

## Wytwarzanie przyjaznej dla środowiska, wysokowytrzymałej zaprawy naprawczej do renowacji obiektów zabytkowych

## Production of environmentally-friendly, high-strength repair mortar for the restoration of historical buildings

Can Tombulca<sup>1</sup>, Murat Çavuş<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Civil Engineering, 60000, Tokat, Turkey

\*Corresponding author: M. Çavuş, [murat.cavus@gop.edu.tr](mailto:murat.cavus@gop.edu.tr)

### Streszczenie

W pracy badano zaprawy naprawcze ze sztucznymi i naturalnymi dodatkami pucolanowymi do renowacji obiektów zabytkowych. Do zapraw wapiennych wprowadzono sztuczną pucolanę - popiół lotny wapienny klasy C oraz pucolanę naturalną w postaci zeolitu. Do przygotowania zapraw wykorzystano dwa różne rodzaje kruszyw: naturalny piasek rzeczny i cegłę łamaną. Łącznie wyprodukowano 18 zapraw, z czego dwie były zaprawami odniesienia. W pierwszej grupie zapraw badano popiół lotny będący główną pucolaną, w zaprawach z obu rodzajami kruszywa przy 20%, 40% i 60% zastąpieniu wapna popiołem. W drugiej serii zapraw jako zamiennika wapna zastosowano popiół lotny i zeolit w różnych proporcjach. W zaprawie odniesienia zastosowano samo wapno powietrzne. Po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania zapraw oznaczono właściwości mechaniczne, fizyczne i skład fazowy. Porównując zaprawy z dodatkiem pucolany z zaprawami odniesienia, zauważono, że pucolany zapewniają znaczną poprawę właściwości fizycznych i mechanicznych zapraw naprawczych. O ile zaobserwowano znaczną poprawę właściwości fizycznych zapraw, w których jako jedyną pucolanę zastosowano popiół lotny, to właściwości mechaniczne były lepsze w zaprawach z zeolitem.

**Słowa kluczowe:** zaprawa wapienna, popiół lotny, zeolit, cegła łamana, porowatość, kapilarna absorpcja wody

### Summary

In this study, repair mortars with artificial and natural pozzolan additives were produced for the restoration of historical buildings. Class C fly ash, an artificial pozzolan and zeolite the natural pozzolan, were substituted into these lime-based mortars. Two different aggregate types were used in the preparation of the mortars: natural river sand and crushed brick. A total of 18 batches of mortars were produced, two of which were reference batches. In the first group of batches, fly ash, which is the major pozzolan, was tested in both aggregate groups in 20%, 40%, and 60% ratios of lime substitution. In the second group of batches, fly ash and zeolite were used in different proportions as lime substitution. In the reference series, air lime was used alone. At the end of the 28, 56, and 90 days curing period, mechanical, physical properties, and phase composition of the mortars were determined. When the pozzolan-added mortars were compared with the reference mortars, it was observed that pozzolans provided significant improvements in the physical and mechanical properties of the repair mortars. While significant improvements were observed in the physical properties of the mortars where fly ash was used as the only pozzolan, mechanical properties were better in the mortars with zeolite.

**Keywords:** lime mortar, fly ash, zeolite, crushed brick, porosity, capillary water absorption

### 1. Wprowadzenie

Do połowy XIX wieku zaprawy wapienne były stosowane w wielu częściach świata jako główny materiał konstrukcyjny we wszelkiego rodzaju pracach budowlanych (1,2). Jednakże od końca tego wieku cement portlandzki znacznie zyskał na popularności, co ograniczyło wykorzystanie wapna w budownictwie (3). Głównym powodem, dla którego zaprawy produkowane z cementu port-

### 1. Introduction

Until the middle of the 19th century, lime mortars were used in many parts of the world as the main construction material in all kinds of construction works (1,2) However, since the end of this century, hydraulic-based Portland cement has greatly limited the use of lime in building construction (3). The main reason for mortars produced with Portland cement being more desirable is their

landzkiego są bardziej pożądane, jest ich lepsza wytrzymałość w porównaniu z zaprawami wapiennymi. Na początku XX wieku zaczęto stosować cement do renowacji obiektów zabytkowych oraz w budownictwie. Jednakże od połowy tego stulecia stwierdzono, że wykorzystanie cementu do renowacji obiektów zabytkowych powoduje niszczenie cegieł, kamieni i oryginalnych zapraw tworzących budynek (4). Zniszczenie tych materiałów następuje w wyniku przenikania soli naturalnie występujących w cemencie z biegiem czasu do kamieni i cegieł (5). Z tego powodu od połowy XX wieku zastosowanie cementu w renowacji obiektów zabytkowych zostało ograniczone (6,7).

Specjaliści w swoich badaniach budynków historycznych odkryli, że składniki tworzące zaprawy wapienne wykazują dużą różnorodność (8-11). Na podstawie tych badań zauważono, że zaprawy te powstają w wyniku połączenia różnych materiałów w zależności od możliwości danego okresu historycznego, regionalnych i technicznych. Różnorodność ta jest najbardziej widoczna w materiałach stosowanych jako spoiwa. W części z tych zapraw zastosowano materiały organiczne (12-15), w innych dodano naturalne lub sztuczne pucolany, zawierające wapno w celu uzyskania zaprawy hydraulicznej (16-17). W niektórych zastosowaniach właściwości hydrauliczne zapewniała wypalona glina stosowana jako kruszywo w zaprawach (18-20).

Chociaż wapno powietrzne nie ma swoich właściwości hydraulicznych, można je uzupełnić przez zmieszanie wapna z pucolanami. Termin pucolana jest używana do opisu dowolnego materiału zawierającego krzemionkę i/lub tlenek glinu, które reagują z wodortlenkiem wapnia, tworząc związki hydrauliczne podobne do tych występujących w naturalnym wapnie hydraulicznym (21). Wiadomo, że zaprawy wapienne z domieszką pucolan stosowano już w czasach rzymskich. Choć właściwości i ilości pucolan stosowanych w zabytkowych zaprawach budowlanych różnią się, podobne materiały pucolanowe zastosowano w większości konstrukcji, które przetrwały do dziś. Stwierdzono, że jako kruszywo pucolanowe stosowano kruszywo z cegły wypalane w stosunkowo niskich temperaturach, zwłaszcza w zaprawach powszechnie znanych jako zaprawy rzymskie (2,22) lub zaprawy chorasańskie odpowiednio w czasach seldżuckich i osmańskich (23).

