

Badania składu spoiwa i warunków dojrzewania małych elementów murowych zawierających popiół lotny oraz ekspandowany perlit

Investigation of binders composition and curing condition of masonry samples with fly ash and expanded perlite

1. Wstęp

Zaprawy wapienne z dodatkiem pucolan naturalnych lub innych materiałów pucolanowych były stosowane już w starożytności (1). Rzymianie dodawali pokruszone wulkaniczne pucolany do zapraw wapiennych (2). Wapno, przed zastosowaniem dojrzewało trzy lata w wilgotnym środowisku (3). Po upadku cesarstwa rzymskiego zanikła sztuka wytwarzania dobrych zapraw i została one powtórnie odtworzona przede wszystkim w wieku dziewiętnastym, po odkryciu cementu portlandzkiego. Cement ten miał dużą wytrzymałość i nadawał konstrukcyjnym materiałom tę właściwość fizyczną jaką posiadały starożytne zaprawy (2).

Wapno wytwarza się, jak wiadomo, z wapieni, a do produkcji cementu dodaje się do niego glinę. Zapewniają one cementom dwa podstawowe tlenki, z których w procesie prażenia powstają alit i belit główne składniki cementu portlandzkiego, decydujące o jego dużej wytrzymałości na ściskanie i właściwościach hydraulicznych (4). Także w wyniku reakcji wapna z pucolaną w wodzie powstaje analogiczna faza C-S-H jak z reakcji ortokrzemianów w cemencie, jednak rozwój wytrzymałości nie jest tak duży i szybki jak w przypadku cementu portlandzkiego. Wiadomo, że reakcja pucolanowa w zaprawie rozpoczyna się po tygodniu lub nawet później. Do tego czasu pucolana zachowuje się jak dodatek obojętny, który, w pewnych przypadkach, może odgrywać rolę hetero-zarodków dla fazy C-S-H, powstającej w procesie hydratacji cementu. Po zapoczątkowaniu reakcji pucolanowej powstają dodatkowe ilości tej fazy, zmniejszając porowatość materiału i zwiększając wytrzymałość (5).

W ostatnich czasach cementownie, w celu zmniejszenia zużycia energii i emisji CO₂, zwiększają produkcję cementów wieloskładnikowych, stosując dodatki mineralne (6). Pochodzą one w dużym stopniu z elektrowni opalanych węglem, w których powstają ogromne ilości popiołu lotnego (7,8), stosowanego masowo w budownictwie. Poza stosowaniem popiołu lotnego do produkcji cementu i betonu, stanowi on znany dodatek do wytwarzania elementów

1. Introduction

Lime-based mortars with addition of natural pozzolanas or other similar pozzolanic materials, even ceramics, have been used from ancient times (1). Ancient Roman builders added crushed volcanic additions to lime mortars (2). They stored lime in moist condition during three years before use (3). After the period of the Roman Empire, mortars were not developed until the nineteenth century, when Portland cement was found. Thus, it became a high-strength structural component with compressive strength comparable with the binders used in the ancient masonry mortars (2).

Lime is produced from limestone as raw material, but clay must be also used for cement production. Cement takes CaO from limestone and SiO₂ from clay as the most important constituents for alite and belite production, which have the most important influence on compressive strength and hydraulic property of Portland cement (4). If lime is combined with pozzolana addition C-S-H phase is formed, however, strength development is not as high as in the case of Portland cement. It is well known that the reaction of pozzolana in mortar, is only commencing after one or more weeks. Until this period pozzolana behaves as an inert material, which, in some cases, can only serves as hetero-nuclei for C-S-H gel formation, originating from cement hydration. After the initiation of the pozzolanic reaction, the additional quantity of C-S-H precipitation will cause the mortar porosity decrease and strength increase (5).

Nowadays, cement plants, in order to reduce energy consumption and CO₂ emission, increase the production of blended Portland cement with mineral additives (6). Coal-fired power plants also produce significant amounts (millions of tons) of fly ash (7, 8) which is used widely in construction sector. Apart from the use of fly ash in production of cement and concrete, it is an additive preferred in wall units fabrication, composed of binders containing cement and pozzolanas (7, 9-14). Several studies have been conducted on burned brick produced of fly ash. The use of such bricks is

murowych, które zawierają spoiwa złożone z cementu i pucolany (7, 9-14). Przeprowadzono wiele badań dotyczących produkcji ceramiki czerwonej z popiołu lotnego. Stosowanie takich cegieł jest znane w wielu krajach. Jednak, znaczenie niewypalanych elementów szybko wzrasta i ukazało się wiele patentów, dotyczących zastosowania spoiw złożonych z mieszaniny wapna i popiołu lotnego do produkcji elementów murowych (15).

Niewypalane elementy jako materiały kompozytowe są zwykle wytwarzane przez prasowanie w formach. Są one często wyjmowane z form i wysychają w warunkach środowiska. Zastosowanie cementu jako jedynego spoiwa jest preferowane w produkcji tego rodzaju elementów murowych, zwanych brykietami lub bloczkami w Turcji, bowiem zastosowanie wapna z pucolaną opóźnia twardnienie i przyrost wytrzymałości (16). Materiały o dużej miękkości w rodzaju popiołów lotnych poprawiają gęstość wyrobu, związany z efektem wypełniacza, oraz mają korzystny wpływ na reologię (17). Można także stosować różne warunki dojrzewania elementów w celu lepszego wykorzystania właściwości spoiwa, złożonego z mieszaniny popiołu lotnego z wapnem (16).

Perlit jest materiałem stosowanym do izolacji budynków, przy czym większość źródeł tego surowca znajduje się w Turcji. Perlit ekspandowany ma bardzo małą gęstość i jego dodatek może być stosowany do produkcji lekkich materiałów budowlanych. Jego duża porowatość poprawia własności izolacyjne, które stanowią pożądaną cechę w przypadku materiałów murowych (18). Natomiast powoduje to także wzrost nasiąkliwości i pogorszenie właściwości mechanicznych elementów budowlanych (19). Perlit ekspandowany jest pomimo tego stosowany w produkcji elementów ściennych (18).

