WOJCIECH PIASTA[1]
JULIA MARCZEWSKA[2]

Kielce University of Technology

[1]e-mail: wpiasta@tu.kielce.pl
[2]e-mail: jmarczewska@tu.kielce.pl

THE EFFECT OF AIR ENTRAINING ADMIXTURES AND CEMENT TYPES ON THE PROPERTIES OF FRESH MORTAR

Abstract

In order to explain the effect of air entraining admixture (AEA) and the type of cement on the properties of fresh mortar, the following tests were carried: bulk density, flow and air content of 10 air entrained mortars and 10 non air entrained mortars made of ordinary Portland cement (OPC) and blended Portland cements: blast furnace slag (BSF) – limestone powder (LP), fly ash - limestone, fly ash (FA) and (BFS) cement. It has been found that the modern anionic AEAs from the group of alkyl sulfates are much more efficient and active than traditional ones i.e. sodium abietate. It is difficult to entrain air into mortars with cement of various types to the same content of air. This requires to carry out a number of tests to determine the appropriate amounts of AEA. The air entrainment of LP cement mortar does not significantly change its flow. The air entrainment of BSF and FA cement mortars increases their workability. The lowest content of air was stated in non-air-entrained mortars with FA cement, the highest air content was observed in BFS cement mortars. According to the results the bulk density of mortars is inversely proportional to the amount of air entrained.

Keywords: air entrainment, mineral admixtures, air content, bulk density, flow.

1. Introduction

The optimal (economical and efficient) way to improve frost resistance of concrete and mortar is air entrainment. The most effective air content in concrete mixes containing aggregate grains of diameter d_{max} = 16 mm is 5-6% (according to PN-EN 206-1, the minimum value is 4%). However, the amount of air in the mortar is not specified [9]. The air content in the frost resistant mortar may be assumed to be equal to about 10% (twice as much as in concrete), as the content volume of mortar in concrete mix is about 50%.

AEAs molecules in the solution help entrain air bubbles and stabilize them in the fresh concrete. The AEAs are surface active. They decrease surface tension at water and air (or vapour) interface. The structure of air entraining surfactant molecules is very particular. They have their hydrophilic head and hydrophobic tail (chain). Most of the modern AEAs are anionic because of the stability of air voids entrained [2]. The anionic surfactants include: n-alkylcarboxylates (n-$RCOO^-$), n-alkylsulfonates (n-RSO_3^-) and n-alkylsulfates (n-RSO_4^-), with hydrocarbon chain lengths between C_7 and C_{12}. The two main features of the AEAs are their composition and size of hydrophobic chain and the nature and size of their hydrophilic head group affecting surface activity and their solubility in cement paste solution. Maximum air entrainment is obtained with surfactants of intermediate chain length because their surface activity and solubility vary in opposite directions. The hydrophilic head group increases the air entrainment in the order carboxylate ↗ sulfonate ↗ sulphate in line with the respective solubility of surfactants [7]. A number of other anionic AEAs exist in the market, including soluble salts (usually sodium) of wood resins, wood rosins, stearic acid, tall oil fatty acid, as well as, sodium abietate and lignosulfonic acid [1].

Analyzing the literature [5] in the range of concrete technology, it can be seen that the air entrainment increases diameter of flow and reduces bulk density. The effect of AEAs on the properties of fresh mortars and concrete mixes is different particularly when they contain mineral admixtures [3, 4, 12]. Because of the high inconvenience in air entrainment of blended

cement mortars and concretes it has been proposed to replace AEAs with polymer microspheres [11]. However, the application of microspheres is expensive.

In the paper, the results of studies of fresh air entrained mortar and non air entrained cement mortars made with ten different cements are presented.

2. Experimental

The studies were carried out to determine the effect of the following factors: efficiency of the two AEAs (AEAs type and amount), air content and type of cement on the properties of fresh mortars. The tested mortar properties were: air content, flow and bulk density.