Celem pracy jest opracowanie alternatywnej zaprawy naprawczej do zastosowania przy renowacji obiektów zabytkowych z wykorzystaniem różnych pucolan. Główną motywacją do przeprowadzenia badań był brak możliwości pozyskania wapna hydraulicznego w Anatolii, która posiada dużą liczbę obiektów zabytkowych. Drugą motywacją było wykorzystanie odpadów przemysłowych i rozebranych budynków bez powodowania problemów dla środowiska. W tym celu wyprodukowano zaprawy wykorzystujące matryce z podwójnym i potrójnym spoiwem - popiół lotny wapienny i/lub zeolit popiołowo-wapienny, w połączeniu z kruszywem ceglanym i/lub piaskowo-odpadowem. Zbadano krótko- i długoterminowe właściwości mechaniczne, fizyczne i skład fazowy zapraw wytwarzanych przy użyciu różnych receptur.

higher strength properties in comparison to lime mortars. At the beginning of the 20th century, cement started to be used in the restoration of historical buildings as well as in building construction. However, since the middle of this century, it has been determined that the utilization of cement in the restoration of historical buildings causes bricks, stones, and original mortars forming the building to deteriorate (4). The deterioration of these materials happens as a result of salts naturally existing in cement penetrating into the stones and bricks over time (5). For this reason, since the middle of the 20th century, the use of cement in historical building restoration has been limited (6,7).

Examiners, in their studies on historical buildings, found that the components that make up lime-based mortars show a great variety (8-11). According to these studies, it has been observed that these mortars are formed by a combination of different materials in relation to periodic, regional, and technical possibilities. This diversity is most evident in materials used as binders. In some of these mortars, organic materials (12-15) were used, while in others, natural or artificial pozzolans were blended with lime to produce hydraulic mortar (16-17). In some applications, the hydraulic property was provided by fired clay powder used as aggregate in mortars (18-20).

While air limes do not intrinsically have hydraulic properties, it is possible to make them hydraulic by blending them with pozzolans. The term pozzolan is used to describe any material containing silica and/or aluminum that reacts with air lime to form hydraulic compounds similar to those found in natural hydraulic limes (21). It is known that lime mortars blended with pozzolans have been used since the Roman period. Although the properties and quantities of pozzolans used in historical building mortars differ, similar pozzolanic materials have been used in most of the structures that have survived to this day. It has been determined that crushed brick fired at relatively low temperatures was used as pozzolanic aggregate, especially in mortars commonly known as Roman mortars (2,22) or Khorasan mortars in Seljuk and Ottoman times respectively (23).

The purpose of this study is to develop an alternative repair mortar to be used in the restoration of historic buildings by using different pozzolans. The main motivation for this study was the inability to obtain hydraulic lime in Anatolia, which has a large number of historic buildings. The second motivation was the use of industrial and demolished building waste without causing environmental problems. For this purpose, mortars were produced using double and triple binder matrices (lime-fly ash and/or lime-fly ash-zeolite) in combination with sand only and/or sand-waste brick crumb matrices. The short and long term mechanical, physical and mineralogical properties of these mortars produced with different formulations were investigated.

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI*	Aktywność pucolanowa Pozzolanic activity	
									CS**	FS***
% masowy / % by mass									MPa	
Lime	2.79	0.26	0.13	2.65	85.76	-	3.55	3.21	-	-
Fly Ash	37.29	15.56	4.83	3.63	28.90	0.84	6.63	2.75	9.43	2.15
Zeolite	73.53	12.54	1.45	0.82	2.85	2.7	3.25	3.51	12.45	2.87
LOI*: Straty prażenia / Loss on ignition, **CS: Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, ***FS: Wytrzymałość na zginanie / Flexural strength										

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Materiały

Do produkcji zapraw naprawczych stosowano dwa rodzaje kruszywa. Pierwszy rodzaj składał się z naturalnego piasku rzecznoego, natomiast drugi z łamanych cegieł zastępujących naturalny piasek rzeczny w proporcji 1:3. Naturalny piasek rzeczny wykorzystany w badaniach pochodził z rzeki Yeşilirmak, natomiast kruszywo ceglano łamane uzyskano poprzez kruszenie odpadów ceglanych zebranych z cegielni działających w rejonie Erbaa. Przy produkcji zapraw wielkość i gradację kruszywa prowadzono zgodnie z literaturą. W związku z tym wybrany maksymalny rozmiar ziarna wynosił 3 mm. Wapno powietrzne stosowane jako spoiwo w produkcji zapraw jest powszechnie dostępnym wapnem CL80-S i produkowane jest zgodnie z normą EN 459-1 (24). Zeolit uzyskany z regionu Gördes ma gęstość 2,03 g/cm<sup>3</sup> i powierzchnię właściwą 9,66 m<sup>2</sup>/g. Z elektrociepłowni Sivas Kangal otrzymano popiół lotny wapienny [klasy C] o gęstości 2,72 g/cm<sup>3</sup> i powierzchni właściwej 3,15 m<sup>2</sup>/g. Skład chemiczny wapna i pucolan oznaczono metodą spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej i podano w tablicy 1.

Popiół lotny i zeolit stosowane do produkcji zapraw zostały w pierwszej kolejności poddane badaniu aktywności pucolanowej według normy TS 25 (25). Na podstawie wyników badania aktywności pucolanowej podanych w tablicy 1 stwierdzono, że popiół i zeolit uzyskały wartości przekraczające wartości graniczne 1 MPa dla wytrzymałości na zginanie i 4 MPa dla wytrzymałości na ściskanie wymagane w odpowiednich normach i odpowiednio materiały te charakteryzują się dobrymi właściwościami pucolanowymi.