W pracy, wykorzystującej niektóre dane z pracy magisterskiej jednego z autorów, przygotowano próbki zaprawy o wymiarach 40x40x160 mm, przez prasowanie kompozytów złożonych z cementu, wapna, popiołu lotnego perlitu i piasku. Badania te stanowią podstawę do wyboru najlepszego składu mieszanki do produkcji elementów murowych. Głównym celem było ustalenie dobrego składu spoiwa, odpowiednich warunków dojrzewania materiału oraz wyjaśnienie wpływu perlitu. Badano następujące właściwości: gęstość pozorną, nasiąkliwość, wytrzymałość na ścislenie i rozciąganie zapraw dojrzewających w różnych warunkach. Ważną zależnością był wpływ warunków dojrzewania na te właściwości.

2. Doświadczenia

Podstawowymi składnikami mieszanek był cement, wapno hydratyzowane, popiół lotny, perlit i zmielony piasek oraz woda. Skład chemiczny i właściwości fizyczne składników spoiwa podano w tablicy 1.

Popiół lotny stosowany w doświadczeniach pochodził z elektrowni Çayırhan w Ankarze, w Turcji. Ten popiół pochodził ze spalania węgla brunatnego i zawierał dużo CaO [tablica 1]. Jego skład chemiczny pozwalał go zaliczyć do klasy C według normy ASTM C

authorized in many countries. However, unburned bricks is becoming increasingly important and there are a number of patents on the use of fly ash–lime mixtures, for making these wall units (15).

Unburned bricks, as a composite material, are usually produced by compaction in moulds. They are often demoulded without maturing and left to dry in the external environment. Usage of cement alone as binder is preferred in this kind of masonry units, named briquette and bims block in Turkey, because lime and pozzolana are delaying hardening and strength development (16). Fine materials as fly ash can also improve the density of mortars due to a filler effect and are advantageous in terms of rheology (17). The different curing methods can be also applied to turn into advantages the use of fly ash and lime (16).

Pearlite is a material that can be used for insulation in buildings, and most of the perlite reserves exist in Turkey. Because expanded perlite has a very low density, its addition can be used for the light-weight mortars production. Its porous structure is also increasing the insulation properties, which are expected for the wall material (18). However, some increase of water absorption and decrease of mechanical properties of mortars must be also expected (19). Nevertheless, the use of expanded perlite in the wall materials production can be possible (18).

In the study, partially based on the master thesis of one author, mortar samples of the dimensions of 40x40x160 mm were produced, by compacting the composite consisting of cement, lime, fly ash, perlite and sand. The study was a preliminary investigation to find the best composition for the production of composite masonry blocks. The main goal was to find the proper composition of binders, suitable curing conditions and to establish the effect of perlite addition. Apparent density, water absorption, compressive and flexural strength of mortar samples cured in three different conditions were tested.

The aim of the present work is to examine the effect of curing conditions on the mechanical strength of mortars produced from binders of different compositions. Primarily the influence of curing condition, binder type, mortar apparent density and water absorption of the samples were tested.

2. Experimental

The basic ingredients of the mixtures were cement, hydrated lime, fly ash, perlite, crushed sand and water. The chemical composition and physical properties of cement, lime and fly ash are given in table 1.

Fly ash used in this study was supplied by Çayırhan Thermal Plant in Ankara, Turkey. This fly ash was from lignite coal combustion and contains a significant amount of CaO (table 1). Based on chemical composition this fly ash can be classified as class-C according to ASTM C 618. The total content of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ is 71.90%, which was a larger quantity than the min. value given by ASTM C 618 as the standard for a type C class fly ash (20).

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU, WAPNA I POPIOŁU LOTNEGO

THE CHEMICAL COMPOSITION AND PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT, LIME, AND FLY ASH

Constituent, %	Cement	Lime	Fly ash
SiO ₂	20.5	-	50.2
Al ₂ O ₃	4.65	-	12.7
Fe ₂ O ₃	3.4	-	9
CaO	62.73	88.59	12.53
Free CaO	1.09	-	-
MgO	1.02	1.2	4.33
SO ₃	2.21	1.3	0.39
Na ₂ O	0.18	-	2.75
K ₂ O	0.41	-	2.5
Cl	0.0084	-	-
Insoluble residue	0.6	-	-
Loss on ignition	2.15	6.1	0.54
Physical properties			
Specific gravity	3.12	2.4	2.04
Blaine, m ² /kg	351	-	212
Soudness, mm	2	-	-
Initial setting, min	153	-	-
Final setting, min	188	-	-
Fraction over 90 μ, %	0.2	-	-
Fraction over 45 μ, %	12.8	-	-
Compressive strength, MPa after 2 days	30.2	-	-
after 7 days	51.1	-	-
after 28 days	62,2	-	-

618. Sumaryczna zawartość SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃ wynosiła 71,90% i spełniała wymagania tej normy (20). Cement był cementem CEM I 42,5 R, zgodnym z normą TS EN 197-1 (21). Wapno hydratyzowane spełniało warunki normy TS EN 459-1 (22) i pochodziło bezpośrednio z fabryki. Stosowano wodę wodociągową.

Skład mieszanek, w % masowych, złożonych z cementu, wapna i popiołu lotnego podano w tablicy 2. W mieszanekach tych zmieniał się skład spoiwa, a był on dobrany w oparciu o wyniki wcześniejszych prac (10, 11, 23). W pierwszej serii zawartość cementu była stała i wynosiła 50%, natomiast wapno zastępowano rosnącym dodatkiem popiołu. W drugiej serii zawartość wapna była stała [50%], a cement zastępowano popiołem lotnym.

Chemiczne i fizyczne właściwości perlitu, który stanowił jeden ze składników kruszywa stosowanego w mieszanekach, podano w tablicy 3, a krzywą ziarnową pokazano na rysunku 1. Mieszanki zawierały także zmielony piasek (ciężar właściwy 2,62 g/cm³), którego krzywą ziarnową pokazano na rysunku 2 [stosowano sита według norm 24 i 25]. Krzywa ta jest zbliżona do krzywej uzyskanej metodą Fullera-Thompsona (26).

