 80 µm) has a dominant influence on mitigation of autogenous shrinkage and facilitates formation of denser and more durable cementitious matrix. Despite initial strength reduction caused by collapsing SAP, mechanical characteristics of mortars are significantly improved by the prolonged hydration, facilitated by SAP and refilling of SAP pores. The effect is much more pronounced for finer polymers (< 80 µm).

**KEYWORDS:** fly ash (FA), polymeric fibres (PF), superabsorbent polymers (SAPs), sustainability.

DOI: 10.7409/rabdim.020.010

<sup>1)</sup> Glasgow Caledonian University, School of Computing, Engineering and Built Environment, 70 Cowcaddens Road, Glasgow G4 0BA, UK; Rohollah.Rostami@gcu.ac.uk (✉)

<sup>2)</sup> Glasgow Caledonian University, School of Computing, Engineering and Built Environment, 70 Cowcaddens Road, Glasgow G4 0BA, UK; A.Klemm@gcu.ac.uk

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich dziesięcioleciach branża budowlana stawia czoła rosnącym wymaganiom w zakresie nowych materiałów i technologii zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju; z jednej strony wykazujących zmniejszone oddziaływanie na środowisko, z drugiej - zwiększoną trwałość i przydatność do zastosowania w inwestycjach infrastrukturalnych. Jednym z kierunków takiego postępowania jest użycie dodatków pucolanowych i hydraulicznych (SCM), do których należą popioły lotne (FA). Częściowe zastąpienie cementu portlandzkiego (PC) pucolanowymi popiołami lotnymi jest powszechnie stosowane w celu zwiększenia ekologiczności spoiw poprzez redukcję zużycia energii oraz emisji dwutlenku węgla pochodzącego z produkcji klinkieru portlandzkiego [1-4]. Poprawne zastosowanie FA przynosi ograniczenie kosztów [3] oraz pewną poprawę właściwości betonu [3-8]. Może również przyczynić się do redukcji ciepła hydratacji [5], lepszą zdolność wiązania jonów chlorkowych [6] oraz większą odporność na oddziaływanie chlorków [7] i siarczanów [8]. Kształt i wielkość ziaren popiołów lotnych również mają istotny wpływ na właściwości mieszanki i stwardniałego betonu [4, 5]. W ogólnym ujęciu zastosowanie popiołów lotnych jako materiału wiążącego w betonie może zwiększyć jego trwałość, a co za tym idzie wydłużyć okres eksploatacji nawierzchni i konstrukcji betonowych.

W Europie dopuszczony do obrotu cement portlandzki popiołowy (CEM II) może zawierać do 35% popiołów lotnych [5]. W cemencie portlandzkim popiołowym zachodzi jednocześnie hydratacja cementu oraz (z pewnym opóźnieniem) reakcja pucolanowa, co prowadzi do powstania złożonego systemu produktów hydratacji odpowiadającego za właściwości inżynieryjne betonu lub zapraw. Reakcja pucolanowa poprzez reakcję między krzemianami (z materiałów pucolanowych) a wodorotlenkiem wapnia (zazwyczaj z hydratacji cementu) prowadzi do powstania fazy C-S-H, co świadczy o aktywności pucolanowej FA [9]. Ponieważ cementy z dodatkami wykazują ogólnie wolniejszą wczesną hydratację niż cement portlandzki, przyrost wytrzymałości jest ograniczony, a prace budowlane na wczesnych etapach dojrzewania są często utrudnione [10]. Ponadto beton zawierający dodatki SCM może być bardziej narażony na przedwczesne spękania wywołane przez procesy samoosuszania i skurczu [11, 12].

Zjawisko to jest bardziej nasilone w płytach betonowych oraz segmentach pomostów betonowych, które narażone są na bardzo szybkie parowanie wody ze względu na znaczną powierzchnię kontaktu z powietrzem oraz niską grubość [13, 14]. Celem zminimalizowania tych negatywnych zjawisk zastosować można włókna polimerowe (PF) oraz superabsorbenty (SAP). Obecność PF w matrycy cementowej

## 1. INTRODUCTION

During the last decades the construction industry has been incessantly challenged by the growing demands for sustainable materials and new technologies, with lower environmental impact and viable and improved durability for infrastructure constructions. One of these approaches is using Supplementary Cementitious Material (SCM) such as Fly ash (FA). Application of pozzolanic FA, as a partial replacement of Portland cement (PC), is commonly used to improve sustainability of binders by reducing energy and carbon dioxide emissions from Portland clinker production [1-4]. The appropriate expend of FA entails costs reduction [3] and some improvement of concrete properties [3-8]. It can also contribute to a decrease of heat of hydration [5], better binding capacity [6] and greater resistance to chloride [7] and sulphate attack [8]. Moreover, shape and particle size distribution of fly ash has significant effect on fresh and hardened properties of concrete [4, 5]. In general, utilisation of FA as a cementitious material in concrete can improve durability and consequently, increase the service life of concrete road and structures.

In Europe, commercial Portland-fly ash cement can contain up to 35% of fly ash (CEM II) [5]. In Portland-fly ash cement, both hydration of cement and pozzolanic reaction of FA (although slightly delayed) occur simultaneously leading to formation of a complex system of hydrated products responsible for engineering properties of concrete or mortars. The pozzolanic reaction of FA produces C-S-H by reaction between silicate (from pozzolanic materials) and calcium hydroxide (usually from cement hydration), which provides an indication of pozzolanic reactivity of FA [9]. Since blended cements have generally slower early hydration reactions than PC strength development is reduced and early construction operations are often impaired [10]. Furthermore, concrete with SCMs can be more prone to early age cracking induced by self-desiccation and shrinkage processes [11, 12].

This phenomenon is more marked in concrete slabs and bridge decks segments, which are subject to rapid evaporation of water due to large surfaces in contact with air and low thickness [13, 14]. Therefore, in order to minimise these negative effects application of polymeric fibres (PF) and Superabsorbent polymers (SAPs) may be employed. The presence of PF in cementitious matrix increases tensile ductility of concrete. PF can also enhance adhesive and frictional bond, improve strength, and toughness [15]. The use of PF can reduce autogenous shrinkage  $\Delta S$  and limit the crack widths [16]. However, these measures may not always be sufficient and some form of internal curing

zwiększa ciągliwość betonu. Włókna polimerowe mogą także poprawić przyczepność betonu związaną z adhezją i tarcieniem, jak również wytrzymałość i odporność na pękanie [15]. Zastosowanie PF może zredukować skurcz autogeniczny *AS* i ograniczyć szerokość spękań [16]. Niemniej jednak, w niektórych przypadkach te środki mogą okazać się niewystarczające, a niezbędne może być zapewnienie pewnej formy pielęgnacji wewnętrznej – na przykład przez wprowadzenie superabsorbentów. Dzięki zdolności do wchłaniania podczas mieszania znacznych ilości wody oraz późniejszego stopniowego jej uwalniania, SAP mogą wspomóc proces hydratacji i zapewnić kontrolę nad dostępnością wody w mieszance i betonie stwardniałym, tym samym przeciwdziałając skurczowi autogenicznemu *AS* [12]. Podczas hydratacji cementu cząstki SAP uwalniają zmagazynowaną wodę (zapadają się), pozostawiając po sobie częściowo opróżnione pory. W nieunikniony sposób wpływają więc na mikrostrukturę betonu, zapewniając więcej przestrzeni na odkładanie się późniejszych produktów hydratacji dodatków SCM [17]. Superchłonne polimery z powodzeniem stosowano w zaprawach i betonach różnych typów do łagodzenia skurczu autogenicznego PC [12, 18-20], skurczu plastycznego [21] oraz skurczu od wysychania [22], jak również do modyfikacji właściwości reologicznych [23] i zwiększenia zdolności do samouszczelniania i samoleczenia [24]. Kolejną korzyścią płynącą z zastosowania SAP jest poprawa mrozoodporności betonu [24]. Wpływ superabsorbentów na matrycę cementową zależy od szeregu parametrów, w tym od ich kształtu, rozmiaru, gęstości usieciowania, struktury chemicznej oraz stężenia jonów w otaczającej je cieczy porowej. Niemniej jednak, większość opublikowanych prac badawczych była poświęcona cementom CEM I. Celem niniejszego artykułu jest ocena wpływu różnych SAP na wybrane właściwości zbrojonych włóknami zapraw zawierających popioły lotne (FRM-FA) - zarówno świeżych i stwardniałych (po 180 dniach). Analizie poddano trzy typy SAP o odmiennych rozmiarach cząstek i różnej zdolności absorpcji wody (WAC). W celu uzyskania pełnego zrozumienia właściwości FRM-FA, dokonano korelacji urabialności, zawartości powietrza, gęstości oraz charakterystyki mikrostruktury (ocenionej za pomocą porozymetrii rtęciowej MIP oraz mikroskopii skaningowej SEM) z odkształceniem autogenicznym i właściwościami mechanicznymi.