### 2.2. Metody badań

W zaprawach produkowanych do renowacji obiektów zabytkowych stosowane są różne proporcje kruszywa do spoiwa (26-29). Wskaźniki te zostały wyznaczone głównie w wyniku analiz przeprowadzonych na oryginalnych próbkach zapraw pobranych z różnych obiektów zabytkowych. Do produkcji zapraw stosowanych w badaniach przyjęto stosunek spoiwa do kruszywa wynoszący 1:2. W celu określenia ilości wody wymaganej do zapraw przeprowadzono badanie rozplywu na stoliku zgodnie z normą EN 1015-3 (30). Zmierzono średnicę rozplywu zapraw w dwóch kierunkach

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials

Two types of aggregate were used in the production of repair mortar mixes. The first type consisted of natural river sand, while the second was composed of crushed bricks substituting natural river sand in a ratio of 1:3. The natural river sand used in this study was taken from Yeşilirmak River, while the crushed brick aggregate was obtained by crushing brick waste collected from brick factories operating in the Erbaa region. In the production of mortars, aggregate size and gradation were carried out according to the literature. Consequently, the maximum grain size selected was 3 mm. Air lime used as a binder in mortar production is a widely available CL80-S lime and is produced according to EN 459-1 standard (24). The zeolite obtained from the Gördes region has a density of 2.03 g/cm<sup>3</sup> and a surface area of 9.66 m<sup>2</sup>/g. Class C FA with a density of 2.72 g/cm<sup>3</sup> and a surface area of 3.15 m<sup>2</sup>/g was obtained from the Sivas Kangal thermal power plant. The chemical contents (main oxides) of lime and pozzolans were determined by the X-ray fluorescence (XRF) method and are given in Table 1.

The FA and zeolite used in the production of mortars were first subjected to a pozzolanic activity test according to TS 25 standard (25). According to the results of the pozzolanic activity test given in Table 1, it has been determined that FA and zeolite have values that are above the limit values of 1 MPa for flexural strength and 4 MPa for compressive strength required in the relevant standards, and accordingly, the materials have high pozzolanic properties.

### 2.2. Methods

Different binder aggregate ratios are used in mortars produced for the restoration of historic buildings (26-29). These ratios were mainly determined as a result of the analysis carried out on original mortar samples taken from different historical buildings. The ratio of binder to aggregate of 1:2 was chosen in the production of mortars used in this study. To determine the amount of water required for mortars, a flow table test has been carried out according to EN 1015-3 (30). The spread diameter of the mortars was measured in two directions and its arithmetic mean was obtained. This value was kept at the level of 165 ± 5 mm [Table 2].

Tablica 2 / Table 2

## SKŁADY MIESZANEK

## MORTAR MIX PROPORTIONS

Oznaczenie próbki Sample Identification	Popiół lotny Fly ash	Zeolit / Zeolite	Wapno / Lime	Naturalny piasek rzeczny Natural river sand	Kruszone cegły Crushed brick	Konsystencja Consistency
	g					mm
REF_S	-	-	500	1000	-	165±2
REF_SB	-	-	500	666	334	161±3
F20_S	100	-	400	1000	-	163±1
F40_S	200	-	300	1000	-	167±2
F60_S	300	-	200	1000	-	164±2
F20_SB	100	-	400	666	334	161±3
F40_SB	200	-	300	666	334	159±1
F60_SB	300	-	200	666	334	160±1
F50Z10_S	250	50	200	1000	-	161±2
F40Z20_S	200	100	200	1000	-	167±1
F30Z30_S	150	150	200	1000	-	163±3
F20Z40_S	100	200	200	1000	-	159±2
F10Z50_S	50	250	200	1000	-	161±3
F50Z10_SB	250	50	200	666	334	163±2
F40Z20_SB	200	100	200	666	334	158±4
F30Z30_SB	150	150	200	666	334	162±2
F20Z40_SB	100	200	200	666	334	160±3
F10Z50_SB	50	250	200	666	334	156±4

REF: Zaprawa odniesienia / Reference

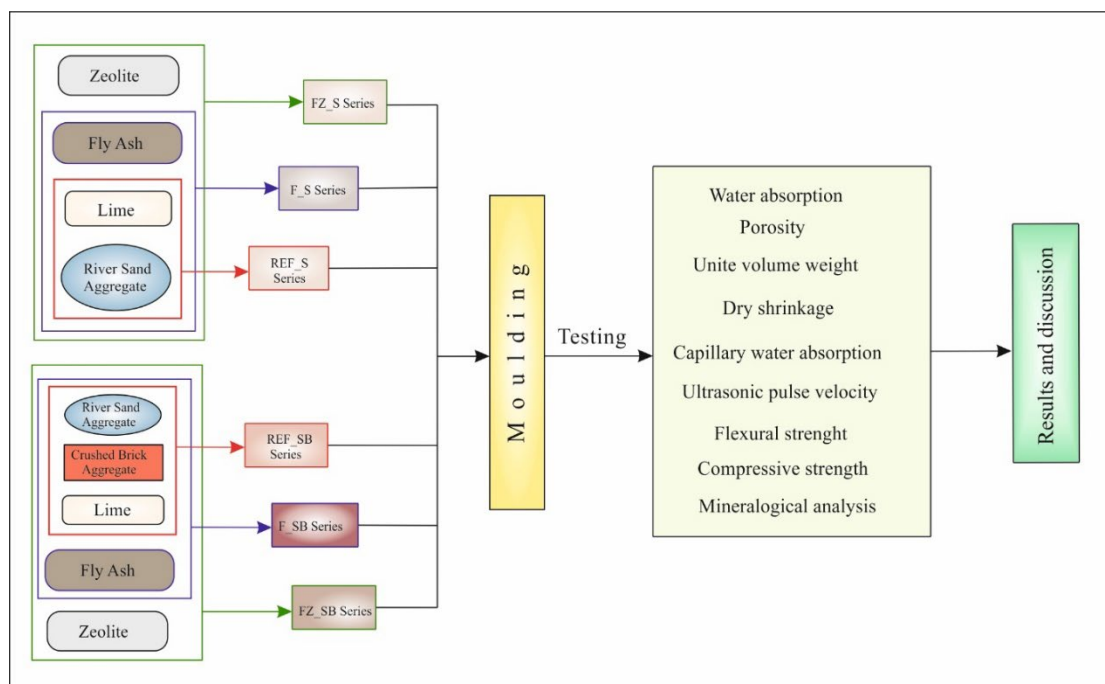
i obliczono średnią arytmetyczną. Wartość tę utrzymywano na poziomie  $165 \pm 5$  mm [tablica 2].

W niniejszych doświadczeniach wyprodukowano ogółem 18 zapraw, z czego 2 to zaprawy odniesienia. We wstępnych badaniach stwierdzono, że jeśli zawartość popiołu lotnego w zaprawie naprawczej przekracza 60%, powoduje to utratę wytrzymałości. Z tego powodu całkowity współczynnik zastąpienia wapna przez pucolane we wszystkich seriach utrzymywano na stałym poziomie. W badaniach uzyskano dwa rodzaje zapraw. Pierwsza składała się z samego popiołu lotnego, podczas gdy druga zawierała popiół zmieszany z zeolitem. Kody mieszanek podano w tablicy 2, przy czym wybraną identyfikację oparto na rodzaju użytej pucolany, czy użyto kruszywo ceglane łamane, a także stosunku pucolany do całkowitej masy spoiwa w mieszance.