2.1. Materials

A study of air entrained and non air entrained mortars of the ratio w/c = 0.55 was carried out. The following types of cement were used: ordinary Portland cement CEM I 42.5 R, and blended Portland cements: slag and limestone CEM II/AM (S-LL) 52.5 N, fly ash and limestone CEM II/BM (V-LL) 32.5 R, fly ash (FA) CEM II/BV 32.5 R and blast furnace slag (BFS) CEM III/A 32.5 N. The tests were also done using the same cements from another cement plants. The percentage of mineral admixtures in cements used in the studies is shown in Table 1. A total of 20 air entrained and non air entrained mortars were cast with different cements, assuming the air content of 10% ± 1%. As the fine aggregate natural quartz sand was used (0.0 – 2.0 mm). Mortar composition is shown in Table 2.

Two anionic AEAs were applied – a traditional one, sodium abietate and modern one from the group of alkylsulfates. The AEAs applied were some solutions of air entraining compounds, because it was impossible to get pure ones. Therefore, the amounts of AEAs used should be taken into account in the relative way.

2.2. Methods

The following fresh mortars properties were tested:

- consistency of mortar according to PN-EN 1015-3:2000 (method of flow)
- bulk density in accordance with PN-EN 1015-6:2000 and
- air content in accordance with PN-EN 1015-7:2000.

It was assumed that the air content in air entrained mortars should be 10%. Because of the high inconvenience to maintain the assumed air content (10%) for all mortars, 1% error limit was accepted. The quantity of air entraining admixture for each mix (Table 2) was experimentally determined by numerous tests. During the test mortar temperature was 20 ± 2°C.

Table 1. The composition of the cements used in the tests.

Sign	Cement type*	Composition of the cement [%]			
		Clinker	Slag	Limestone	Dry fly ash
A	CEM I 42.5 R a	89.3		4.5	
B	CEM I 42.5 R b	89.5		4.5	
C	CEM I 42.5 R c	90.0		5.0	
D	CEM II/AM (S-LL) 52.5 N a	75.9	9.4	8.3	
E	CEM II/BM (V-LL) 32.5 R a	61.8		11.8	20.4
F	CEM II/BM (V-LL) 32.5 R b	62.0		12.0	20.0
G	CEM II/BV 32.5 R a	61.9		5.5	27.7
H	CEM II/BV 32.5 R b	62.0		4.5	29.2
I	CEM III/A 32.5 N-LH/HSR/NA a	33.5	57.0	3.5	
J	CEM III/A 32.5 N-LH/HSR/NA b	34.0	57.0	3.0	

* a, b, c - mean different cement plants

Table 2. The composition of mortar (g/batch).

Ingredients	CEM I		CEM II/AM (S-LL)		CEM II/BM (V-LL)		CEM II/BV		CEM III/A	
	nae	ae	nae	ae	nae	ae	nae	ae	nae	ae
	Mass [g]									
Cement	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Sand	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650
w/c	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Water	275	271.5	275	274.5	275	274.5	275	274.3	275	274.6
Entraining admixture		0.35		0.5		0.5		0.75		0.4

nae – non air entrained mortar;
ae – air entrained mortar

In order to minimize the impact of uncontrolled variables on the test results the mortars samples were prepared maintaining the same technology (same order of added ingredients, mixing time, its intensity, temperature, contact time with the water cement to start measuring).

3. Test results and discussion

When the modern (n-alkylsulfate) AEA was applied in the amount of 0.72 – 1.6‰ the content of air in the fresh mortars was from 7% to 16.5% (Fig. 1). In accordance with producer's terms of use, the modern AEA should be applied in the amount below 1‰ of cement mass. The biggest variance of air content was determined in the mortar made of high content FA cement. As it is seen in Figure 1 the modern AEA is very efficient. However, it should be applied in FA cement mortars in the amount of 1.4‰.

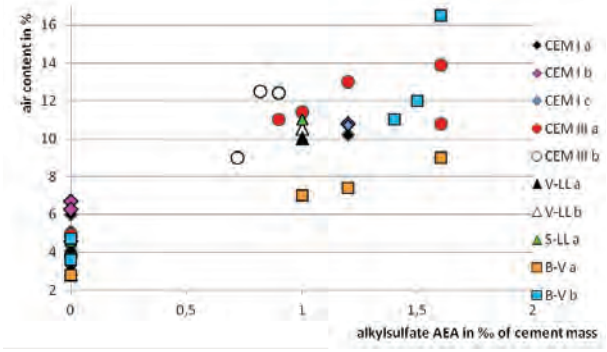

Fig. 1. The air content in various fresh cement mortars as a dependence of modern AEA applied