Tablica 2 / Table 2

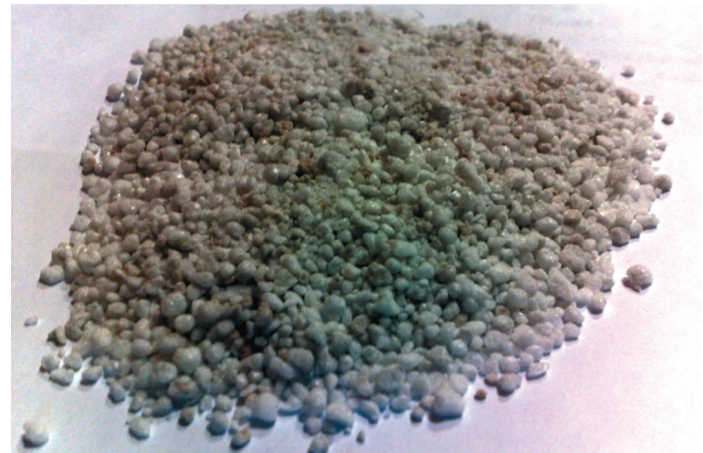
SKŁAD SPOIWA W % MASOWYCH

COMPOSITION OF BINDERS, % BY MASS

Mix. no.	cement	Lime	fly ash
CL50	50	50	-
CLF 40/10	50	40	10
CLF 30/20	50	30	20
CLF 20/30	50	20	30
CLF 10/40	50	10	40
CLF 0/50	50	-	50
CLF 50/10	40	50	10
CLF 50/20	30	50	20
CLF 50/30	20	50	30
CLF 50/40	10	50	40
LF 50/50	-	50	50

Cement used in this study was Portland cement CEM I 42.5 R according to TS EN 197-1 (21). Hydrated lime according to TS EN 459-1 (22) was obtained from the factory. Tap water was used for mortar samples production.

The mix proportions (% by mass) of cement, fly ash, and lime used for mortars production is given in table 2. The mixtures were composed of varying percentage of the cement, lime and fly ash as binder. Binders composition was chosen on the basis of previous works (10, 11, 23). Cement content was constant in first series, equal 50% and lime was replaced by fly ash. In the second series lime content was constant (50%) and cement was replaced by fly ash.



Rys. 1. Ekspandowany perlit stosowany w zaprawach

Fig 1. Expanded perlite used in mortars

Chemical and physical properties of perlite, which is one of the two aggregate ingredients used in the mixtures, is shown in table 3 and grain size curve on Fig 1. Mixtures contained also the ground sand (specific gravity: 2.62 g/cm³) which grain size curve is shown in Fig. 2 [sieves according to 24, 25]. Sand curve is similar to the curve plotted according to Fuller-Thompson method (26).

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD CHEMICZNY I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE PERLITU
CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE PEARLITE

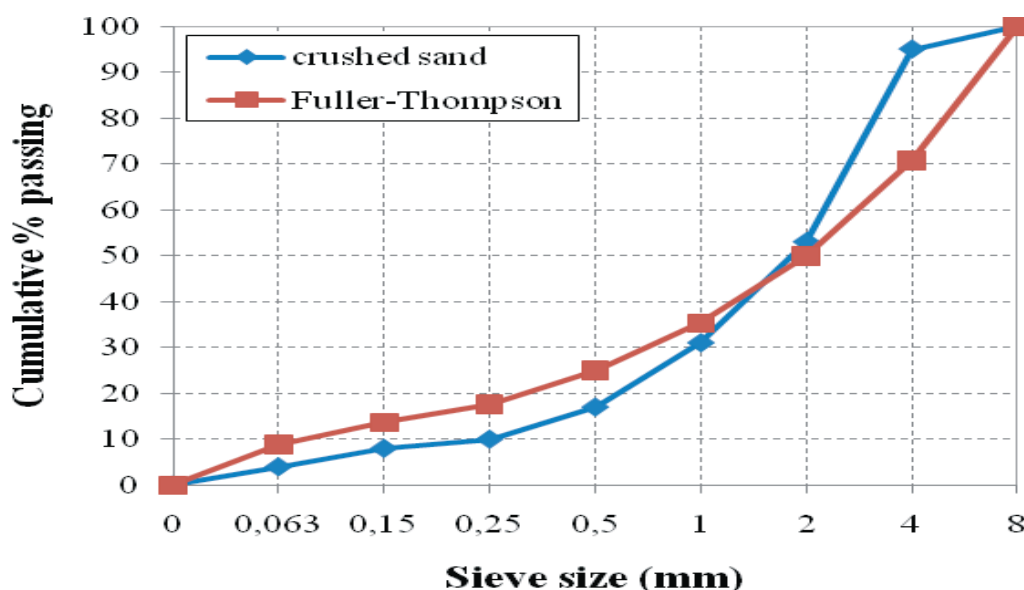
Oxide/Property	Content, %
SiO ₂	60-80
Al ₂ O ₃	12-16
Na ₂ O	3-10
K ₂ O	2-5
CaO	0-2
MgO	0-1
Fe ₂ O ₃	0-1
Particle size, mm	0-3 mm
Bulk density, g/cm ³	0.05-0.08
Natural moisture, Max. %	0.5
pH	6.5-8
Softening point, °C	890-1100
Melting point, °C	1280-1380

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANEK W g
MIX COMPOSITION IN g

Mix no.	Cement	Lime	Fly ash	Pearlite	Ground sand
CL50	150	150	-	21,8	877
CLF 40/10	150	120	30	21,7	875
CLF 30/20	150	90	60	21,7	874
CLF 20/30	150	60	90	21,6	872
CLF 10/40	150	30	120	21,6	870
CLF 0/50	150	-	150	21,6	869
CLF 50/10	120	150	30	21,6	871
CLF 50/20	90	150	60	21,5	866
CLF 50/30	60	150	90	21,4	861
CLF 50/40	30	150	120	21,2	856
LF 50/50	-	150	150	21,1	850