Serię zapraw naprawczych przygotowano w laboratorium zgodnie z normą EN 196-1 i zaformowano w stalowych formach o wymiarach 40x40x160 mm (31). Na rys. 1 przedstawiono schemat projektowania mieszaniny oraz metody badań próbek zapraw. Zaprawy przechowywano w formach w laboratorium w temperaturze  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  przez 24 godziny. Po upływie tego okresu wyjmowano je z form i dojrzewały w atmosferze o wilgotności względnej 80-85% aż do dnia badania. Wykonano badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie (32), nasiąkliwości, porowatości, gęstości (33), zmiany długości i kapilarnej absorpcji wody (34) w 28, 56 i 90 dniu. Oprócz

In this study, a total of 18 series of mortars, 2 series of which are references, were produced. In preliminary tests, it has been observed that if the FA in the repair mortar exceeds 60%, it causes strength loss. For this reason, the total pozzolan substitution ratio in all series was kept constant at this value. In the study, two types of mortar series were produced. The first consisted of FA alone, while the other consisted of FA blended with zeolite. The codes of the mixes were given in Table 2, the identification chosen was based on the type of pozzolan used and whether or not crushed brick aggregate was used, as well as the ratio of pozzolan to the total binder by the mass in the mixture.

Repair mortar series were prepared in the laboratory in accordance to EN 196-1 and cast in 40x40x160 mm steel molds (31). Fig. 1 shows the mixture design procedure and experimental flowchart of mortar samples. The mortars in the mold were kept at  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  in the laboratory for 24 hours. At the end of this period, they were removed from the molds and cured at 80-85% relative humidity until the day of testing. Flexural strength and compressive strength tests (32), water absorption, porosity, unit volume weight (33), length change and capillary water absorption (34) tests were performed on the produced mortars at 28th, 56th and 90th days. In addition to these, at the end of the 90-days curing period, XRD analysis was performed and the phase composition of the mortars were examined.



Rys. 1. Schemat projektowania mieszanin i metody badań próbek zapraw

Fig. 1. The mixture design procedure and experimental flowchart of mortar samples

tego, po 90-dniowym okresie twardnienia, przeprowadzono analizę składu fazowego metodą dyfrakcji rentgenowskiej.

### 3. Wyniki

#### 3.1. Nasiąkliwość

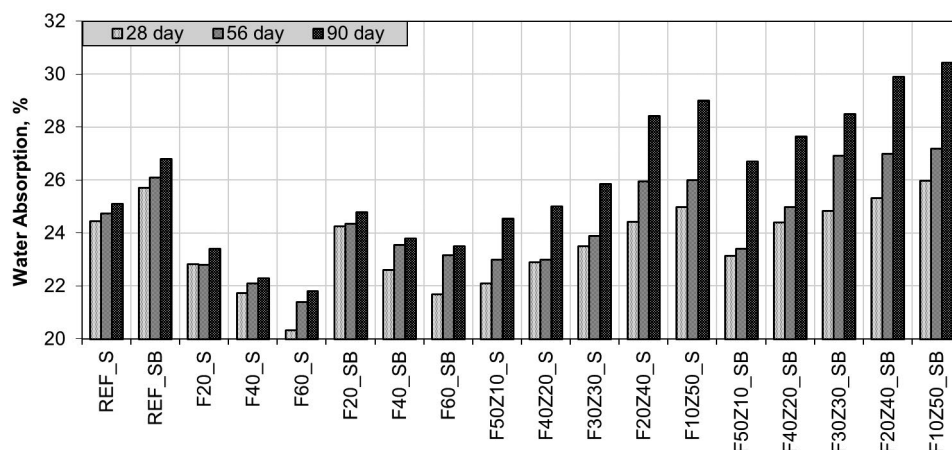
Wyniki badań absorpcji wody przygotowanych zapraw po 28, 56 i 90 dniach przedstawiono na rys. 2. Wyniki oceniano ze względu na czas twardnienia, rodzaj pucolanu i współczynniki wykorzystania pucolanu oraz rodzaj użytego kruszywa. W zależności od czasu twardnienia, wagowa absorpcja wody dla wszystkich serii wynosiła 20,1-24,8% w 28 dniu, 21,1-26,9% w 56 dniu i 21,8-31,4% w 90 dniu. Zgodnie z tymi wynikami jest oczywiste, że wraz ze wzrostem czasu twardnienia wzrasta szybkość wchłaniania wody we wszystkich seriach. Choć nasiąkliwość zapraw serii referencyjnej wzrastała wraz ze wzrostem czasu twardnienia, zauważono, że szybkość wzrostu pozostawała na niższym poziomie w porównaniu do zapraw zawierających pucolan.

Oceniając zaprawy po 90 dniach dojrzewania, będącym najdłuższym okresem twardnienia, stwierdzono, że najmniejszy stopień nasiąkliwości wyznaczono dla zaprawy F60\_S i wyniósł on 21,8%. We wszystkich zaprawach, w których zastosowano popiół jako dodatek pucolanowy, zauważono, że stopień nasiąkliwości wody jest o około 12% niższy niż w przypadku zaprawy referencyjnej.

### 3. Results

#### 3.1. Water absorption

Water absorption test results of the produced mortars at 28, 56, and 90 days are shown in Fig. 2. The results were evaluated according to curing times, type of pozzolan and their utilized ratios as well as the type of aggregate used. According to the curing times, the water absorption rate by mass for all series was between 20.1-24.8% on the 28<sup>th</sup> day, 21.1-26.9% on the 56<sup>th</sup> day, and 21.8-31.4% on the 90<sup>th</sup> day. According to these results, it is evident that as the curing time increases, the water absorption rates increase in all series. Although the water absorption rates of the reference series mortars increased with the increase in curing time, it has been observed that the rate of increase remained at a lower level compared to mortars containing pozzolans.



Rys. 2. Nasiąkliwość zapraw

Fig. 2. Water absorption of specimens

Spośród wszystkich zapraw, największą nasiąkliwość, wynoszącą 31,4% stwierdzono dla zaprawy o kodzie F10Z50\_SB, z zeolitem i popiołem lotnym, zastosowanymi razem jako pucolana oraz pokruszoną cegłą jako kruszywem. Na podstawie tego wyniku stwierdzono, że zwiększenie zawartości zeolitu i zastosowanie jako kruszywa cegły łamanej powoduje zwiększenie nasiąkliwości zapraw o około 20% w porównaniu do zapraw referencyjnych. Ogólnie zauważono, że zastosowanie cegieł łamanych jako kruszywa nieznacznie zwiększało szybkość wchłaniania wody.