## 2. MATERIAŁY, CHARAKTERYSTYKA SUPERABSORBENTÓW I METODY

### 2.1. MATERIAŁY

Zastosowano cementy dwóch typów: cement portlandzki (CEM I 52,5N), oraz cement portlandzki popiołowy (CEM

may be required, for example by the superabsorbent polymers (SAP). Due to its ability to absorb a significant amount of water during mixing of concrete and later gradual release, SAP can facilitate hydration process and control water supply in both fresh and hardened state and subsequently counteract *AS* [12]. During cement hydration, SAP particles release stored water (SAP collapses) and form partially emptied pores. This can inevitably affect microstructure of concrete and potentially provide more space for deposition of later SCMs hydration products [17]. The application of SAPs has been successfully used in mitigation of autogenous shrinkage of PC [12, 18-20], plastic shrinkage [21], drying shrinkage [22], modifying the rheology [23], self-sealing and self-healing [24] in various types of mortar and concrete. Another benefit of SAP is enhancement of freeze-thaw resistance of concrete [24]. The effect of SAPs in cementitious matrices depends on a number of parameters including polymer shape, size, crosslinking density, chemical structure and ionic concentration of the surrounding pore solution. However, majority of the published studies were focused on CEM I cements. The purpose of this paper is to evaluate the effect of different SAPs on the selected properties of fibre reinforced mortars containing fly ash (FRM-FA) in fresh and hardened states during 180 days. Three types of SAPs with different particles sizes and different water absorption capacities (WAC) were analysed. To obtain a comprehensive understanding of FRM-FA properties: workability, air content, density and microstructural features (evaluated by MIP and SEM) were correlated with autogenous deformation and mechanical properties.

## 2. MATERIALS, CHARACTERISTICS OF SAP AND METHODS

### 2.1. MATERIALS

Two types of cement have been used: Portland cement (CEM I, 52.5N), and Portland - Fly ash cement (CEM II/B-V 32.5R). The chemical and physical characteristics of both cements, as provided by the manufacturers are shown in Table 1.

The micro polypropylene fibres used in this study had length of 6-mm, diameter 18  $\mu\text{m}$  and density 0.91  $\text{kg/m}^3$ . Three types of cross-linked SAPs were investigated. SAP A is a copolymer of acrylamide and acrylic acid; SAP C and E are modified polyacrylamide but have different particle grading.

II/B-V 32,5R). Właściwości chemiczne i fizyczne zadeklarowane przez producentów zestawiono w Tabl. 1.

Table 1. Chemical and physical characteristics of CEM I (PC) and CEM II (PC-FA)

Tablica 1. Chemiczne i fizyczne charakterystyki CEM I (PC) i CEM II (PC-FA)

Cement	SiO <sub>2</sub> [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO <sub>3</sub> [%]	K <sub>2</sub> O [%]	TiO <sub>2</sub> [%]	ZnO [%]	LOI [%]
CEM I	20.1	4.9	2.7	62.4	2.2	3.2	0.27	0.0	0.0	2.39
CEM II	32.69	8.99	1.76	43.48	1.33	0.4	1.26	0.58	0.02	0.0

Mikrowłókna propylenowe zastosowane w badaniu miały długość 6 mm, średnicę 18 μm i gęstość 0,91 kg/m<sup>3</sup>. Zbadano trzy rodzaje usieciowanych superchłonnych polimerów. SAP A to kopolimer akrylamidu i kwasu akrylowego; SAP C oraz E to modyfikowane poliakrylamidy, lecz o odmiennym rozkładzie wielkości cząstek.

## 2.2. CHARAKTERYSTYKA SUPERABSORBENTÓW

Rozkład wielkości cząstek SAP określono techniką dyfrakcji laserowej. Rys. 1 przedstawia rozkłady cząstek trzech badanych SAP. Dominujące zakresy wielkości cząstek oparte na wartościach modalnych dla SAP A, SAP C oraz SAP E to odpowiednio: 102,51±0,43 μm, 95,19±0,44 μm oraz 76,74 ± 0,22 μm. SAP E ma wyraźnie drobniejszą cząstkę (między 20 μm a 130 μm).

Szybkość absorpcji i zdolność do absorpcji wody *WAC* polimerów w wodzie dejonizowanej oraz dwóch roztworach z czynników cementowych zostały określone gravimetrycznie metodą „tea-bag” [25-26]. Tabl. 2 przedstawia podsumowanie właściwości SAP, w tym zakresów wielkości cząstek, budowy chemicznej oraz parametrów sorpcji.

Table 2. Characteristics of SAPs  
Tablica 2. Charakterystyka SAP

SAP	Type / Typ	Particles size Wielkość cząstki s [μm]	Deionized water Woda dejonizowana <i>WAC</i> <sup>*)</sup> [g/g]	CEM I Solutions Roztwór CEM I <i>WAC</i> [g/g]	CEM II Solutions Roztwór CEM II <i>WAC</i> [g/g]
SAP A	copolymer of acrylamide and acrylic acid kopolimer akrylamidu i kwasu akrylowego	30-140	340	34	33
SAP C	modified polyacrylamide modyfikowany poliakrylamid	30-140	290	36	37
SAP E	modified polyacrylamide modyfikowany poliakrylamid	20-130	340	40	46

<sup>\*)</sup> water absorption capacity (*WAC*) / pochłanianie wody

Kształty i wielkości cząstek SAP zostały poddane analizie techniką mikroskopii skaningowej (SEM). Obrazy na Rys. 2 przedstawiają cząstki wszystkich SAP w warunkach suchych i wilgotnych.

## 2.2. SAP CHARACTERISTICS

To determine a specific range of particle sizes of SAPs, the Laser diffraction technique was used. Fig. 1 shows the results of particle size distribution tests of SAPs. Predominant particles sizes and modes values for SAP A, SAP C and SAP E are 102.51±0.43 μm, 95.19±0.44 μm and 76.74 ± 0.22 μm respectively. SAP E has notably smaller particle sizes (between 20 μm and 130 μm).

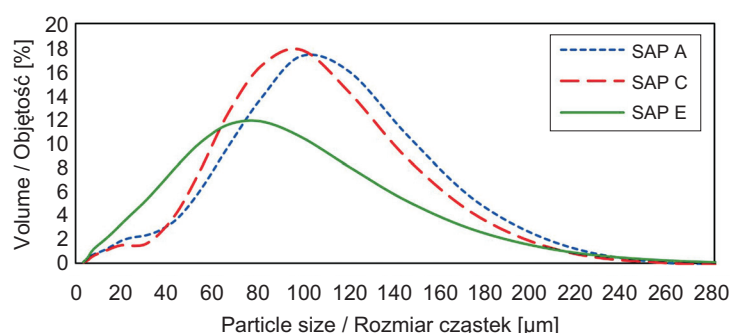


Fig. 1. Particle size distribution of SAP

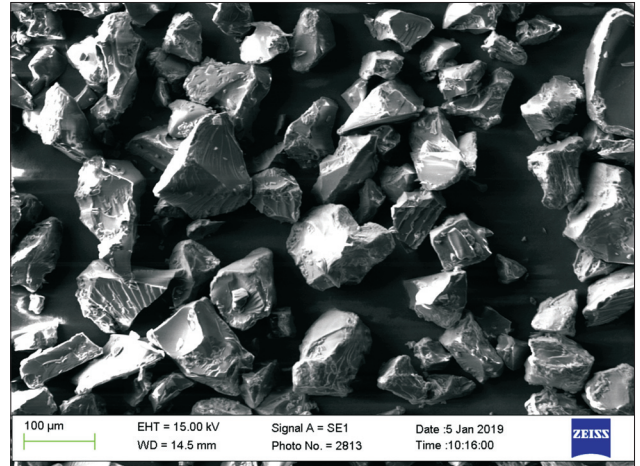
Rys. 1. Rozkład wielkości cząstek superabsorbentów SAP

Kinetics of absorption and water absorption capacities *WAC* of SAPs in DI water and in two cement paste solutions have been determined gravimetrically, by the tea-bag method [25-26]. Table 2 summarises properties of SAPs, including their particle size distributions, chemical, and sorption characteristics.

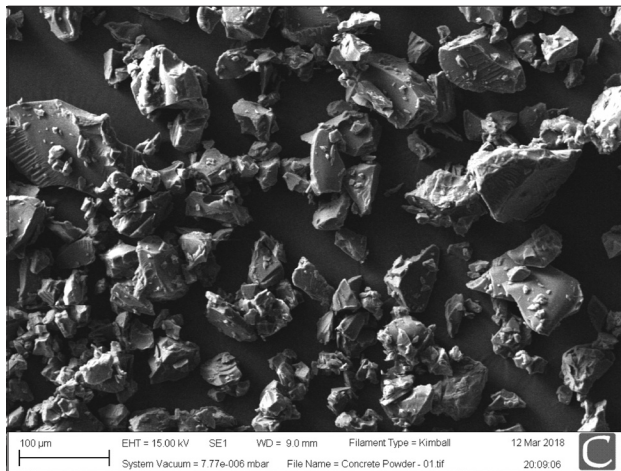
Shapes and sizes of SAPs have been analysed by the Scanning Electron Microscopy (SEM) technique. The images (Fig. 2) show all SAP particles in wet conditions.