Cement, lime, fly ash and sand were thoroughly mixed in dry state. Weight of the total binder content in the mortar was 300 g and the amount of sand was 2.5 times greater than that of binder by mass



Rys. 2. Krzywa ziarnowa piasku i jej porównanie z krzywą Fullera – Thompsona

Fig 2. Grain size curve of the crushed sand and comparison with Fuller-Thompson curve

Cement, wapno i popiół lotny zmieszano starannie na sucho. Masa spoiwa w zaprawie wynosiła 300 g, a zawartość piasku była 2,5 razy większa od spoiwa [tablica 4]. Objętość piasku była taka sama jak objętość perlitu. Składniki mieszanki z dodatkiem wody uśredniano za pomocą mieszarki Hobarta przez 60 s (27). Zawartość wody [około 200 g] ustalano w oparciu o badania rozplywu, który wybrano na poziomie 110±5 mm (10, 28, 29). Dodatek ekspandowanego perlitu powiększał zapotrzebowanie na wodę mieszanki (19). Mieszankę formowano w formach o wymiarach 40x40x160 mm, a jedna warstwa w formie miała grubość około 50 mm. Próbkę prasowano w formach pod ciśnieniem 17 MPa, przez jedną minutę [rysunek 3] (27,30). Zaprawę wyjmowano z form po 1 dniu.

(Table 4). The volume of sand was equal to the pearlite volume. The ingredients of mortars, with addition of water, were homogenized in Hobart mixer for 60 s (27). The water content (about 200 g) was established for each mix, applying flow test (10, 28, 29). The flow table was used to adjust the flow within 110±5 mm. The expanded pearlite addition increases water demand (19). The mixes were cast in twelve-gang moulds of 40x40x160 mm.

The mortars were cast in steel moulds and one layer thickness of material was approximately 50 mm. The samples were compacted under pressure of 17 MPa for 1 min in the mould, as shown in Fig. 3 (27, 30). The mortar samples were demoulded after 1 day.

Dry density and water absorption of the mortars were measured according to ASTM C 67 (31). For all experiments twelve samples were produced and three of them were used for water absorption and density measurements. The next three served for strength determination and were cured in water at 20±2°C according to TS EN 12390-2 for 28 days (32). The last six samples were used for accelerated strength measurements and three were cured in water at 35±3°C according to TS 3323 and ASTM C 684-99 for 1 day (33-35). The last three were dried in oven at 110±5°C according to ASTM C 67 for 1 day.



Rys. 3. Prasowanie próbek w formach

Fig. 3. Compaction of samples in the moulds

Gęstość pozorna w stanie suchym oraz nasiąkliwość zapraw oznaczano zgodnie z normą ASTM C67 (31). Przygotowano 12 próbek do wykonania wszystkich pomiarów, a trzy z nich posłużyły do pomiarów nasiąkliwości i gęstości pozornej. Następne trzy użyto do oznaczenia wytrzymałości, przy czym dojrzewały one uprzednio w wodzie przez 28 dni w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ [TS EN 12390-2] (32). Ostatnie sześć próbek posłużyło do pomiaru wytrzymałości metodą przyspieszoną, po dojrzewaniu w wodzie w temperaturze $35 \pm 3^\circ\text{C}$, przez 1 dzień [normy TS 3323 i ASTM C 684-99] (33-35). Trzy z tych próbek suszono w temperaturze $110 \pm 5^\circ\text{C}$ przez 1 dzień zgodnie z normą ASTM C 67.

3.1. Gęstość pozorna i nasiąkliwość

Wyniki oznaczeń gęstości pozornej pokazano na rysunku 4. Uzyskane wartości mieściły się w przedziale $1,8 - 2 \text{ g/cm}^3$ i z reguły były większe od $1,9 \text{ g/cm}^3$, analogiczne do wyników innych autorów (36, 37). Pomimo że dodatek perlitu powoduje spadek gęstości zapraw, jednak wpływ ten został zmniejszony przez prasowanie próbek, co pociągnęło za sobą kruszenie cząstek perlitu w formie. Próbkę CL 50 zawierającą po 50% cementu i wapna miały nieco większą gęstość niż $1,9 \text{ g/cm}^3$. 10% dodatek popiołu do mieszanki spowodował wzrost gęstości pozornej do 2 g/cm^3 . Większy dodatek popiołu powodował zmniejszenie gęstości, jak to podano we wcześniejszych pracach (14, 16). Próbka CLF 0/50, w której popiół całkowicie zastąpił wapno, miała gęstość $1,8 \text{ g/cm}^3$, co było najmniejszym wynikiem. Próbka CLF 50/10, w której zawartość cementu w spoiwie była 40%, a wapna 50%, miała mniejszą gęstość niż próbka CLF 40/10, przy czym zawartość popiołu była w nich taka sama.

Próbki CLF 50/20 i CLF 50/30 miały mniejszą gęstość, zbliżoną do próbek CLF 30/20 and CLF 20/30.

Nasiąkliwość wodą próbek pokazano na rysunku 5. Wyniki leżą w zakresie 10-14%. Perlit zwiększa nasiąkliwość próbek, jednak wpływ ten uległ zmniejszeniu

3. Results and discussion

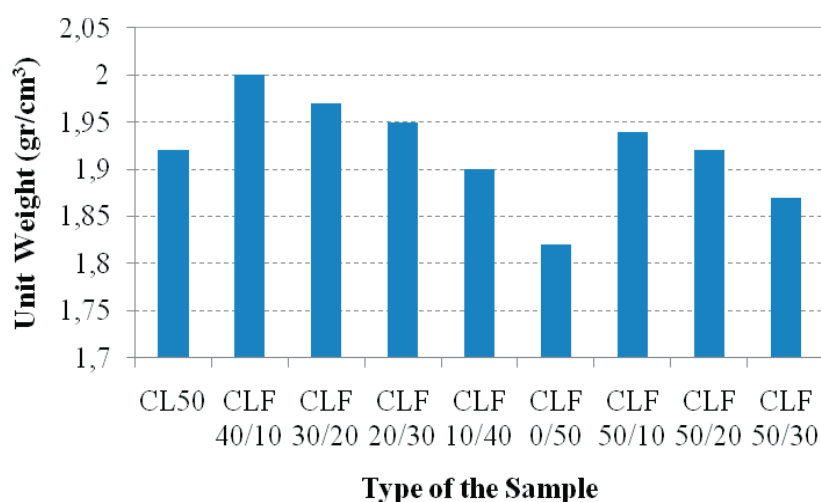
3.1. Aparent density and water absorption