Szybkość absorpcji wody w zaprawach zawierających wyłącznie popiół lotny pozostała mała w porównaniu z próbkami referencyjnymi. Tutaj widać efekt zamykania przez popiół lotny małych porów (35). Jednakże po dodaniu zeolitu do mieszanin nastąpił znaczny wzrost szybkości absorpcji wody. W związku z tym stwierdzono, że porowatość zapraw jest większa w zaprawach zawierających zeolit (17). Ogólnie popiół ma pozytywny wpływ na zmniejszenie szybkości wchłaniania wody.

Porównując uzyskane wyniki z właściwościami oryginalnych historycznych zapraw budowlanych opisanych w literaturze, zauważono, że bizantyjskie zaprawy rzymskie z nasiąkliwością wody na poziomie 18-23% oraz zaprawy osmańskie o nasiąkliwości w zakresie 10-24% są bliższe właściwościom zapraw zawierających mieszaninę popiołu lotnego i zeolitu, badanych w niniejszej pracy, posiadających nasiąkliwość w zakresie 16-29% (36).

### 3.2. Porowatość

Porowatość całkowitą definiuje się jako stosunek objętości pustych przestrzeni w materiale do jego całkowitej objętości. Porowatość i rozkład wielkości porów materiału dostarczają ważnych informacji na temat jego trwałości. Rozkład wielkości porów oraz zawartość małych i dużych porów w zaprawach odgrywa ważną rolę w zachowaniu się materiału w warunkach eksploatacji (37). Porowatość jest również ważną właściwością fizyczną historycznych zapraw budowlanych. Porowatość wytworzonych zapraw naprawczych przedstawiono na rysunku 3. Porowatości zapraw mieściły się w przedziale od 34,8% do 42,3%. W zaprawach, w których stosowano sam popiół, zanotowano, że porowatość utrzymywała się w przedziale 34,8% – 37,2%. Spośród wszystkich serii najniższy współczynnik porowatości, wynoszący 34,8%, uzyskano dla serii F60\_S, w której użyto tylko popiołu. W zaprawach, w których stosowano popiół i zeolit razem, w miarę zmniejszania się ilości popiołu, wzrasta udział porów. W seriach, w których jako kruszywo wykorzystano cegłę łamaną, zanotowano jeszcze większy wzrost porowatości. Największy współczynnik porowatości oznaczono dla serii F10Z50\_SB i wyniósł on 37,2%.

Można stwierdzić, że popiół zwiększa urabialność świeżych zapraw przy mniejszej zawartości wody, przez co zmniejsza porowatość. Natomiast, w mieszankach zeolitych potrzeba więcej wody, aby uzyskać odpowiednią konsystencję świeżej zaprawy. Nadmiar wody pojawia się w postaci porów w późniejszych okresach twardnienia (38, 39). Chociaż sytuację tę można postrzegać jako wadę, uważa się ją za zaletę dla regionów o suchym klimacie. Ze względu

When the series at the 90<sup>th</sup> day, which is the longest curing period in the experimental study, are evaluated, it is observed that the least water absorption rate was determined from F60\_S mortar and was equal to 21.8%. In all series where Fa was used as a single pozzolan, it is observed that the water absorption rate is approximately 12% lower than that of the reference mortar. Among all series, the highest water absorption rate was determined from F10Z50\_SB coded mortar with 31.4%. In this series, zeolite and Fa were used together as pozzolan and crushed brick was added to the mixture as aggregate. According to this result, it was determined that the increase in zeolite content and the use of crushed brick as aggregate increased the water absorption rate in mortars by approximately 20% compared to the reference mortars. In general, it has been observed that the use of crushed bricks as aggregate slightly increased the water absorption rates.

The water absorption rates in the series using only Fa remained low compared to the reference samples. The effect of the fly ash closing the small pores is seen here (35). However, when zeolite was added to the mixtures, there was a significant increase in water absorption rates. In connection with this, the porosity of the mortars has been measured as higher in zeolite containing mortars (17). In general, it has been observed that Fa has a positive contribution to the reduction of the water absorption rates.

When the obtained results are compared with the original historical building mortars in the literature; it has been observed that Byzantine roman mortars which have a water absorption rate of 18-23% and Ottoman mortars with a water absorption rate of 10-24% are closer to the values of Fa + zeolite mixtures of this study with a water absorption rate of 16-29% (36).

### 3.2. Porosity

The total porosity is defined as the ratio of void volume in a material to its total volume. Porosity and pore size distribution of a material give important information about its durability. The pore size distribution and the presence of small and large pores in mortars play an important role in the performance of the material against environmental wear conditions (37). Porosity ratio is also an important physical property for the historical building mortars. The porosity rates of the produced repair mortars are shown in Figure 3. The porosity rate for all series was between 34.8% and 42.3%. In series where Fa was used alone, it was observed that the porosity rate remained in the range of 34.8% – 37.2%. Among all series, the lowest porosity rate was obtained as 34.8% for F60\_S, which is the series where Fa is used alone. In series where Fa and zeolite are used together, as the amount of Fa decreases, the pore ratio increases. In the series where crushed brick was used as aggregate, it was observed that this value increased even more. The highest porosity rate was determined from F10Z50\_SB series with 37.2%.

Here, it can be said that the fact that Fa increases the workability of fresh mortars at lower water content reduces the porosity rate that will occur due to the evaporation of the unbound water in the ma-

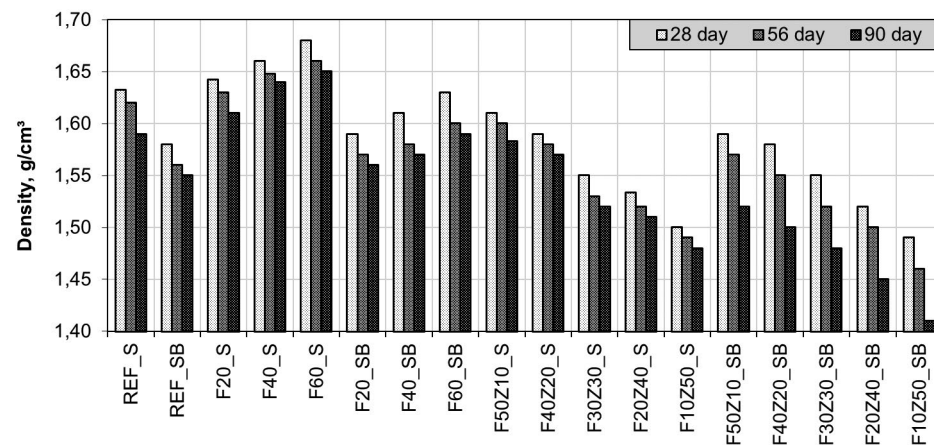
na te puste przestrzenie w dłuższym czasie, do wnętrza zaprawy będzie bardziej przenikał dwutlenek węgla i będzie przyczyniał się do powstawania węglanu wapnia (19). Jednak w regionach o dużej wilgotności duża porowatość jest zdecydowanie niekorzystna.