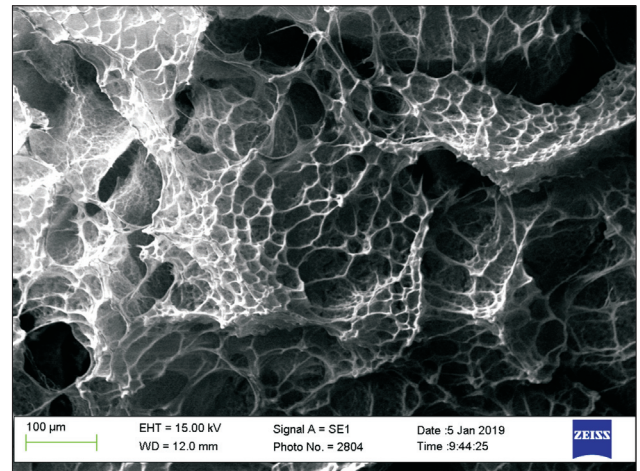
a)



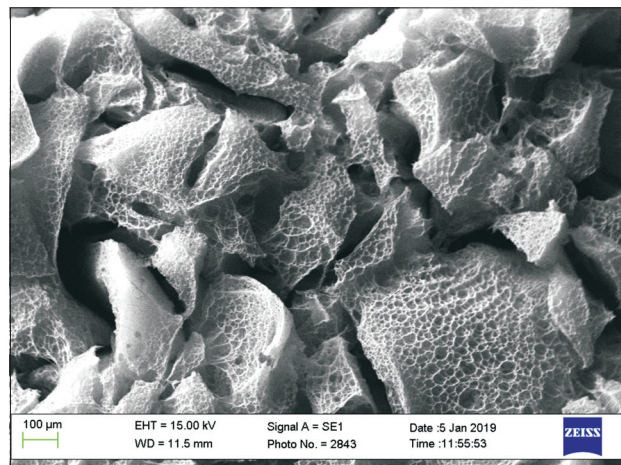
b)



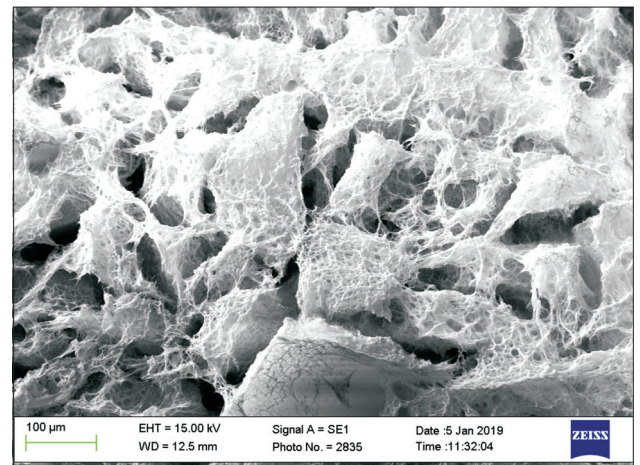
c)



d)



e)



f)

Fig. 2. SEM micrographs of SAPs in dry and wet conditions: a) SAP A dry, b) SAP C dry, c) SAP E dry, d) SAP A wet, e) SAP C wet, f) SAP E wet

Rys. 2. Mikrografy poliakrylamidów SAPs w warunkach suchych i wilgotnych: a) SAP A suchy, b) SAP C suchy, c) SAP E suchy, d) SAP A wilgotny, e) SAP C wilgotny, f) SAP E wilgotny

## 2.3. SKŁAD MIESZANEK

Z myślą o przeprowadzeniu badania zaprojektowano dziesięć różnych mieszanek, których skład przedstawiono w Tabl. 3. Wszystkie FRM-FA były przygotowane z zachowaniem współczynnika spoiwa do piasku drobnego 1:2 (wagowo) [27]. 90% ziaren piasku było mniejszych niż 0,425 mm. Stosowano różne wartości całkowitego stosunku woda/spoiwo (dodawano wody) celem zrekomensowania ubytku wody wchłoniętej przez polimer [28]. Efektywne wartości współczynnika woda/spoiwo ( $w/b$ , ang. *water/binder*) były identyczne i wyniosły  $w/b = 0,47$ . SAP oraz PF dodawano do mieszanek w stałych ilościach, odpowiednio 0,25% oraz 0,50% względem masy cementu.

## 2.3. MIX COMPOSITIONS

Ten different compositions were designed to carry out this study as shown in Table 3. All FRM-FA were prepared with a binder to fine sand ratio of 1:2 (by weight) [27]. 90% of sand particles were smaller than 0.425 mm. Different water/binder ratios (additional water) were used to compensate for water absorbed by the polymer [28]. Effective  $w/b$  ratios were the same ( $w/b = 0.47$ ). Both SAPs and PF were added to mixtures in equal amounts of 0.25% and 0.50% by mass of cement.

Table 3. Mix proportions of materials  
Tablica 3. Proporcje składników w mieszankach

Cement	Sample name Nazwa próbki	SAP type Rodzaj SAP	SAP content Zawartość SAP [%]	Fibre content Zawartość włókien [%]	$w/b$ effective ratio Współczynnik $w/b$ efektywny	$w/b$ total ratio Współczynnik $w/b$ całkowity
CEM I	I	–	–	–	0.47	0.48
	IF	–	–	0.50	0.47	0.52
	IF-A	A	0.25	0.50	0.47	0.58
	IF-C	C	0.25	0.50	0.47	0.58
	IF-E	E	0.25	0.50	0.47	0.58
CEM II	II	–	–	–	0.47	0.45
	IIF	–	–	0.50	0.47	0.50
	IIF-A	A	0.25	0.50	0.47	0.56
	IIF-C	C	0.25	0.50	0.47	0.56
	IIF-E	E	0.25	0.50	0.47	0.57

## 2.4. METODY

Właściwości mieszanek zapraw zostały określone w zakresie ich konsystencji (EN 1015-3:1999 [29]), gęstości (BS EN 1015-6:2006 [30]), zawartości powietrza (EN 1015-7:1999 [31]) i czasu wiązania (BS EN 480-2:2006 [32]). Badania skurczu autogenicznego przeprowadzono metodą ASTM C1698 [33] z zastosowaniem rur karbowanych. Zmiany długości rejestrowano cyfrowym dylatometrem horyzontalnym od zakończenia wiązania próbki do osiągnięcia przez nią wieku 180 dni. Charakterystykę mikrostruktury FRM-FA oceniono technikami porozymetrii rtęciowej (MIP) oraz mikroskopii skaningowej (SEM). Właściwości mechaniczne mierzono na próbkach po 7, 14, 28, 90 i 180 dniach od zarobienia wg BS EN1015-11 [34]. Wszystkie badane próbki (pryzmatyczne, o wymiarach 40 mm × 40 mm × 160 mm) dojrzewały bez zabezpieczenia przed parowaniem w warunkach laboratoryjnych: temperaturze  $21 \pm 2\%^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej  $R_H = 40 \pm 5\%$ .

## 2.4. METHODS

The properties of fresh samples were measured with respect to their consistency (EN 1015- 3:1999 [29]), density (BS EN 1015-6:2006 [30]), air content (EN 1015-7:1999 [31]) and setting times (BS EN 480-2:2006 [32]). Autogenous shrinkage tests were conducted using the corrugated tubes method ASTM C1698 [33]. The linear changes were recorded by a digital bench dilatometer from the time of final setting until the age of 180 days. Microstructural characteristics of FRM-FA were assessed by the Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) and the Scanning Electron Microscopy (SEM) techniques. The mechanical properties were measured on samples after 7, 14, 28, 90 and 180 days acc. to BS EN1015-11 [34]. All specimens (40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup> prisms) were evaluated after unsealed curing in laboratory environment: at temperature  $21 \pm 2\%^\circ\text{C}$  and relative humidity  $R_H = 40 \pm 5\%$ .

### 3. WYNIKI I Dyskusja

#### 3.1. WPŁYW SAP NA WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK

Wyniki badania wszystkich mieszanek metodą stolika rozplwowego zostały pokazane na Rys. 3. Jak widać, zarówno SAP jak i PF obniżają urabialność, natomiast wpływ SAP jest bardziej wyraźny (poziom odniesienia zaznaczono czerwoną przerywaną linią).

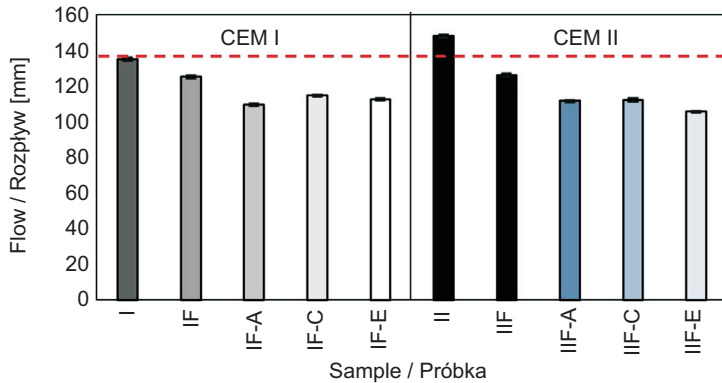


Fig. 3. Consistency results by flow table tests

Rys. 3. Wyniki konsystencji mieszanek podczas badań metodą stolika rozplwowego

Zgodnie z przewidywaniami, lepszą urabialność stwierdzono w przypadku mieszanek zawierających CEM II. Właściwości fizyczne cząstek popiołów lotnych, ich kulisty kształt i zeszkliwiona powierzchnia przy zazwyczaj mniejszych rozmiarach niż w przypadku PC skutkują obniżeniem wodożądności [5]. Jak widać, dodatek włókien PF z kolei sprawił, że niezbędne było dodanie większej ilości wody w celu osiągnięcia tej samej konsystencji. Efekt ten jest bezpośrednio związany z charakterystyką włókien, m.in. z typem włókna, geometrią, i ich zawartością, jak również z właściwościami matrycy [15]. Dodatek SAP prowadzi do dalszego obniżenia urabialności.