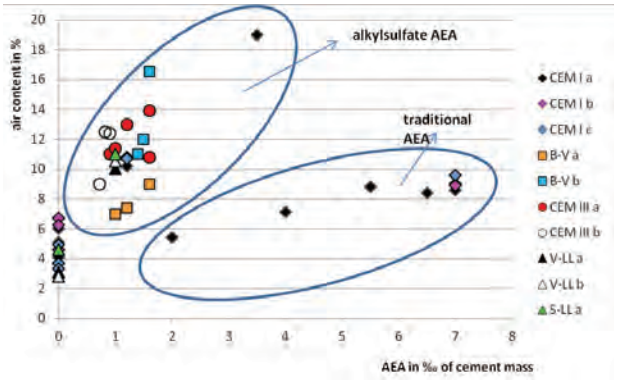

Fig. 2. The air contents in fresh mortars as a dependence of type and AEAs amount applied

The efficiency of traditional AEA is very low, particularly in the comparison to efficiency of the modern AEA (Fig. 2). When the amount of traditional AEA was applied in accordance with producer's terms of use i.e. 2‰ the contents of air in the air entrained and non air entrained fresh mortars were the same.

Figure 2 shows upward trend of air content in the fresh mortars against the amount of both AEAs. However, when the traditional AEA was applied the growth of air content was low. In spite of an increase in AEA amount over 6‰ of cement mass an increase in air entrained content in the mortar did not occur. The so-called air entrainment saturation was observed, which is caused by critical micelle concentration (CMC); and the higher CMC, the lower surface activity of the surfactant [7]. The use of such big amount of AEA is not allowed because of the possible changes in setting of cement and hardening of cement paste.

To compare efficiencies of both AEAs changes in the air contents in Portland cement fresh mortars were observed when the AEAs were applied. As is illustrated in Figure 2, much bigger and more dynamic increase in air contents was stated when the AEA of modern type was applied. Also it was quite convenient to achieve high amount of air entrained in FA and BSF blended cement mortars, though it was impossible to do using traditional AEA. Table 3 presents the results of the properties of the fresh mortars.

Table 3. The test results of the fresh mortar.

Cement type	Cement plant	nae/ae	Spreading [mm]	Density [kg/m^3]	Air content [%]
CEM I	a	nae	180	2259	3.0
		ae	223	2119	9.0
CEM I	b	nae	173	2232	4.6
		ae	225	2093	9.1
CEM I	c	nae	185	2259	3.8
		ae	212	2121	9.6
CEM II/AM (S-LL)	a	nae	202	2218	4.6
		ae	213	2095	11.0
CEM II/BM (V-LL)	a	nae	205	2218	3.1
		ae	214	2093	10.0
CEM II/BM (V-LL)	b	nae	204	2200	3.7
		ae	216	2071	10.5
CEM II/BV	a	nae	168	2212	2.8
		ae	212	2095	9.0
CEM II/BV	b	nae	166	2182	3.4
		ae	211	1976	11.0
CEM III/A	a	nae	181	2192	4.9
		ae	217	2081	11.0
CEM III/A	b	nae	179	2191	3.8
		ae	218	2088	9.0

Based on the results of the study (Fig. 3) it can be seen that with the increase in the amount of ash in non air entrained mortars the percentage of air decreases and using FA cement reaches a level of 2.8 to 3.4%. In the studied non air entrained mortars air volume ranges from 2.8 to 4.9% and takes the highest

value for the mortar with the blast furnace slag and limestone powder blended cement.

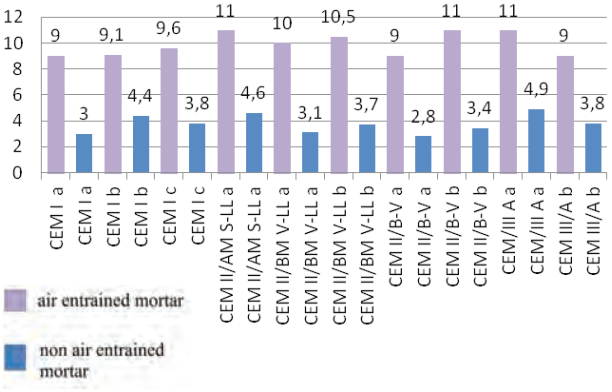

Fig. 3. Air content in non-air-entrained and air-entrained mortar cement

The air entrainment caused insignificant increase in flow of mortars of cement containing LP (Fig. 4). The air entrainment of the mortar with the FA cement significantly improved their workability (Fig. 4). The air entrainment of mortars with Portland, slag and fly ash cement in a similar degree improves their workability.