Gęstość zapraw różniła się w zależności od tego, czy w spoiwie znajdował się zeolit oraz czy jako kruszywo użyto łamanej cegły [rys. 4]. Jak wykazały badania, gęstość zmieniała się w granicach 1,41-1,68 g/cm<sup>3</sup> dla wszystkich zapraw i wszystkich czasów dojrzewania. W przypadku różnych zapraw zanotowano różne zmiany gęstości w tym okresie. W zaprawach z pocolanami spadek gęstości był większy w zależności od czasu twardnienia i ilości zeolitu. Chociaż stwierdzono, że gęstość zapraw zawierających sam popiół lotny jest większa niż zapraw referencyjnych, wartości gęstości zmierzone dla innych zapraw pozostały niższe od zapraw referencyjnych. Zmniejszone gęstości wskazują, że zwiększa się udział porów w materiale. Sytuacja ta jest również bezpośrednio związana z szybkością wchłaniania wody przez materiał. Wraz ze wzrostem ilości zeolitu w mieszankach gęstość zaczęła spadać.

W badaniach (36) stwierdzono, że gęstość zapraw murarskich stosowanych w murze ceglany, będącym częścią wielu budynków zabytkowych, przyjmuje wartości od 1,25 do 1,74 g/cm<sup>3</sup>. Widać, że gęstość wszystkich serii zapraw naprawczych wyprodukowanych w niniejszych badaniach ma małą gęstość, czyli mieszczącymi się pomiędzy wartościami podanymi w literaturze.

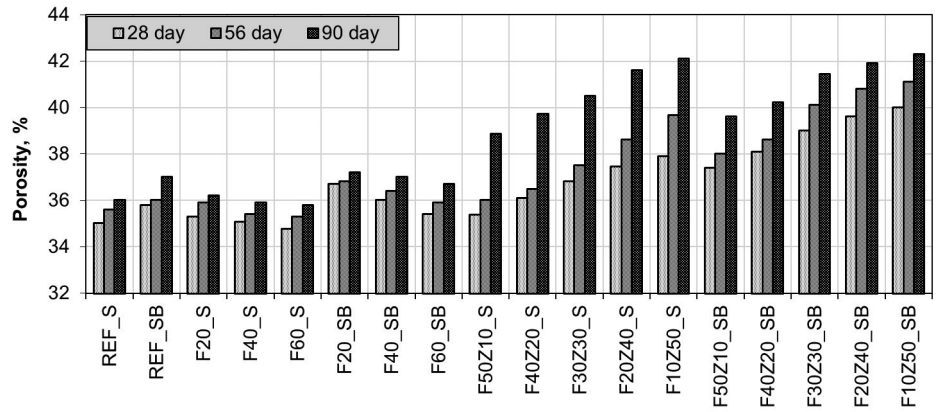
### 3.4. Absorpcja kapilarna

Ze względu na to, że w budynkach zabytkowych zwykle nie ma wystarczającego drenażu zewnętrznego i nie można zastosować bitumicznych materiałów izolacyjnych, kapilarna absorpcja wody



Rys. 4. Gęstość zapraw

Fig. 4. Density of mortars



Rys. 3. Porowatość zapraw

Fig. 3. Porosity of specimens

terial at later ages of hardened mortars. On the contrary, in zeolite mixes, more water is needed to obtain the proper consistency of the fresh mortar. This excess water occurs as pores in the later ages of hardened mortars (38,39). Although this situation can be seen as a disadvantage, it is believed to be an advantage for regions with dry climates. Due to these voids, it can be said that in the later ages of mortar, CO<sub>2</sub> will infiltrate into the mortar and contribute to the formation of CaCO<sub>3</sub> (19). However, in regions where moisture is intense, this situation definitely appears as a defect.

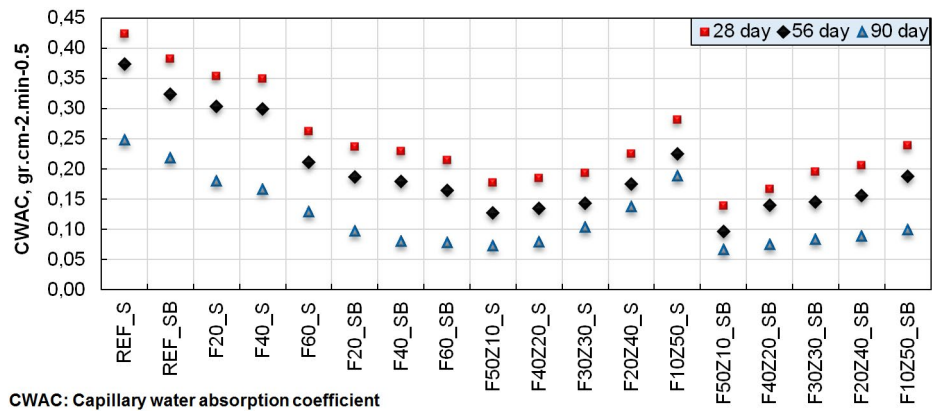
### 3.3. Density

The density of mortars differed depending on whether there is zeolite in the mixture and whether crushed brick was used as aggregate [Fig. 4]. As a result of the experiments, the density changed between 1.41-1.68 g/cm<sup>3</sup> in all mortar series and all curing times. In all series, 28 days density and 90 days density did not increase by the same amount. In mortars with additions, the decrease in density was greater depending on the curing time and the amount of zeolite. Although the density of the mortars containing Fa alone was determined to be higher than that of the reference mortars, the density values measured from other mortars remained below that of the reference mortars. Decreased density values indicate

that the amount of voids in the material increases. This situation is also directly related to the water absorption rate of the material. As the amount of zeolite in the mixtures increased, the density started to decrease.