Wyniki badań zawartości powietrza, gęstości i czasu wiązania mieszanek zostały zestawione w Tabl. 4. Najniższe zawartości powietrza odnotowano dla mieszanek wykonanych z cementem CEM II. Zarówno obecność PF jak i SAP w przypadku obu cementów prowadzi do wzrostu zawartości powietrza. Niemniej jednak, szczególnie wyraźny wpływ SAP uwidacznia się w przypadku jednoczesnego zbrojenia włóknami PF. Bez względu na rodzaj cementu, najwyższe zawartości powietrza odnotowano dla SAP A, a w dalszej kolejności – SAP C oraz E. Choć dla różnych cementów zaobserwowano podobne wzorce zmian, efekt był najbardziej widoczny dla CEM I, jako że w przypadku CEM II uzyskano niższy całkowity stosunek woda/spoiwo oraz niższy dodatek wody ze

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. EFFECTS OF SAP ON FRESH STATE PROPERTIES

The results of flow table test for all samples are shown in Fig. 3. It is clear that both SAPs and PF decrease workability, however, the effect of SAPs is more pronounced (red dash line).

As anticipated, the better workability was recorded for samples containing CEM II. Physical properties of FA particles, their spherical shape, glassy surfaces and usually finer particles than PC, result in lower water demand [5]. As it can be seen, the addition of PF required additional water to keep the same consistency. This effect is directly linked to the characteristics of fibre, including fibre type, geometry, content, as well as matrix properties [15]. The addition of SAPs leads to further decrease in workability.

The test results of air content, density and setting times are summarised in Table 4. The lowest values of air content were recorded for samples made with CEM II cement. The presence of both PF and SAPs in both cements leads to increase of air content. However, the effect of SAPs in FRM is quite distinct. Regardless the type of cement the greatest values of air content were recorded for SAP A, followed by SAP C and E. The similar patterns were observed for different cements, although the effect was more pronounced in CEM I due to reduced total water/binder ratios and lower additional water for SAPs in CEM II. As previously reported [35] the addition of SAP leads to increase of air content in all FRC.

Table 4. Properties of mortars in fresh state

Tablica 4. Właściwości mieszanek zapraw

Cement	Sample name Nazwa próbki	Air content [%] Zawartość powietrza [%]	Density Gęstość [g/dm <sup>3</sup> ]	Initial setting Początek wiązania [min]	Final setting Koniec wiązania [min]
CEM I	I	7.2	2132.2	128	173
	IF	7.5	2078.3	114	202
	IF-A	8.0	2060.7	118	224
	IF-C	7.8	2034.3	126	262
	IF-E	7.6	2063.5	120	245
CEM II	II	6.3	2147.3	180	230
	IIF	6.5	2098.1	148	290
	IIF-A	7.0	2091.8	160	305
	IIF-C	6.8	2061.4	175	320
	IIF-E	6.6	2093.2	155	310

względu na użycie SAP. Zgodnie z wcześniejszymi doniesieniami [35], dodatek SAP prowadził do zwiększenia zawartości powietrza we wszystkich przypadkach, gdy zastosowane było również zbrojenie włóknami.

Czwarta kolumna Tabl. 4 przedstawia wyniki pomiarów gęstości. Zarówno dodatek PF jak i SAP wyraźnie obniżył wartości gęstości. Różne gęstości świeżych próbek modyfikowanych dodatkiem SAP można przypisać ich różnym rozkładom wielkości cząstek oraz odmiennym zdolnościom absorpcji wody. Najwyższe gęstości odnotowano w zaprawach z CEM II, głównie ze względu na drobne cząstki oraz aktywność pucolanową popiołów lotnych [1, 5]. Dodatek SAP skutkuje obniżeniem gęstości ze względu na pęcznienie SAP w mieszance. Najsilniejszy efekt odnotowano dla zapraw zawierających bardzo drobne SAP E ( $76.74 \pm 0.22 \mu\text{m}$ ).

Tabl. 4 przedstawia również czas początku i końca wiązania zapraw. Początek wiązania w przypadku zbrojenia włóknami następuje wcześniej niż dla próbek referencyjnych. Czas początku wiązania odsuwa się jednak lekko dla wszystkich próbek z SAP, bez względu na zastosowany cement. Podobne wyniki zaobserwowano dla czasu końca wiązania, a najwyraźniejsza zmiana nastąpiła dla cementu portlandzkiego popiołowego. Próbki z CEM II miały dłuższe okresy wiązania niż próbki z CEM I. Okresy te uległy dalszemu wydłużeniu przez dodatek włókien i SAP. Po porównaniu wyników próbek w obrębie każdego z dwóch różnych zestawów (podział ze względu na typ cementu), zidentyfikowano wspólną prawidłowość: najpóźniejszy koniec wiązania wykazywały zaprawy zawierające SAP C, po nich zaś - zaprawy z SAP A oraz E. Największe różnice zaobserwowano między zaprawami z SAP C i E (ten sam skład chemiczny), co pozwala wnioskować, że rozmiar cząstek ma większe znaczenie niż całkowita zdolność do absorpcji wody. Wykazano, że zaprawy zawierające CEM II miały dłuższe okresy wiązania niż te przygotowane z CEM I. Okresy te uległy dalszemu wydłużeniu przez dodatek włókien i SAP.

### 3.2. SKURCZ AUTOGENICZNY

Wyniki obrazujące rozwój skurczu autogenicznego  $AS$  na przestrzeni 180 dni dla próbek z SAP oraz bez nich przedstawione zostały na Rys. 4. Potwierdzają one wyraźnie efektywność SAP w redukcji skurczu autogenicznego.

Najwyższe wartości skurczu wykazały próbki referencyjne niezawierające SAP ani PF. Po początkowym znacznym przyroście skurczu autogenicznego w obu próbkach referencyjnych zachodzą dalsze jego zmiany, lecz z malejącą stopniowo prędkością. Próbki referencyjne z CEM II wykazały niższe wartości skurczu. Po 180 dniach skurcz autogeniczny próbek referencyjnych osiągnął około  $-450 \mu\text{m/m}$  i  $-300 \mu\text{m/m}$ ,

The fourth column of Table 4 shows the results of density measurements. Addition of both PF and SAPs notably reduced density values. Different densities of fresh samples modified by SAPs can be attributed to their WAC and particle size distributions. The highest densities were found in mortars with CEM II, mainly due to the particle fineness and pozzolanic reactivity of fly ash [1, 5]. The addition of SAP results in a decrease of density due to the swelling of SAPs in mixtures. The strongest effect was recorded for mortars containing very fine SAP E ( $76.74 \pm 0.22 \mu\text{m}$ ).

Table 4 also shows the results of initial and final setting times of mortars. Initial setting time of FRC occur earlier than for the reference samples. However, the time of initial setting is slightly decreased for all SAP samples regardless type of cement used. The similar records were also observed for the final setting times, although it was more pronounced in Portland-fly ash cement. Samples with CEM II had longer setting times than with CEM I. These times were further prolonged by addition of fibres and SAPs. When analysing samples within two different sets (cement types) the common feature was identified: all SAP C mortars had the longest final setting times, followed by SAP A and E. The biggest differences were observed between mortars with SAP C and E (same chemistry) leading to the conclusion that the particle sizes are more important than the total WAC. It was evidenced that mortars based on CEM II had longer setting time than that made with CEM I. These times were further prolonged by addition of fibres and SAPs.

### 3.2. AUTOGENOUS SHRINKAGE

The results of autogenous shrinkage  $AS$  development up to 180 days, for samples with and without SAP addition are presented in Fig. 4. Effectiveness of SAP in  $AS$  reduction is well evidenced.