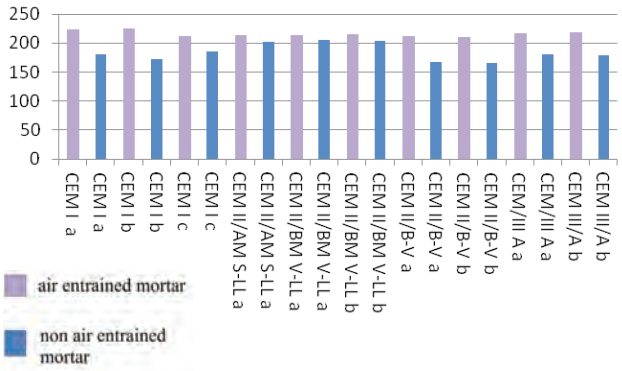

Fig. 4. The diameter of flow of non air-entrained and air-entrained cement mortar

Density of non air entrained mortar varies from 2182 to 2259 kg/m^3 while air entrained cement mortar from 1976 to 2121 kg/m^3 (Fig. 5). This confirms the relationship that the bulk density of the mortar is inversely proportional to the amount of air. The FA cement mortar had the lowest bulk density (2182 km/m^3) among non air entrained mortars. The highest bulk density has been determined for mortars with Portland cement both non air entrained and air entrained, which is consistent with the highest density of CEM I.

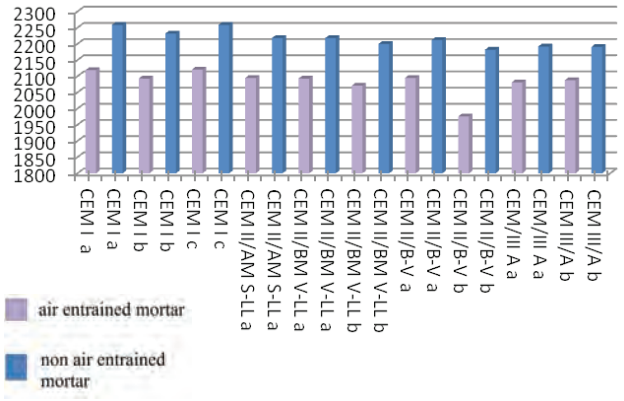

Fig. 5. Density non air-entrained and air-entrained cement mortar

4. Conclusions

1. The modern anionic AEAs from the group of alkylsulfates are much more efficient and active than traditional ones e.g. sodium abietate.
2. It has to be done using numerous tests to entrain the same amount of air into mortars with different cements.
3. The amount of the fly ash in the non air entrained mortar decreases the content of air in mortar.
4. Air entrainment of limestone cement mortar resulted in insignificant increase in flow.
5. Diameter of flow of fresh mortar is inversely proportional to the amount of air.
6. Air entrainment of mortar with Portland, blast furnace slag and fly ash cement in a similar degree improves their workability.

References

[1] Aitcin P. C.: *Admixtures: Essential Components of Modern Concrete.* Cement Wapno Beton, 5/2006.
[2] Du L., Folliard K. J.: *Mechanisms of air entrainment in concrete.* Cement and Concrete Research, 35 (2005) 1463-1471.
[3] Giergiczny Z., Garbacik A.: *Synergic effect of non-clinkier constituents in portland composite cements*. XII Sympozjum Naukowo-Techniczne Roelogia w Technologii Betonu, Gliwice 2010.
[4] Giergiczny Z., Sokołowski M.: *Limestone as a component of composite cement*. 3rd International Symposium Non-traditional cement and concrete, Brno 2008.
[5] Gołaszewski J.: *Influence of cement and superplasticizer on rheological properies of mortars*. IV Sympozjum Naukowo-Techniczne Reologia w Technologii Betonu", Gliwice 2002.
[6] Jarmontowicz R.: *Standards requirements mortars*. Materiały Budowlane, 4/2010.