In different studies, it has been reported that the density of the masonry mortars used in brick masonry, which is a part of many historical buildings, have values between 1.25 and 1.74 g/cm<sup>3</sup> (36). It is seen that the density of all the series of repair mortars produced in this study have low density values, in other words, between the values specified in the literature.

staje się w tego typu konstrukcjach bardzo poważnym problemem. Przenoszone przez wodę kapilarną sole znajdujące się w gruncie wnikają w głąb budynku, powodując zanieczyszczenie wizualne, a także niszczenie zapraw lub innych elementów ścian (38). Ogólnie rzecz biorąc, pożądany jest mały współczynnik absorpcji wody kapilarnej przez zaprawy naprawcze. Współczynniki kapilarnej absorpcji wody przez zaprawy wyprodukowane w niniejszych badaniach przedstawiono na rys. 5.



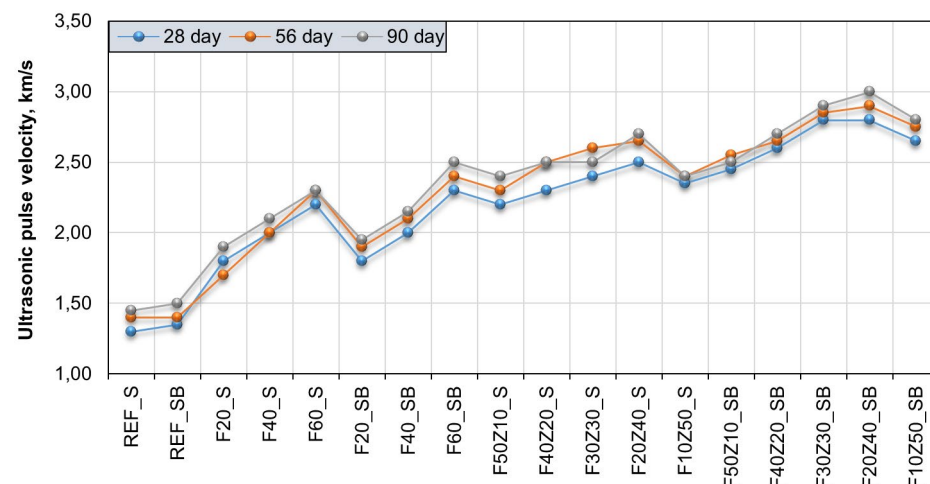
Rys. 5. Absorpcja kapilarna zapraw

We wszystkich seriach zapraw współczynnik kapilarnej absorpcji wody przez zaprawy zmniejszał się wraz z wydłużeniem czasu utwardzania. Najmniejszy współczynnik absorpcji wody kapilarnej zmierzono w zaprawach, w których jako pucolanę zastosowano popiół lotny, a cegłę łamaną jako kruszywo. Zwłaszcza po 90 dniach dojrzewania współczynnik absorpcji wody kapilarnej utrzymywał się poniżej  $0,10 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$  we wszystkich seriach zapraw, w których stosowano popiół lotny, zeolit i tłuczoną cegłę. Zwiększony dodatek popiołów lotnych w próbkach znacznie zmniejszył współczynnik absorpcji kapilarnej. Z kolei wraz ze wzrostem dodatku zeolitu do mieszanin współczynnik absorpcji kapilarnej zwiększał się.

Fig. 5. Capillary water absorption coefficient of specimens

### 3.5. Szybkość przejścia fali ultradźwiękowej

Szybkości przejścia fali ultradźwiękowej przez zaprawy przedstawiono na rys. 6. Z uzyskanych wyników wynika, że zmierzone wartości w zaprawach z pucolanami były większe od wyników zaprawy referencyjnej. Największe wartości uzyskano w mieszaninach z popiołem lotnym, zeolitem i kruszywem ceglany łamanym. W 90. dniu hydratacji różnica pomiędzy wynikiem zaprawy referencyjnej, a najlepszym wynikiem zaprawy z pucolanami wyniosła 200%. Ogólnie rzecz biorąc, wyniki uzyskane dla wartości prędkości impulsu ultradźwiękowego były zbliżone z wynikami badania wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 6. Szybkość przejścia fali ultradźwiękowej

Fig. 6. Ultrasonic pulse velocity of specimens

### 3.4. Capillary water absorption

Since external drainage is usually not sufficient in historical buildings and bituminous insulation materials cannot be used, capillary water absorption becomes a very serious problem for such structures. Carried by capillary water, the salts on the ground penetrate the building, leading to visual pollution as well as deterioration of mortars or other wall components (38). In general, a low capillary water absorption coefficient of repair mortars is desired. The capillary water absorption coefficients of the mortars produced in this study are shown in Figure 5.

In all series of mortars, the capillary water absorption coefficient of mortars decreased as the curing time increased. It was observed that the lowest capillary water absorption coefficient appeared in series where Fa was included as pozzolan and crushed brick as aggregate. Especially on the 90th day, the capillary water absorption coefficient remained below  $0.10 \text{ gr. cm}^2 \cdot \text{min}^{-0.5}$  in all series mixtures where Fa + zeolite and crushed brick were used as aggregate. The increased use of fly ash in the samples greatly reduced the capillarity coefficient. However, as the addition of zeolite to the mixtures increased, the capillary coefficient also increased.

### 3.5. Ultrasonic pulse velocity

The values of mortars examined by the ultrasonic test method are shown in Figure 6. According to the results, the measured values in the pozzolan series were higher than the results of the reference mortar. The highest values were measured in mixtures with Fa + zeolite and crushed brick aggregate. On the 90th day selected for the final curing period, a 200% difference has occurred in favor of pozzolan mortar between the highest measurement and the reference mortar with the lowest measurement. Generally, the results obtained for the ultrasonic pulse velocity values were parallel to the compressive strength results.