The results of dry density measurements are shown in Fig. 4. The values were between $1.8-2 \text{ g/cm}^3$ and remained generally above 1.9 g/cm^3 , similarly to the results presented in other works (36, 37). Although perlite addition caused the decrease of the mortars density, this effect was reduced by the compacting of samples, which fractured perlite particles in the moulds. CL 50 specimens containing 50 % cement and 50 % lime gave slightly higher value than 1.9 g/cm^3 . 10 % of fly ash addition to the mixture caused the density increase to 2 g/cm^3 . Subsequent increase of fly ash addition led to a reduction of mortar density in accordance with works (14, 16). Sample CLF 0/50 with fly ash replacing totally lime had aparent density became about 1.8 g/cm^3 , which was the lowest value. When cement ratio was 40 % and lime 50% in the sample CLF 50/10 it had even lower density than CLF 40/10 in which the content of fly ash was the same. The samples CLF 50/20 and CLF 50/30 had lower aparent density, similar to CLF 30/20 and CLF 20/30.

Water absorption of samples is shown in Fig. 5. The results are between 10-14%. Perlite content in the samples increased water absorption, but this increase has been limited thanks to the samples compaction. As should be expected the water absorption is inversely proportional to the density i.e. water absorption increased with porosity. The properties of CLF 10/40 sample should be mentioned because of low density and low water absorption due to high fly ash content. Fly ash is reducing porosity of the mortar (10). Although density of CLF 20/30 sample was also relatively high, water absorption decreased up to 10%. High content of lime was increasing water absorption, while fly ash was reducing as it can be seen comparing the samples CL 50 vs. CLF 50/30.

3.2. Flexural strength

Flexural strength of mortars cured at different conditions are depicted in Fig. 6. It should be underlined that the samples dried in oven at 110°C with constant cement content of 50% and increasing



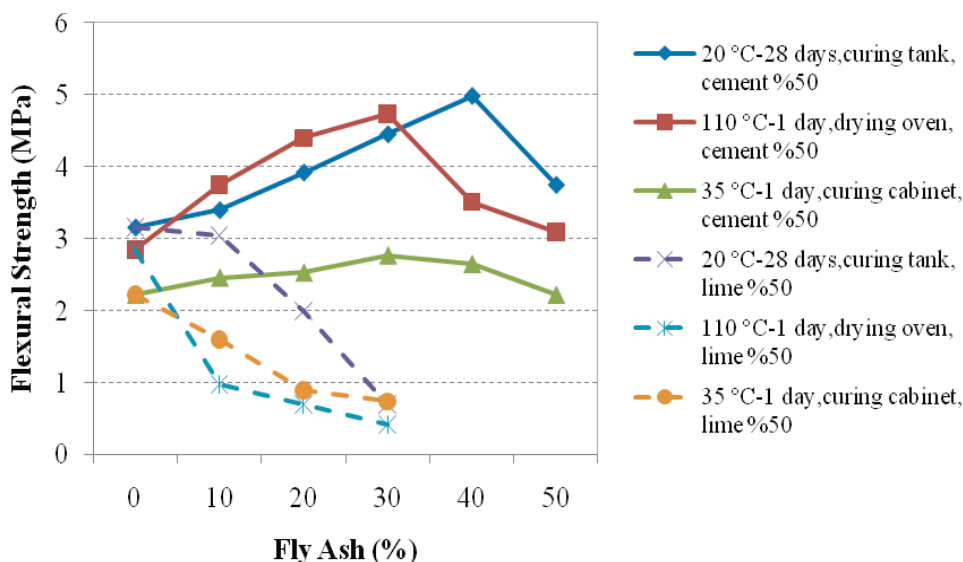
Rys. 4. Gęstość suchych zapraw

Fig. 4. Density of dry mortars

w wyniku prasowania próbek. Jak należało oczekiwać nasiąkliwość była odwrotnie proporcjonalna do gęstości pozornej i wzrastała ze zwiększeniem porowatości. Trzeba podać wynik uzyskany na próbce CLF 10/40, która miała małą gęstość i małą nasiąkliwość w związku z dużą zawartością popiołu. Popiół lotny zmniejsza porowatość zapraw (10). Pomimo, że gęstość pozorna próbki CLF 20/30 była stosunkowo dużą nasiąkliwość zmalała do 10%. Duża zawartość wapna zwiększała nasiąkliwość, podczas gdy popiół lotny zmniejszał ją jak to wynika z porównania właściwości próbek CL 50 i CLF 50/30.