Reference samples without SAP and PF exhibited the greatest values of shrinkage. After the initial sharp increase in  $AS$  in both reference samples, further linear changes are taking place but with the diminishing rate. The reference samples with CEM II exhibited the lowest values of shrinkage. At 180 days,  $AS$  of the references reached approximately  $-450 \mu\text{m/m}$  and  $-300 \mu\text{m/m}$  respectively for mortars with CEM I and CEM II. Such behaviour was also reported by [12, 20]. Authors attributed these results to the chemical shrinkage caused mainly by the intense hydration reactions of alite to form C-S-H phases. On the other hand, the lower values of shrinkage in CEM II samples can be related to the lowest  $w/b$  ratio, fineness of FA particles and the physical presence of FA, "filler effect" [2, 10]. Fibre reinforcement significantly



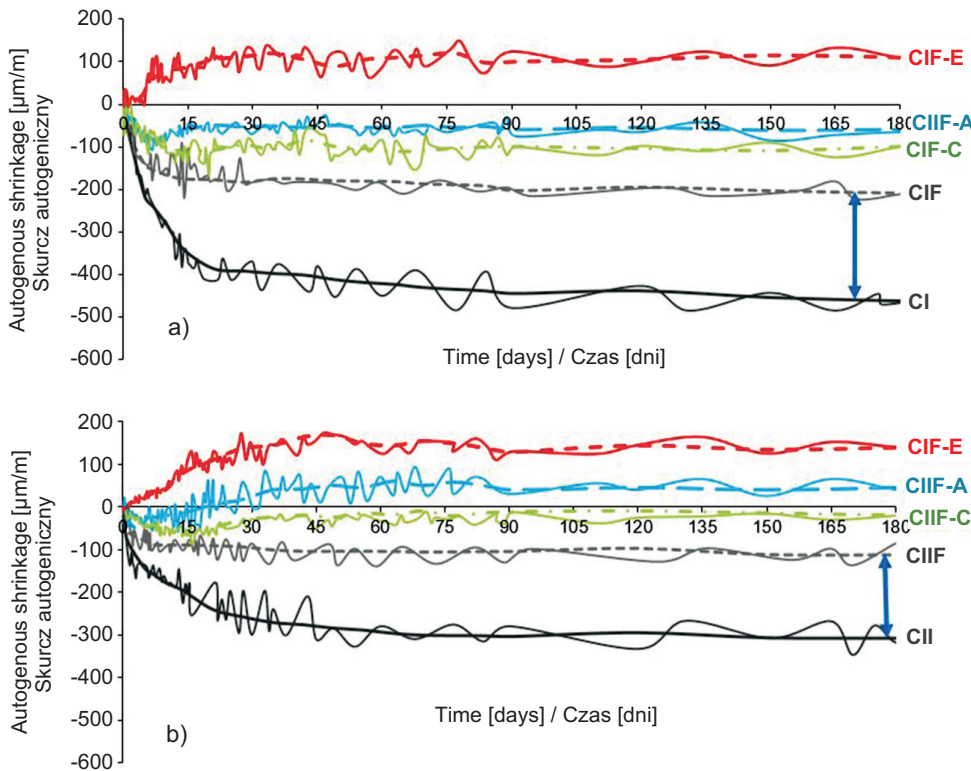


Fig. 4. Autogenous shrinkage development of: a) CEM I, b) CEM II  
Rys. 4. Rozwój skurczu autogenicznego: a) CEM I, b) CEM II

odpowiednio dla zapraw z CEM I i CEM II. Podobne zachowanie odnotowano również w [12, 20]. Autorzy przypisali te wyniki skurczowi chemicznemu, spowodowanemu głównie przez intensywne reakcje hydratacji alitu prowadzące do tworzenia fazy C-S-H. Z drugiej strony, niższe wartości skurczu w próbkach z CEM II można powiązać z niższym współczynnikiem woda/spoiwo, małymi rozmiarami cząstek popiołu lotnego oraz fizyczną obecnością popiołu lotnego, poprawiającą „efekt wypełnienia” [2, 10]. Zbrojenie włóknami znacznie obniża skurcz autogeniczny, a zjawisko to jest szczególnie wyraźne w matrycach z CEM II.

Jak widać na Rys. 4, SAP E całkowicie skompensował skurcz w zaprawie poprzez postępujące pęcznienie. Jest ono wywołane ponowną absorpcją wody odsączającej się z mieszanki (*bleeding*) krótko po wiązaniu albo wzrostem ciśnienia spowodowanym krystalizacją  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [19]. Podobne zjawisko zaobserwowano także w przypadku SAP A, było ono jednak wyraźniejsze dla SAP E ze względu na drobniejsze cząstki i szybszą absorpcję. Pielęgnacja wewnętrzna oraz ilość wody wolnej w mieszance również mają wpływ na pęcznienie. SAP C zredukował skurcz autogeniczny, a zarazem jego wyższa zdolność absorpcji wody (Tabl. 2) zapobiegła pęcznieniu. SAP E, charakteryzujący się drobnymi rozmiarami cząstek, oddał zmagazynowaną wodę nazbyt

reduces AS and this reduction is more pronounced in matrices with CEM II cement.

As shown on Fig. 4, SAP E completely compensated shrinkage in mortars due to its progressive initial swelling. This is caused by re-absorption of bleeding water from the mix just after setting time or crystallisation pressure of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [19]. This phenomenon was also observed for SAP A, but it was higher for SAP E due to its smaller particle sizes and faster absorption. Internal water curing and the amount of free-water in the mix also contribute to this expansion. Although SAP C reduced AS its higher absorption capacity prevented swelling (Table 2). SAP E, with smaller particle size released water too fast and extra water was available for this prolonged expansion even after setting. Hence, the overall AS performance of SAP A was similar to SAP C.

### 3.3. MICROSTRUCTURAL FEATURES

Fig. 5 shows pore size distributions (PDS) in FRM. It is evident that CEM I reference sample had a unimodal pore size distribution (PSD) curve and CEM II samples had bimodal PSD pattern.

In all FRM-FA samples, two predominant sizes ranges can be identified: 10-100 nm and 200-800 nm. SAP-free

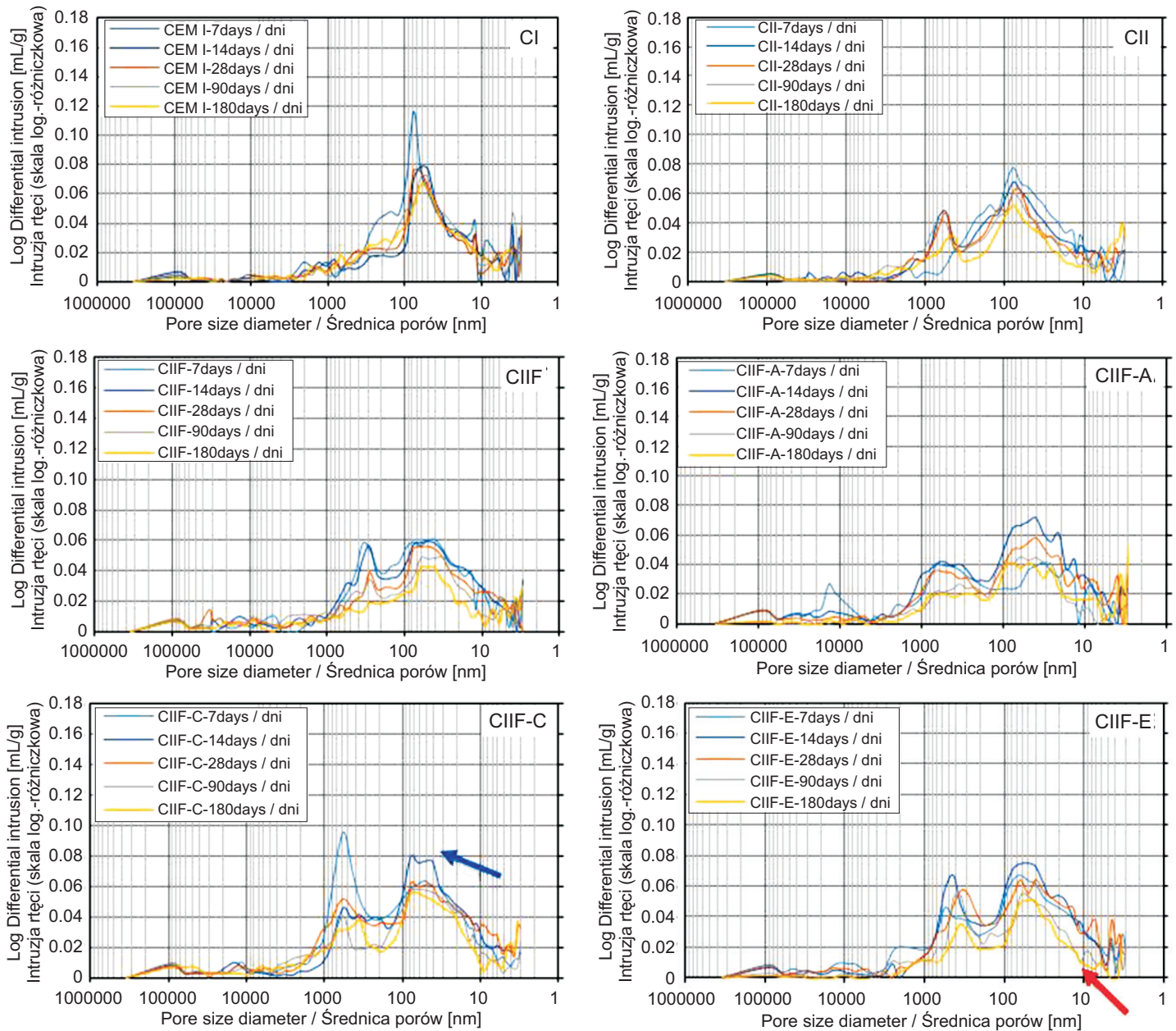


Fig. 5. Pore size distributions (by MIP) of CEM I and all samples of CEM II

Rys. 5. Rozkład wielkości porów (na podstawie MIP) próbki referencyjnej z CEM I i wszystkich próbek z CEM II

szybko, a dostępny nadmiar wody przyczynił się do przedłużającego się pęcznienia również po zakończeniu wiązania. Ogólny wpływ SAP A oraz SAP C był zatem zbliżony.