[7] Jolicoeur C., Cong To T., Soan Nguyen T., Hill R., Page M.: *Mode of Action of Anionic Surfactants for Air Entrainment in Cement Pastes w-w/o Fly Ash*. World of Coal Ash (WOCA) Conference, 2009 in Lexington, KY, USA.
[8] PN-EN 1015-3:2000, Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (using the propagation table), PKN, Warszawa 2000.
[9] PN-EN 998-2:2004, Specification for mortar for masonry. Part 2: Masonry mortar, PKN, Warszawa 2004.
[10] Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, Kraków 2002.
[11] Wawrzeńczyk J., Molendowska A.: *Struktura porów powietrznych a mrozoodporność betonów napowietrzonych za pomocą mikrosfer*. Cement Wapno Beton, 05/2011.
[12] Zelić J., Krstulović R., Tkalcec E., Krolo P.: *The properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars.* Cement and Concrete Research, 30 (2000), 145-152.

Wojciech Piasta
Julia Marczewska

Wpływ domieszki napowietrzającej i rodzaju cementu na właściwości świeżej zaprawy

1. Wprowadzenie

Optymalnym (oszczędnym i wydajnym) sposobem na poprawę mrozoodporności betonu i zapraw jest jego napowietrzenie. Najskuteczniejszą zawartością powietrza w mieszance betonowej zawierającej ziarna kruszywa o średnicy d_{max} = 16 mm jest 5-6% (wg PN-EN 206-1, minimalna zawartość wynosi 4%). Jednak norma [9] nie określa ilości powietrza w zaprawach. Założono, że zawartość powietrza w zaprawie powinna być równa około 10% (dwukrotnie więcej niż w betonach), ponieważ zawartość objętościowa zaprawy w mieszance betonowej wynosi około 50%.

Domieszki napowietrzające pomagają wprowadzić i ustabilizować powietrze w świeżym betonie lub zaprawach. Domieszki napowietrzające są to środki powierzchniowo czynne. Obniżają one napięcie powierzchniowe w miejscu łączenia się (kontaktu) wody i powietrza (lub pary). Struktura cząsteczek napowietrzających środków powierzchniowo czynnych jest bardzo szczególna. Mają one hydrofilową grupę i hydrofobowy łańcuch. Większość nowoczesnych domieszek napowietrzających jest anionowych, ponieważ zapewniają one stabilność wprowadzonych porów powietrza [2]. Anionowe środki powierzchniowo czynne obejmują: n-alkilokarboksylany (n-$RCOO^-$), n-alkilosulfoniany, (n-RSO_3^-) i n-alkilosiarczany (n-RSO_4^-), przy długości łańcucha węglowodorowego między C_7 i C_{12}. Dwie główne cechy domieszek napowietrzających, czyli skład i wielkość ich łańcucha hydrofobowego oraz rodzaj i wielkość ich głównej grupy hydrofilowej wpływają odpowiednio na ich aktywność powierzchniową i rozpuszczalność w zaczynie cementowym. Maksymalne napowietrzenie uzyskuje się przy stosowaniu środków powierzchniowo czynnych z średnią długością łańcucha węglowego, ponieważ ich aktywność powierzchniowa i rozpuszczalność zmieniają się w przeciwnych kierunkach. Główne grupy hydrofilowe zwiększają napowietrzenie w kolejności: karboksylanowa ↗ sulfonianowa ↗ siarczanowa zgodnie z odpowiednią rozpuszczalnością środków powierzchniowo czynnych [7]. Na rynku istnieje kilka innych anionowych domieszek napowietrzających, w tym: rozpuszczalne sole (przeważnie sodu) żywic drzewnych, kalafonie z drewna, kwas stearynowy, kwas tłuszczowy oleju talowego, a także abietynian sodu i kwas ligninosulfonowy [1].