3.2. Wytrzymałość na zginanie

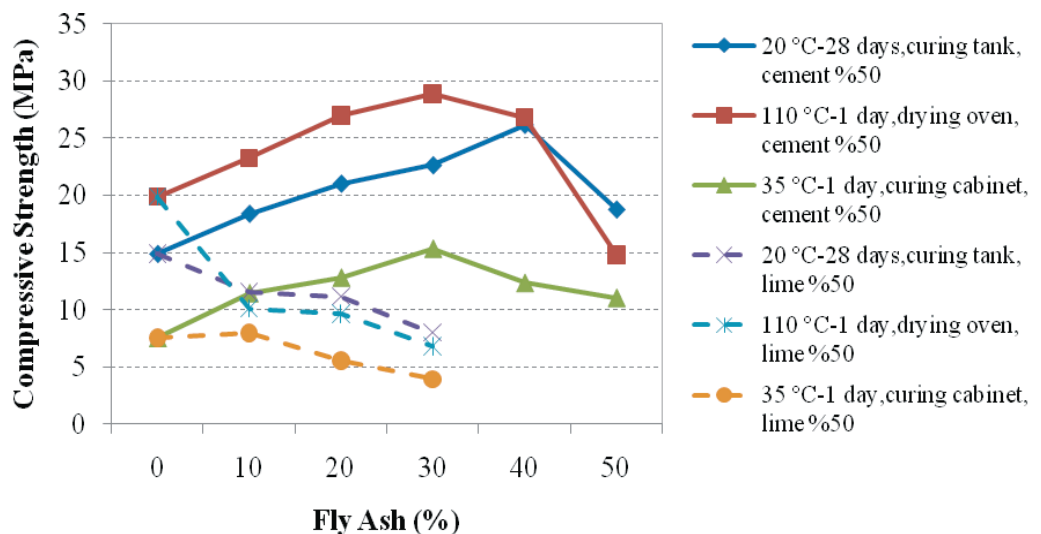
Wytrzymałość na zginanie zapraw dojrzewających w różnych warunkach pokazano na rysunku 6. Trzeba podkreślić, że próbki suszone w 110°C ze



Rys. 6. Wpływ zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość zapraw

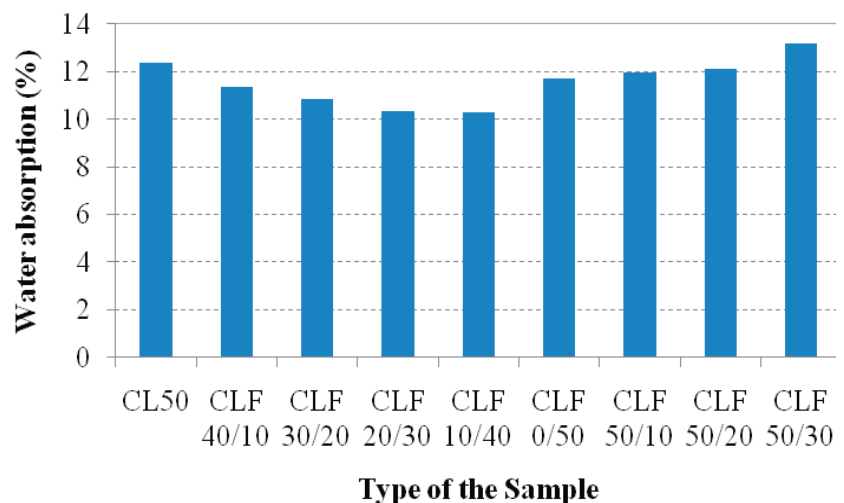
Fig. 6. Effect of fly ash content on flexural strength of mortars

stałą zawartością cementu równą 50% i rosnącym dodatkiem popiołu lotnego w zakresie od 10% do 30% dają lepsze wyniki niż po dojrzewaniu w wodzie przez 28 dni. Jest to być może wynik przyspieszonej reakcji puzolanicznej popiołu lotnego. Natomiast próbki dojrzewające w wodzie mają największą wytrzymałość na zginanie, w przypadku dużej zawartości popiołu. Właściwości zapraw z wapnem są odmienne od tych z cementem. Zaprawy z wapnem mają mniejszą sztywność i mogą neutralizować w pewnym zakresie ruchy konstrukcji mурowych (39-



Rys. 7. Wpływ zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość na ściskanie zapraw

Fig. 7. Effect of fly ash content on compressive strength of mortars



Rys. 5. Nasiąkliwość (% mas.) zapraw

Fig. 5. Water absorption (% by mass) of the mortars

from 10 % to 30% amount of fly ash gave better results than after water curing for 28 days. It is probably the effect of accelerated pozzolanic reaction of fly ash. However, the mixtures cured in water had the highest flexural strength with high fly ash addition. The mechanical behavior of lime is different from cement. Lime mortar is not rigid and can adapt movement in masonry structures (39, 40, 41). On the other hand, the strength of all samples with 50% lime addition is decreasing, probably because of increasing fly ash content on the expense of reduced cement ratio.

3.3. Compressive Strength

Measurements of mortars compressive strength cured in different conditions are

41). Jednak wytrzymałość wszystkich próbek z dodatkiem 50% wapna maleje, przypuszczalnie w wyniku malejącej zawartości cementu, a rosnącej popiołu.

3.3. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie próbek dojrzewających w różnych warunkach pokazano na rysunku 7. Wytrzymałości próbek suszonych w 110°C są większe od próbek dojrzewających w innych warunkach. W przypadku próbek z mniejszą od 50% zawartością cementu w spoiwie, dojrzewanie w wodzie przez 28 dni daje lepszy wynik niż metody przyspieszone. W związku z wolną reakcją popiołu lotnego z wapnem wpływ krótkiego dojrzewania nie daje tak dobrego wyniku jak dojrzewanie w wodzie przez 28 dni, co zapewnia lepszą wytrzymałość. Wytrzymałość na ściskanie próbek (CLF 40/10, 30/20 CLF, CLF 20/30), w których wapno zastępowano popiołem lotnym utrzymując stałą zawartość cementu w spoiwie wynoszącą 50%, wzrastała stopniowo osiągając maksimum, w przypadku wszystkich trzech warunków dojrzewania, gdy zawartość popiołu lotnego była w przedziale 20-40%. Próbki CLF 30/20, CLF 20/30 and CLF 10/40 osiągnęły wytrzymałość 25-30 MPa po suszeniu w 110°C. Próbki pozostałe miały wytrzymałość przekraczającą 3,9 MPa. Pomimo że dojrzewanie w 35°C nie dawało tak dobrych wyników jak przechowywanie próbek w innych warunkach, zapewniało jednak odpowiedni poziom wytrzymałości w zakresie 10-15 MPa w przypadku próbek zawierających 50% cementu i popiołu lotny. W przypadku oszacowania tych wyników, przy wzięciu pod uwagę wytrzymałość handlowych elementów, które w Turcji mają 1,5-2 MPa oraz wytrzymałość próbek osiąganą w różnych badaniach, wynoszącą 0,5 do 2,8 MPa (43) oraz podawaną w normach (44), to można stwierdzić, że wytrzymałość próbek uzyskanych w tej pracy jest zadowalająca.