### 3.3. CECHY MIKROSTRUKURALNE

Rys. 5 pokazuje rozkład wielkości porów w zaprawie. Jak widać, próbka referencyjna z CEM I wykazuje unimodalny rozkład wielkości porów, zaś próbki z CEM II – rozkład bimodalny.

reference samples had a peak around 80 nm for CEM I and 90 nm CEM II. SAP lead to increase of total porosities with pores greater than 500 nm, which were formed by collapsing SAPs. The largest pores were recorded for the polymer with higher WAC (blue arrow).

In early hydration stage (14 days), a similar tendency of increased total porosities by SAPs was observed and a peak of total porosity is closely linked to the presence of

We wszystkich próbkach z FRM-FA zidentyfikować można dwa dominujące przedziały wielkości porów: 10-100 nm oraz 200-800 nm. Referencyjne próbki niezawierające SAP wykazują szczytową wartość około 80 nm dla CEM I oraz 90 nm dla CEM II. Zastosowanie SAP prowadziło do wzrostu porowatości całkowitej poprzez uformowanie się porów większych niż 500 nm, pozostałych po zapadnięciu się cząstek SAP. Największe pory zarejestrowano dla polimeru o wyższej zdolności absorpcji wody (niebieska strzałka).

Na etapie wczesnej hydratacji (14 dni) zaobserwowano podobną tendencję do zwiększenia porowatości całkowitej przez SAP, zaś szczyt porowatości całkowitej był ściśle związany z obecnością porów o większych średnicach. Wraz z postępowaniem procesu hydratacji (po drugim tygodniu), zarówno porowatość całkowita i wielkości porów znacząco wzrosły. Około 28 dni po zarobieniu zaobserwowano jednak zauważalne różnice w wysokościach wartości szczytowych, szczególnie w przypadku małych porów (poniżej 20 nm). Jest to przypisywane zapadaniu się sieci polimerów, które prowadzi do nasilenia wpływu zastosowanych popiołów lotnych. Po 90 dniach porowatość całkowita spadła, a rozmiary porów uległy lekkiemu zmniejszeniu. Ponadto po 180 dniach od zarobienia odnotowano minimalną wartość szczytu odpowiadającego mniejszym porom. Najbardziej zauważalne zmiany w rozkładzie wielkości porów zarejestrowano dla próbek z SAP E (czerwona strzałka); wyraźnie widoczne minimalne wartości szczytów odzwierciedlają spadek objętości porów o rozmiarach 10-80 nm oraz 200-400 nm.

A zatem, po uwolnieniu zmagazynowanej wody i zapadnięciu się cząstek, SAP pozostawiają pory o wielkości zależnej od zdolności absorpcji wody oraz rozkładu wielkości cząstek SAP (Rys. 6). SAP o większej zdolności absorpcji wody (SAP C) formują większe pory. W ich przypadku do zapadnięcia się cząstek SAP doszło w pierwszych dwóch tygodniach hydratacji, a więc duże pory nie mogły być później wypełnione produktami hydratacji w związku z brakiem wody, co z kolei negatywnie wpłynęło na właściwości mechaniczne. Zaprawy z CEM II z SAP uzyskały natomiast wyniki porównywalne do CEM I w zakresie spadku objętości mniejszych porów w zaprawie. Co więcej, próbki FRM-FA modyfikowane SAP E ( $76.74 \pm 0.22 \mu\text{m}$ ) wykazały w tym względzie znaczne zmiany, zwłaszcza w przypadku małych porów (poniżej 20 nm) po 90 dniach.

### 3.4. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

Dodatek włókien i superabsorbentów, typ cementu czy dodatkowa zawartość wody mają znaczący wpływ na właściwości mechaniczne. Rys. 7 i 8 przedstawiają ogólny trend rozwoju wytrzymałości na zginanie i ściskanie w zależności od wieku próbek (do 180 dni).

bigger pores. With the progress of hydration (after the 2<sup>nd</sup> week), both total porosities and sizes of pores significantly increased. However, at about 28 days, noticeable differences in the height of peaks were observed, especially for small pores (under 20 nm). This is attributed to the collapse of polymer's networks, which lead to enhancement of degree of reaction of FA. At 90 days, the total porosity decreased and pores slightly reduced their sizes. Additionally, the minimum peak representing smaller pores has been recorded at 180 days. The most noticeable change of pore size distribution was recorded for samples with SAP E (red arrow); clearly defined minimum peaks correspond to decreased volume of pores with sizes 10-80 nm and 200-400 nm.

Thus, after water is released and polymer collapses, SAPs leave behind pores with sizes depending on WAC and PSD of SAP (Fig. 6). SAPs with higher WAC (SAP C) produce larger pores. The collapse of SAP, in this case, took place during the first two week of hydration. Therefore, large pores could not be later refilled with hydration products due to the lack of water, which in turn negatively affected mechanical properties. However, CEM II mortars with SAPs presented comparable results to the CEM I in reduction of smaller pores in mortars. Further, FRM-FA samples modified by SAP E ( $76.74 \pm 0.22 \mu\text{m}$ ) show a significant difference especially for small pores under 20 nm after 90 days.

### 3.4. MECHANICAL PROPERTIES

The addition of PF and SAPs, type of cement, and additional water has a significant effect on mechanical properties. Figs 7 and 8 show the overall reduction trend of flexural and compressive strength as a function of their maturity up to 180 days.

The flexural strength of CEM I steadily increased during 180 days. However, the flexural strength of CEM II mortars initially increased and after 28 days remained almost unchanged. The effect of PF on immature samples (below 7 days) is negative, regardless the type of binder. The difference between binders is more noticeable with time; PF improve strength in CEM I mortars but decrease in CEM II mortars. This reduction is due to a class of FA (replacement level of FA), length and dosage of PF and age of samples. All these parameters may affect microstructural properties in the transition zone between the matrix and fibres.

As can be seen in Fig. 7, the flexural strength decreased when SAP was added to FRC. This effect is more pronounced at early ages. It is evident that WAC of SAPs

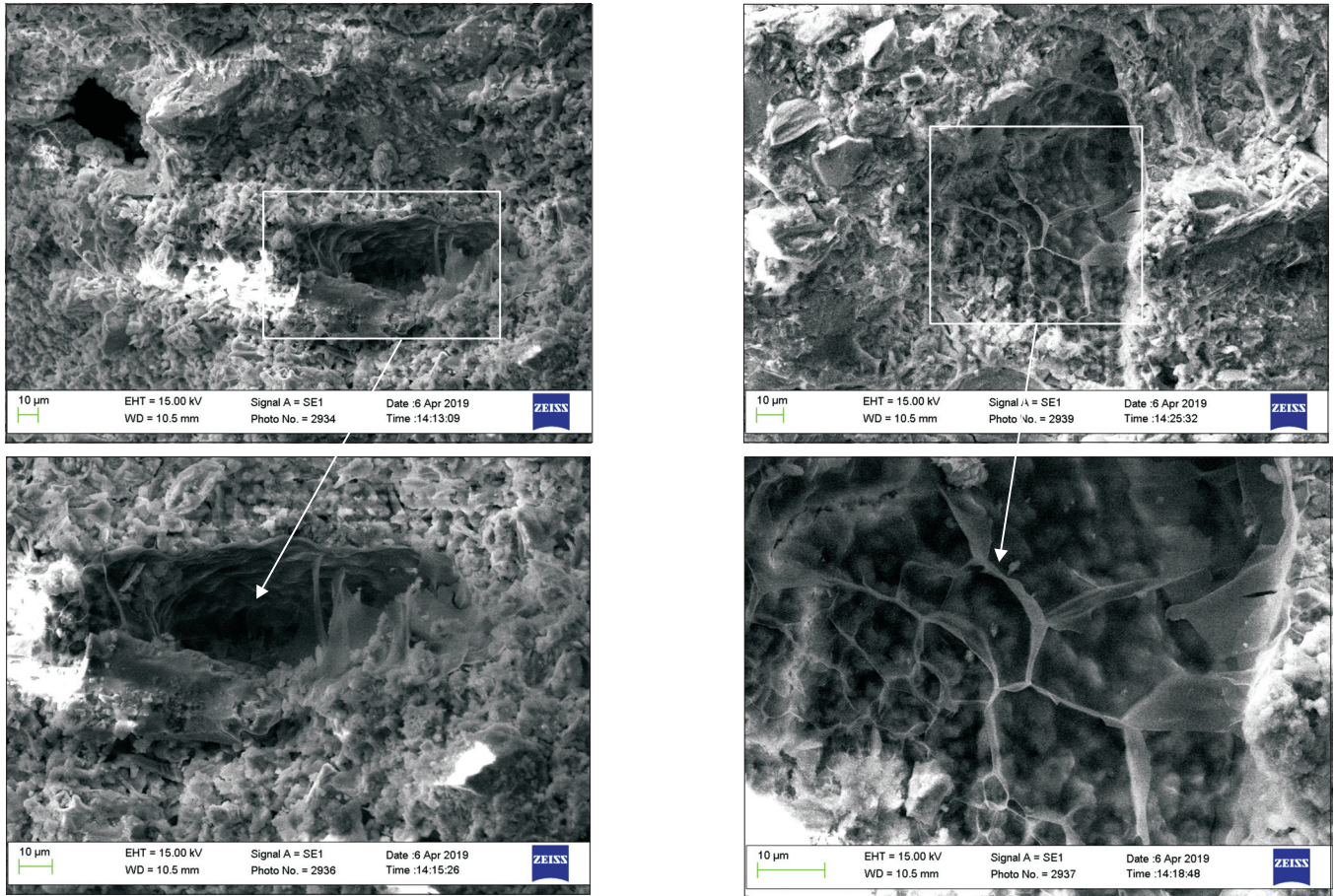


Fig. 6. SEM micrographs of FRC at 28 days (2,500 $\times$ ), arrows indicate pores in samples by SAPs