Analizując literaturę [5] z zakresu technologii betonu można zauważyć, że napowietrzenie zwiększa średnicę rozpływu i zmniejsza gęstość objętościową. Wpływ domieszek napowietrzających na właściwości świeżych zapraw i mieszanek betonowych różni się w szczególności wtedy, gdy zawierają one dodatki mineralne [3], [4], [12]. Ze względu na dużą niedogodność w napowietrzeniu zapraw i betonów z cementami mieszanymi, zaproponowano zastąpienie domieszek napowietrzających mikrosferami polimerowymi [11]. Jednakże, zastosowanie mikrosfer jest kosztowne.

W pracy prezentowane są wyniki badań napowietrzonych i nienapowietrzonych świeżych zapraw cementowych wykonanych z dziesięciu różnych cementów.

2. Badania

Badania miały na celu określenia wpływu następujących czynników: sprawność dwóch domieszek napowietrzających (rodzaj oraz ilość), zawartość powietrza i rodzaj cementu na właściwości świeżych zapraw. Badane były następujące właściwości zapraw: zawartość powietrza, rozpływ i gęstość objętościowa.

2.1. Materiały

Badania zostały przeprowadzone na zaprawach napowietrzonych i nienapowietrzonych o stosunku w/c = 0,55. Zastosowano następujące rodzaje cementów: cement portlandzki zwykły CEM I 42,5 R, i mieszane cementy portlandzkie: żużlowo-wapienny CEM II/AM (S-LL) 52,5 N, popiołowo-wapienny CEM II/BM (V-LL) 32,5 R, popiołowy CEM II/BV 32,5 R i hutniczy CEM III/A 32,5 N. Badania zostały również wykonane przy użyciu tych samych cementów z innych cementowni. Procentową zawartość dodatków mineralnych w stosowanych podczas badań cementach przedstawiono w tabeli 1. W sumie wykonano 20 zapraw z różnych cementów napowietrzonych i nienapowietrzonych, przy założeniu zawartości powietrza 10% ± 1%. Jako kruszywo drobne użyto naturalnego piasku kwarcowego (0,0 – 2,0 mm). Skład zapraw przedstawiono w tabeli 2.

Zastosowano dwie anionowe domieszki napowietrzające – tradycyjną abietynian sodu i nowoczesną jedną z grupy alkilosiarczanowych. Jako domieszki napowietrzające stosowane były roztwory związków napowietrzających, ponieważ niemożliwe było zdobycie czystych związków. Dlatego ilość zastosowanych domieszek powinna być brana pod uwagę w sposób względny.

2.2. Metody

Zbadano następujące właściwości świeżych zapraw:

- konsystencja zapraw zgodnie z PN-EN 1015-3:2000 (metoda rozpływu)
- gęstość objętościowa zgodnie z PN-EN 1015-6:2000 oraz
- zawartość powietrza zgodnie z PN-EN 1015-7:2000.

Założono, że zawartość powietrza w napowietrzonych zaprawach powinna wynosić 10%. Ze względu na dużą niedogodność uzyskania założonej zawartości powietrza (10%) dla wszystkich zapraw, została przyjęta granica błędu 1%. Ilość domieszki napowietrzającej dla każdej mieszanki (tabela 2) określono doświadczalnie poprzez liczne próby. Podczas badań temperatura zapraw wynosiła 20 ± 2°C.

W celu zminimalizowania wpływu niekontrolowanych zmiennych na wyniki badań zapraw próbki przygotowano przy zachowaniu tej samej technologii (taka sama kolejność dodawanych składników, czas i intensywność mieszania, temperatura, czas kontaktu cementu z wodą do rozpoczęcia pomiaru).

3. Wyniki badań i dyskusja

W przypadku zastosowania nowoczesnej domieszki napowietrzającej (z grupy związków alkilosiarczanowych) w ilości 0,72 – 1,6‰ zawartość powietrza w świeżej zaprawie wynosiła od 7% do 16,5% (rys. 1). Zgodnie z zaleceniami producenta domieszkę tę należy stosować w ilości poniżej 1‰ masy cementu. Największe zróżnicowanie zawartości powietrza zostało określone w zaprawach z cementem o wysokiej zawartości popiołów lotnych. Nowoczesne domieszki są bardzo wydajne, co widać na rysunku 1.