4. Wnioski

Na podstawie wyników doświadczalnych uzyskanych w tej pracy można postawić następujące wnioski:

1. Stosowanie wapna i popiołu lotnego w zaprawach murowych daje dobre wyniki w zakresie urabialności, gęstości pozornej, nasiąkliwości i wytrzymałości.
2. Dodatek ekspandowanego perlitu powoduje spadek gęstości pozornej zapraw, jednak prasowanie próbek zmniejsza ten efekt. Pomimo, że ekspandowany perlit zmniejsza wytrzymałość zapraw wytworzone z jego dodatkiem próbki miały odpowiednie właściwości fizyczne. Natomiast perlit ma duży niekorzystny wpływ na urabialność mieszanki.
3. Zaprawy zawierające 50% cementu w spoiwie (CLF 30/20, CLF 20/30, CLF 10/40) wykazywały z reguły najlepsze właściwości.
4. Skład spoiwa ma decydujący wpływ na zapotrzebowanie na wodę mieszanek.
5. Prasowanie próbek zapewniało ich korzystną wytrzymałość.
6. Najkorzystniejszymi warunkami dojrzewania próbek było ich suszenie w 110°C. Pomimo, że właściwości zapraw były także

presented in Fig 7. The strength of samples dried in oven at 110 °C are higher than after other curing conditions. For the samples with less than 50% of cement, curing in water for 28 days was more effective than the rapid curing methods. Due to the slow reaction of fly ash and lime, the effect of short-term curing could not be effective as curing in water for 28 days and the long curing process provide better compressive strength. Compressive strength of samples (CLF 40/10, 30/20 CLF, CLF 20/30) in which lime was replaced by fly ash, keeping simultaneously 50% share of cement in the mortars, was gradually increasing and reached maximum value for all three curing conditions when fly ash content was in the range 20-40%. The samples CLF 30/20, CLF 20/30 and CLF 10/40 achieved the strength in the range of 25-30 MPa after oven curing at 110°C. Compressive strength of all samples was over 3.90 MPa. Even if curing condition at 35°C was not so effective as the other conditions, it provided an adequate level of strength between 10-15 MPa for samples including these containing 50% of cement and fly ash. If an assessment is made taking into account both the strength of the masonry blocks in market conditions in Turkey which generally are from 1.5 to 2 MPa, and the strength in the range between 0.5 to 2.8 MPa reached in scientific papers(43) as well as those listed in standards (44), one can say that all produced in this work samples have adequate compressive strength.

4. Conclusions

On the basis of experimental results obtained in this study the following conclusions can be drawn :

1. The use of lime and fly ash in the mortars is providing positive results in terms of workability, density, water absorption and strength.
2. Expanded perlite addition is causing decrease of mortars aparent density, however, the compacting is decreasing this effect. Although expanded perlite has a tendency to reduce the strength of mortars, produced samples had adequate physical properties. Pearlite significantly affects the workability of mortars.
3. The mortars containing 50% by mass of cement (CLF 30/20, CLF 20/30, CLF 10/40) were showing generally the highest properties.
4. Binders composition had the decisive influence on water demand.
5. Compacting of the samples asured proper mechanical properties.
6. The best curing condition in terms of mortars performance was oven drying at 110°C. Although the properties after 28 days were also good for other curing conditions drying in oven were preferable as the production time is regarded.

dobrze po dojrzewaniu w wodzie przez 28 dni to jednak, z uwagi na czas produkcji zapraw suszenie było korzystniejsze.