Rys. 6. Obrazy mikroskopowe SEM wykonane po 28 dniach (2.500 $\times$ ), strzałki wskazują pory w próbkach pozostałe po SAP

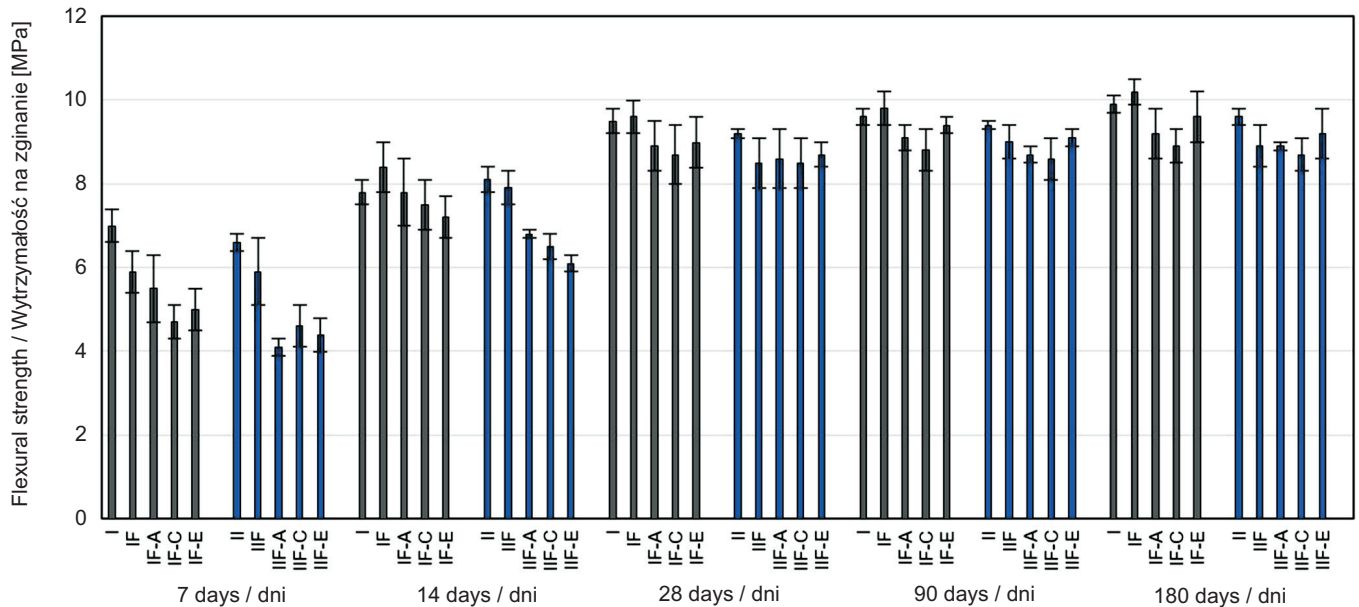


Fig. 7. Results of flexural strength tests

Rys. 7. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie

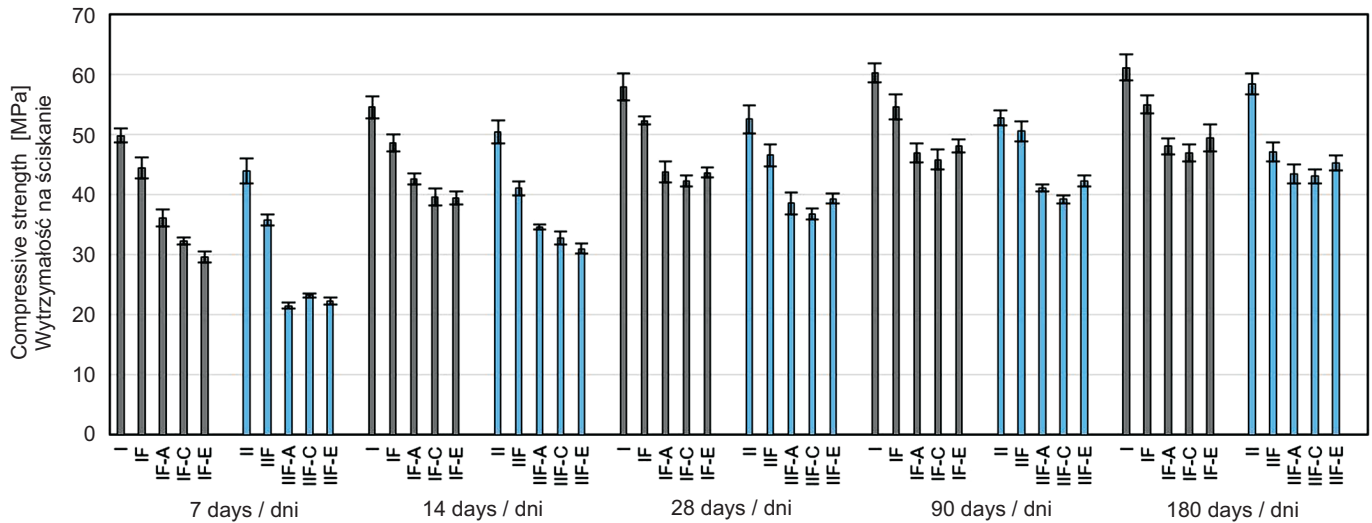


Fig. 8. Results of compressive strength tests  
Rys. 8. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie

Wytrzymałość na zginanie CEM I równomiernie wzrastała na przestrzeni 180 dni. W przypadku zapraw CEM II natomiast wytrzymałość na zginanie początkowo wzrastała, lecz po 28. dniu pozostawała niemalże niezmienna. Wpływ włókien PF na niedojrzałe próbki (do 7 dni) jest negatywny bez względu na typ zastosowanego spoiwa. Różnice między spoiwami uwidaczniają się z czasem; włókna PF zwiększają wytrzymałość w zaprawach CEM I, lecz obniżają ją w zaprawach CEM II. Spadek ten zależny jest od klasy popiołu lotnego (procentu zastąpienia cementu popiołem), długości i ilości włókien PF oraz wieku próbki. Wszystkie te parametry mogą mieć wpływ na właściwości mikrostruktury strefy przejściowej na styku matrycy i włókien.

Jak widać na Rys. 7, w przypadku obecności włókien dodatek SAP powodował spadek wytrzymałości na zginanie. Wpływ ten jest bardziej widoczny w młodszych próbkach. Widać wyraźnie, że zdolność absorpcji wody SAP determinuje właściwości mechaniczne FRM. Stwierdzono, że dodatek SAP E o wyższej zdolności absorpcji wody zaowocował najniższą wytrzymałością na wczesnym etapie dojrzewania (do 14 dni). Wydaje się jednak, że ten drobny SAP ( $76,74 \pm 0,22 \mu\text{m}$ ) znacząco poprawia wytrzymałość na późniejszych etapach, dzięki ponownemu wypełnieniu pozostałych po nim małych porów produktami hydratacji. Rys. 8 przedstawia trendy rozwoju wytrzymałości na ściskanie uzyskane dla wszystkich próbek.

Wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementem portlandzkim popiołowym jest niższa ze względu na powolny przebieg reakcji pucolanowych popiołu lotnego [1, 9]. Widać również, że próbki z włóknami PF wykazywały niższe wytrzymałości niż

determines mechanical characteristics of FRM. It was found that SAP E with higher WAC had the lowest strength at early age (up to 14 days). However, it appears that this fine SAP ( $76,74 \pm 0,22 \mu\text{m}$ ) notably enhances strength at later ages due to smaller voids being refilled with hydration products. Fig. 8 shows the similar trends of compressive strength development for all samples.

The compressive strength of mortars with PC-FA is lower due to slow pozzolanic reactions of fly ash [1, 9]. It is also evident that samples with PF exhibited lower strengths than the reference samples because of increased porosity. Although all SAPs lowered the strength at early ages, this negative effect was significantly reduced at later age. Reduction of compressive strength by SAPs depends on their WAC. SAP A with lower WAC reduced the compressive strength less than SAP C and E. However, after 28 days, SAP E with smaller particle sizes improved the mechanical properties.