Nowoczesne domieszki napowietrzające w zaprawach cementowych zawierających popiół lotny należy stosować w wysokości 1,4‰. Wydajność klasycznych (tradycyjnych) domieszek jest bardzo niska, w porównaniu do wydajności domieszek nowoczesnych (rys. 2). Gdy ilość tradycyjnej domieszki była stosowana zgodnie z zaleceniami producenta (tj. 2‰ masy cementu) zawartość powietrza w napowietrzonych i nienapowietrzonych świeżych zaprawach była taka sama.

Rysunek 2 przedstawia tendencję wzrostu zawartości powietrza w świeżej zaprawie przy wzroście ilości obu domieszek. Jednakże, gdy zastosowano tradycyjną domieszkę wzrost zawartości powietrza był niski. Pomimo wzrostu ilości domieszki ponad 6‰ masy cementu nie wystąpił wzrost zawartości powietrza w zaprawie. Zaobserwowano tzw. nasycenie świeżej zaprawy powietrzem, które jest spowodowane przez krytyczne stężenie micelarne (CMC) domieszki. Im wyższe jest CMC, tym niższa jest aktywność powierzchniowo-czynna środka powierzchniowo czynnego [7]. Zastosowanie tak dużej ilości domieszki jest niedozwolone ze względu na ewentualne zmiany w wiązaniu i twardnieniu zaprawy cementowej.

Aby porównać efektywność obu domieszek obserwowano zmiany zawartości powietrza w świeżych zaprawach z cementem portlandzkim i przy zastosowaniu różnych domieszek. Jak pokazano na rysunku 2 znacznie większy i bardziej dynamiczny

wzrost zawartości powietrza stwierdzono, kiedy została zastosowana domieszka z grupy związków alkilosiarczanowych. Także napowietrzenie do założonego poziomu powietrza zapraw z cementem popiołowym i hutniczym było stosunkowo łatwe do osiągnięcia stosując nowoczesną domieszkę, co było niemożliwe za pomocą domieszki tradycyjnej. Tabela 3 przedstawia wyniki właściwości świeżych zapraw.

Na podstawie wyników badań (rys. 3) można zauważyć, że wraz ze wzrostem ilości popiołu w nienapowietrzonych zaprawach zmniejsza się zawartość procentowa powietrza i przy użyciu cementu CEM II/B-V osiąga poziom od 2,8 do 3,4%. W badanych zaprawach nienapowietrzonych objętość powietrza waha się od 2,8 do 4,9% i ma największą wartość dla zaprawy z cementem hutniczym i żużlowo-wapiennym.

Napowietrzenie zapraw z cementem wapiennym spowodowało nieznaczny wzrost rozpływu (rys. 4). Po napowietrzeniu zapraw z cementem popiołowym znacznie poprawiła się ich urabialność. Napowietrzenie zapraw z cementem portlandzkim, hutniczym i popiołowym w podobnym stopniu poprawia ich urabialność.

Gęstość objętościowa zapraw nienapowietrzonych waha się od 2182 do 2259 kg/m^3, natomiast dla zapraw napowietrzonych od 1976 do 2121 kg/m^3 (rys. 5). Potwierdza to, że stosunek gęstości objętościowej zapraw do ilości powietrza jest odwrotnie proporcjonalny. Zaprawa z cementem popiołowym miała najniższą gęstość objętościową (2182 kg/m^3) wśród zapraw nienapowietrzonych. Największą gęstość objętościową zanotowano dla zapraw z cementem portlandzkim zarówno nienapowietrzonym, jak i napowietrzonym.

4. Wnioski

1. Nowoczesne anionowe domieszki z grupy związków alkilosiarczanowych są o wiele bardziej skuteczne i aktywne niż tradycyjne, np. abietynian sodu.
2. Należy wykonać wiele prób w celu uzyskania tej samej ilości powietrza w zaprawach z różnymi cementami.
3. Wzrost ilości popiołu w nienapowietrzonych zaprawach zmniejsza zawartość powietrza w zaprawie.
4. Napowietrzenie zaprawy z cementami wapiennymi spowodowało nieznaczne zwiększenie rozpływu.
5. Średnica rozpływu świeżej zaprawy jest odwrotnie proporcjonalna do zawartości powietrza.
6. Napowietrzenie zaprawy z cementem portlandzkim, hutniczym i popiołowym w podobnym stopniu poprawia ich urabialność.