Literatura / References

1. S.A., Alberto, H.O., Francisco, "Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry", *Cement and Concrete Research*, Vol. **40**, Number 1, pp. 66–76, (2010).
2. C. Beall, "Masonry design and detailing for architects and contractors", 5. Edition, 640 p., McGraw-Hill Professional, New York, USA, (2004).
3. A.B., Abell, J.M., Nichols, "Investigation of the rheology and micro-structure of hydrated lime and sand for mortars", (2002). In: D. Throop and R.E. Klinger, Editors, *Proceedings of Masonry: Opportunities for the 21st century*, Tenth Symposium, Salt Lake City, UT, 25 June 2002, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken: ASTM International.
4. HFW, Taylor, "Cement Chemistry", Tomas Telford Services, London, UK, 2nd edition, 1998.
5. A.L.A, Fraay, J.M., Bijen, Y.M., De Haan, "The reaction of fly ash in concrete a critical examination", *Cement and Concrete Research*, Vol. **19**, Number 2, pp. 235-246, (1989).
6. M., Ghrici, S., Kenai, E., Meziane, "Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana", *J Mater Sci*, Vol. **41**, pp. 6965–6972, (2006).
7. K., Koseoglu, M., Polat, H., Polat, "Encapsulating fly ash and acidic process waste water in brick structure", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. **176**, Number 1-3, pp. 957–964, (2010).
8. A., Baba, A., Kaya, "Leaching characteristics of fly ash from thermal power plants of Soma and Tuncbilek, Turkey", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. **91**, Number 1-3, pp. 171-181, (2004).
9. N., Değirmenci, "Usage at adobe stabilization of industrial wastes", *GU Journal of Science*, Vol. **18**, Number 3, pp. 505-515, (2005).
10. N., Değirmenci, "Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products", *Construction and Building Materials*, Vol. **22**, Number 8, pp. 1857–1862, (2008).
11. N., Değirmenci, "Effect to compression strength of Phosphogypsum-Fly ash mixture of Phosphogypsum calcination", *Technical Journal*, Number 4, pp. 610-618, (2008b).
12. S., Kumar, "Fly Ash-Lime-Phosphogypsum Cementitious Binder: A New Trend in Bricks", *Materials and Structures*, Vol. **33**, Number 225, pp. 59-64, (2000).
13. S., Kumar, "Utilisation of FaL-G Bricks and Hollow Blocks in Buildings", *Indian Concrete Journal*, Vol. **75**, Number July 2001, pp. 463-467, (2001).
14. G., Cultrone, E., Sebastián, "Fly Ash Addition in Clayey Materials to Improve the Quality of Solid Bricks", *Construction and Building Materials*, Vol. **23**, pp. 1178-1184, (2009).
15. P., Chindaprasirt, K., Pimraksa, "A study of fly ash–lime granule unfired brick", *Powder Technology*, Vol. **182**, Number 1, pp. 33-41, (2008).
16. E., Kiraz, "Utilization of pozzolanic materials in lightweight wall material production", Kocaeli University, Institute of Natural and Applied Sciences, Master thesis, Kocaeli, 74 p., 2010.
17. J. Silva, J. Brito, R., Veiga, "Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars", *Materials and Structures*, Vol. **41**, Number 8, pp. 1333-1344, (2008).
18. I. B., Topçu, B., Işıklıdağ, "Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite", *Building and Environment*, Vol. **42**, Number 10, pp. 3540–3546, (2007).
19. M., Lanzo'n, P.A., Garcí'a-Ruiz, "Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability", *Construction and Building Materials*, Vol. **22**, Number 8, pp. 1798-1806, (2008).
20. ASTM C 618, "Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2005.
21. TS EN 197-1, "Cement- Part 1: Compositions and conformity criteria for common cements", Ankara, Turkey, 2002 (in Turkish).
22. TS EN 459-1, "Building lime – Part 1 : Definitions, specifications and conformity criteria", Ankara, Turkey, 2005 (in Turkish).
23. T., Çiçek, M., Tanrıverdi, "Lime Based Steam Autoclaved Fly Ash Bricks", *Construction and Building Materials*, Vol. **21**, Number 6, pp. 1295-1300, (2007).
24. TS 706 EN 12620, "Aggregates for concrete", Ankara, Turkey, 2009 (in Turkish).
25. TS 802, "Design Concrete Mixes", Ankara, Turkey, 2009 (in Turkish).
26. W, Fuller, S.E., Thompson, "The laws of proportioning concrete", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Number 1053, pp. 67-143, (1907).
27. H.M., Algin, P., Turgut, "Cotton and limestone powder wastes as brick material", *Construction and Building Materials*, Vol. **22**, Number 8, pp. 1074-1080, (2008).
28. ASTM C 230 /230M-98, "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA, 1998.
29. ASTM C 1437, "Standard test method for flow of hydraulic cement mortar", Annual Book of ASTM Standards, vol. 04-01. West Conshohocken, PA, USA, (2006).
30. P., Turgut, E. S., Yahlizade, "Research into Concrete Blocks with Waste Glass" *International Journal of Environmental Science and Engineering*, Vol. **1**, Number 4, pp. 202–208, (2009).
31. ASTM C 67, "Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 2008.
32. TS EN 12390-2, "Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests", Ankara, Turkey, 2010 (in Turkish).
33. TS 3323, "The method of Making Accelerated Curing and Testing of Concrete Compression Test Specimens", Ankara, Turkey, 1979 (in Turkish).
34. ASTM C 684-99, "Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens", West Conshohocken, PA, USA, 2003.
35. Ş., Kurbetçi, E., Öztekin, "Estimation of Compressive Strength of Concrete Using the Modified Warm Water Method", *Technical Journal*, Vol. **15**, Number 1, pp. 3145-3153, (2004) (in Turkish).
36. I. B., Topçu, B., Işıklıdağ, "Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete", *Journal of materials processing technology*, Vol. **204**, Number 1-3, pp. 34-38, (2008).
37. A., Ahmad, Energy simulation for a typical house built with different types of masonry building materials, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. **29**, Number 2B, pp. 113-126, (2004).

38. W., Ma, P.W., Brown, "Hydrothermal reactions of fly ash with Ca(OH)_2 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, Number 8, pp. 1237-1248, (1997).
39. B.T., Rosson, K., Soyland, T.E., Boothby, "Inelastic behavior of sand-lime mortar joint masonry arches". *Eng. Struct.*, **20**, Number 1-2, pp. 14-24, (1998).
40. J., Lanas, J.I., Álvarez-Galindo, "*Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Number 11, pp. 1867-1876, (2003).
41. A.W., Hendry, "*Masonry walls: materials and construction*", *Construction and Building Materials*, Vol. 15, Number 8, pp. 323-330, (2001).
42. M., Tokyay, B., Çetin, "Strength and water absorption properties of fly ash-lime bricks pressed and applied to steam curing", *Technical Journal*, Number 28, pp. 385-394, (1991) (in Turkish).
43. H. Binici, O., Aksogan, T., Shah, "*Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material*", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, Number 4, pp. 313-318, (2005).
44. BS 6073. "Part 1: precast concrete masonry units, specification for precast concrete masonry units". British Standards Institution, 1981.

Erratum

In the paper of Mr Brandt "Application of concrete as a material for anti-radiation shielding – a review" which appeared in second issue in 2013 was the erroneous Table 3. Table 3 should be:

Table 3

LINEAR ATTENUATION COEFFICIENT, HVL AND TVL¹ FOR CONCRETE SAMPLES WITH DIFFERENT AGGREGATES, APPLICATION OF Co-60 GAMMA RAYS, AFTER KHARITA (2008)

Aggregate	Linear attenuation coefficient, cm^{-1}	HVL cm	TVL cm
natural river, washed a. cleaned	0.133	5.21	17.31
hematite	0.160	4.33	14.39
hematite + black coastal sand	0.155	4.47	14.86
dolomite	0.144	4.81	15.99
serpentine	0.124	5.59	18.57
serpentine + black coastal sand	0.131	5.29	17.58

¹ HVL and TVL: thickness which gives half and tenth of the intensity, respectively

The Editor is apologizing very much to Prof. Brandt for this mistake.