#### 4. CONCLUSIONS

Basing on the obtained experimental results the following observations and conclusions can be drawn:

1. The addition of SAP to FRM leads to notable reduction of workability, which is closely related to total absorption capacity and particle sizes of SAP. However, this impact is substantially higher (by approximately 44%) in cements containing fly ash.
2. The effect of SAP on air content in cements containing fly ash depends mostly on WAC but it is very limited when compared to CEM I (approx. 2% difference). Particle sizes of SAP have a smaller influence.

próbki referencyjne ze względu na zwiększoną porowatość. Choć wszystkie SAP na wczesnych etapach dojrzewania obniżały wytrzymałość, ten negatywny wpływ ulegał znacznej redukcji z czasem. Spadek wytrzymałości na ściskanie wywołany przez SAP zależy od ich zdolności absorpcji wody. SAP A o niższej zdolności absorpcji spowodował mniejszą redukcję wytrzymałości niż SAP C i E. Po 28 dniach jednakże to SAP E (o mniejszych cząstkach) poprawił właściwości mechaniczne zaprawy.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych doświadczalnie wyników sformułować można następujące obserwacje i wnioski:

1. Dodatek SAP do zapraw zbrojonych włóknami prowadzi do zauważalnego spadku urabialności, który jest ściśle związany z całkowitą zdolnością absorpcji wody oraz wielkością cząstek SAP. Wpływ ten jest jednak znacznie większy (o około 44%) w przypadku zastosowania cementów zawierających popioły lotne.
  2. Wpływ obecności SAP na zawartość powietrza w zaprawach na bazie cementów zawierających popioły lotne zależy przede wszystkim od zdolności SAP do absorpcji wody, ale jest bardzo ograniczony w porównaniu z zaprawami z CEM I (zmiana o około 2%). Wielkość cząstek SAP ma tu mniejsze znaczenie.
  3. Dodatek SAP opóźnia koniec procesu wiązania zapraw FRM nawet o 40%, lecz takie opóźnienie nie ma ogólnie znaczącego wpływu na przebieg prac budowlanych. Należy zauważyć, że wpływ SAP na czas wiązania zależy w większym stopniu od obecności mniejszych cząstek (< 80 µm) niż od zdolności absorpcji wody.
  4. Skurcz autogeniczny może zostać całkowicie wyeliminowany przez dodatek SAP, bez względu na rodzaj cementu. Efektywność SAP zależy przede wszystkim od wielkości cząstek (zwłaszcza poniżej 80 µm).
  5. SAP mają negatywny wpływ na wczesny rozwój wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw zbrojonych włóknami, bez względu na rodzaj cementu. Niemniej jednak, te początkowe spadki wytrzymałości są później rekompensowane przez przedłużoną hydratację i ponowne wypełnianie porów jej produktami (90-180 dni). Efekt ten jest znacznie wyraźniejszy w przypadku użycia drobniejszych polimerów (< 80 µm).
3. Addition of SAP retards final setting times of FRM up to 40%, although such a delay does not generally affect construction operations. It should be noted that the effectiveness of SAP depends more on small particle sizes (< 80 µm) than water absorption capacities.
  4. Autogenous shrinkage can be completely eliminated by addition of SAPs regardless cement type. SAP effectiveness depends predominantly on the particle sizes (particularly below 80 µm).
  5. SAPs have a negative impact on early compressive and flexural strength development of FRM, regardless the type of cement. Nevertheless, these initial reductions in strength are minimised by the prolonged hydration and refillment of pores (90-180 days). The effect is much more pronounced when finer polymers (< 80 µm) are used.

#### BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R.D.*: Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, **41**, 12, 2011, 1244-1256
- [2] *Scrivener K.L., Lothenbach B., De Belie N., Grunyaert E., Skibsted J., Snellings R., Vollpracht A.*: TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs. *Materials and Structures*, **48**, 4, 2015, 835-862
- [3] *Van den Heede P., De Belie N.*: Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, **34**, 4, 2012, 431-442
- [4] *Thomas M.*: Supplementary cementing materials in concrete. CRC press, 2013
- [5] *De Belie N., Soutsos M., Grunyaert E.*: Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. Springer, 2018
- [6] *Thomas M.D.A., Hooton R.D., Scott A., Zibara H.*: The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, **42**, 1, 2012, 1-7
- [7] *Teng S., Lim T.Y.D., Sabet Divsholi B.*: Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultrafine ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, **40**, 2013, 875-881
- [8] *Tikal'sky P.J., Carrasquillo R.L., Snow P.G.*: Sulfate resistance of concrete containing fly ash. *ACI Symposium Paper*, **131**, 1992, 255-266
- [9] *Haha M.B., De Weerd K., Lothenbach B.*: Quantification of the degree of reaction of fly ash. *Cement and Concrete Research*, **40**, 11, 2010, 1620-1629
- [10] *Scrivener K.L., Juilland P., Monteiro P.J.*: Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, **78**, 2015, 38-56
- [11] *Wyrzykowski M., Lura P.*: Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement. *Cement and Concrete Research*, **85**, 2016, 75-81

- [12] Mechtcherine V., Reinhardt H.W.: Application of superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction: state-of-the-art report prepared by Technical Committee 225-SAP (Vol. 2). Springer Science & Business Media, 2012
- [13] Peyton S.W., Sanders C.L., John E.E., Hale W.M.: Bridge deck cracking: a field study on concrete placement, curing, and performance. *Construction and Building Materials*, **34**, 2012, 70-76
- [14] Fu T., Deboodt T., Ideker J.H.: Development of shrinkage limit specification for high performance concrete used in bridge decks. *Cement and Concrete Composites*, **72**, 2016, 17-26
- [15] Afroughsabet V., Biolzi L., Ozbakkaloglu T.: High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*, **51**, 14, 2016, 6517-6551
- [16] Gong J., Zeng W., Zhang W.: Influence of shrinkage-reducing agent and polypropylene fiber on shrinkage of ceramsite concrete. *Construction and Building Materials*, **159**, 2018, 155-163
- [17] Scrivener K.L., Lothenbach B., De Belie N., Gruyaert E., Skibsted J., Snellings R., Vollpracht A.: TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs. *Materials and Structures*, **48**, 4, 2015, 835-862
- [18] Almeida F.C., Rostami R., Klemm A.J.: The Effect of SAP on Volumetric Changes and Microstructural Alterations in PC-GGBS Matrices. *International Conference on Application of Superabsorbent Polymers & Other New Admixtures Towards Smart Concrete*. Springer, Cham., 2019, 97-105
- [19] Rostami R., Klemm A.J.: Effect of superabsorbent polymers on plastic shrinkage cracking and properties of fresh state mortars reinforced by polymeric fibres. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019): New Generation of Construction Materials*. RILEM, 2019, 614-621
- [20] Sikora K.S.: The effect of superabsorbent polymers on the properties of cementitious mortars containing fly ash. *Doctoral dissertation*, Glasgow Caledonian University, 2013
- [21] Rostami R., Klemm J.A.: The influence of superabsorbent polymers on drying shrinkage of fibre reinforced mortars. *Proceedings of the 39<sup>th</sup> Cement and Concrete Science Conference*, University of Bath, 2019, 54-57
- [22] Mechtcherine V., Secrieru E., Schröfl C.: Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars-Development of yield stress and plastic viscosity over time. *Cement and Concrete Research*, **67**, 2015, 52-65
- [23] Snoeck D., De Belie N.: Repeated autogenous healing in strain-hardening cementitious composites by using superabsorbent polymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**, 1, 2015, 04015086 (11 pp.)
- [24] Mechtcherine V., Schröfl C., Reichardt M., Klemm A.J., Khayat K.H.: Recommendations of RILEM TC 260-RSC for using superabsorbent polymers (SAP) for improving freeze-thaw resistance of cement-based materials. *Materials and Structures*, **52**, 4, 2019, 75
- [25] Almeida F.C., Rostami R., Klemm A.J.: Characterization of Polyacrylamide based Superabsorbent Polymers for potential use in PC Matrices with Supplementary Cementitious Materials. *MATEC Web of Conferences*, Vol. **199**, 02023, 2018, (9 pp.)
- [26] Mechtcherine V., Snoeck D., Schröfl C., De Belie N., Klemm A.J., Ichimiya K., Moon J., Wyrzykowski M., Lura P., Toropovs N., Assmann A.: Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test. *Materials and Structures*, **51**, 28, 2018, (16 pp.)
- [27] Klemm A.J., Sikora K.S.: The effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on microstructure and mechanical properties of fly ash cementitious mortars. *Construction and Building Materials*, **49**, 2013, 134-143
- [28] Snoeck D., Schaubroeck D., Dubruel P., De Belie N.: Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50. *Construction and Building Materials*, **72**, 2014, 148-157
- [29] BSI 2006b. BS EN 1015-3. Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table). British Standards Institution
- [30] BSI 2006c. BS EN 1015-6. Methods of test for Mortar for Masonry - Part 6: Determination of Bulk Density of Fresh Mortar. British Standards Institution
- [31] BSI 1999. BS EN 1015-7. Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 7: Determination of Air Content of Fresh Mortar. British Standards Institution
- [32] BS EN 480-2. Admixtures for Concrete, Mortar and Grout - Test Methods - Part 2: Determination of Setting Time. 2006, British Standards Institution
- [33] ASTM C1698-09. Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortars. ASTM International, 2009, American Society for Testing and Materials
- [34] BS EN 1015-11. Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar. 2006, British Standards Institution
- [35] Esteves L.P.: Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid. *Cement and Concrete Composites*, **33**, 7, 2011, 717-724