### 3.6. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie

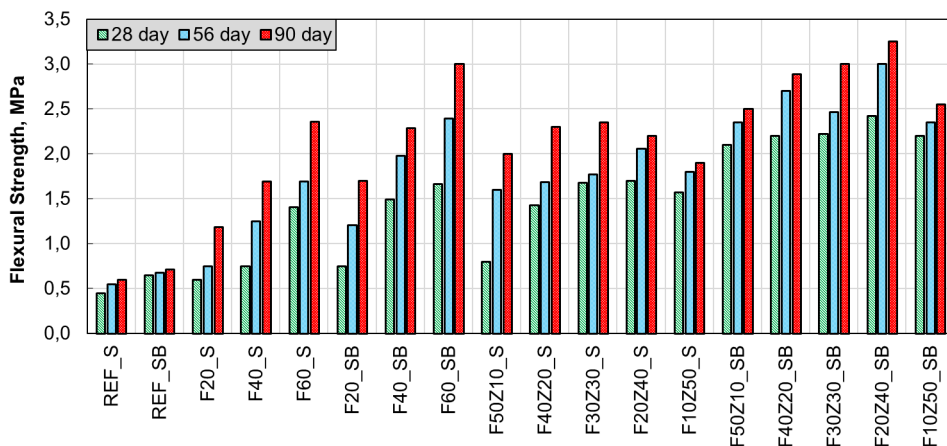
Wyniki badań zginania i ściskania zapraw przedstawiono odpowiednio na rys. 7 i 8. Największe wartości wytrzymałości na zginanie i ściskanie dla wszystkich mieszanek uzyskano po 90 dniach hydratacji. Po 28 dniach wytrzymałość zapraw pucolanowych była większa niż wytrzymałość zapraw referencyjnych po 90 dniach. Wraz ze zwiększaniem zawartości zeolitu w mieszankach zmniejszała się szybkość wzrostu wytrzymałości pomiędzy 28. a 90. dniem. W seriach, w których stosowany jest sam popiół lotny, pomiędzy dwoma okresami twardnienia nastąpił wzrost wytrzymałości aż do 100%.

W mieszankach popiół + zeolit, w których zastosowano wyłącznie piasek rzeczny, najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskała zaprawa F30Z30\_S z wartością 10,7 MPa. Największą wytrzymałość na ściskanie spośród zapraw zawierających, jako kruszywo kruszoną cegłę równą 17,1 MPa uzyskała zaprawa F20Z40\_SB. Jednocześnie jest to wartość największa we wszystkich seriach. Chociaż wytrzymałość uzyskana w seriach, w których zastosowano sam popiół, jest większa niż w próbkach referencyjnych, najlepsze wyniki uzyskano w zaprawach zawierających popiół i zeolit. Wartości wytrzymałości zapraw z popiołem i zeolitami są bardzo zbliżone do siebie w szeregach, w których jako kruszywo stosuje się wyłącznie piasek rzeczny. Natomiast wartości uzyskane w serii zawierającej cegłę łamaną osiągały nawet 7-8-krotność wartości wytrzymałości na ściskanie zapraw referencyjnych. Przy zastosowaniu zeolitu przekraczającego 40% w seriach zawierających jako kruszywo cegły łamane, wartości wytrzymałości na ściskanie zaczęły spadać.

Najbardziej widoczne różnice pomiędzy zaprawami referencyjnymi a pucolanami wynikają z ich właściwości wytrzymałościowych. Uzyskano znacznie lepsze wyniki w zakresie wytrzymałości na zginanie i ściskanie w porównaniu do zapraw referencyjnych wszystkich serii z dodatkami pucolanowymi. W szczególności w serii, w której zeolit i popiół stosuje się razem, uzyskano średnio 5,5 razy lepsze wyniki niż seria referencyjna.

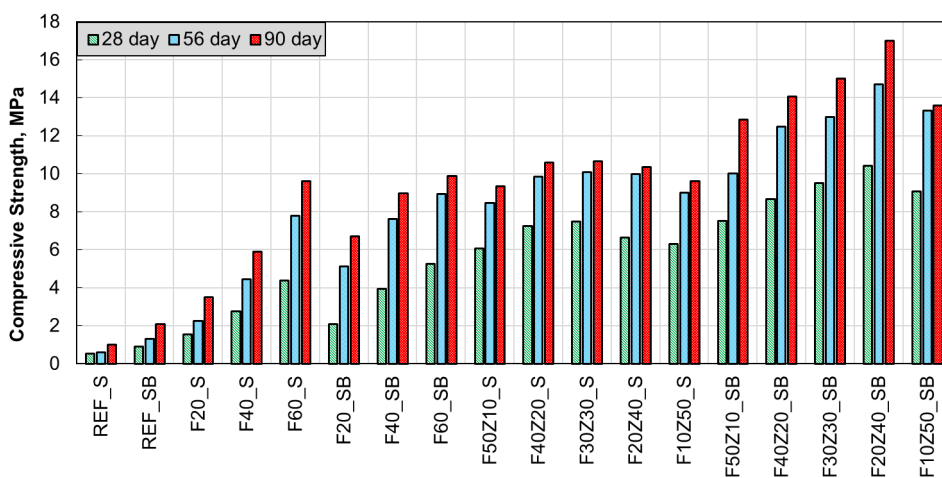
### 3.7. Analiza składu fazowego

Wyniki analizy rentgenograficznej zapraw po 90 dniach dojrzewania przedstawiono na rys. 9. We wszystkich zaprawach wykryto



Rys. 7. Wytrzymałość na zginanie zapraw

Fig. 7. Flexural strength of specimens



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie zapraw

Fig. 8. Compressive strength of specimens

### 3.6. Flexural and compressive strengths

The results of the flexural and compressive tests on mortars are shown in Figs. 7 and 8, respectively. The highest values of flexural and compressive strength for all mixes were achieved after 90 days of hydration. An interesting finding is that after 28 days strength of pozzolanic mortars was higher than the 90-day strengths of the reference mortars. With the increase in the zeolite content in the mixtures, the strength increase rate between the 28th day and the 90-day flexural strength decreased. In series in which Fa is used alone, an increase in strength of up to 100% occurred between two curing periods.

In Fa + zeolite mixes where only river sand was used, the highest compressive strength was obtained from the F30Z30\_S series with 10.7 MPa, while the highest compressive strength value in mixes containing crushed bricks as aggregate was obtained from F20Z40\_SB series with 17.1 MPa. At the same time, this value is the highest value in all series. Although the strength obtained in series where Fa is used alone is higher than in reference samples,

portlandyt [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], kalcyt [ $\text{CaCO}_3$ ] i kwarc [ $\text{SiO}_2$ ]. Z uzyskanych danych wynika, że podczas gdy w seriach zawierających kruszywo ceglane łamane zmniejszyła się intensywność portlandytu i kalcytu, zaobserwowano składniki FA i zeolitu, uwodnionego glinianu wapnia, fazy C-S-H oraz stralingitu. Widać, że produkty te przyczyniły się do poprawy wytrzymałości zapraw.

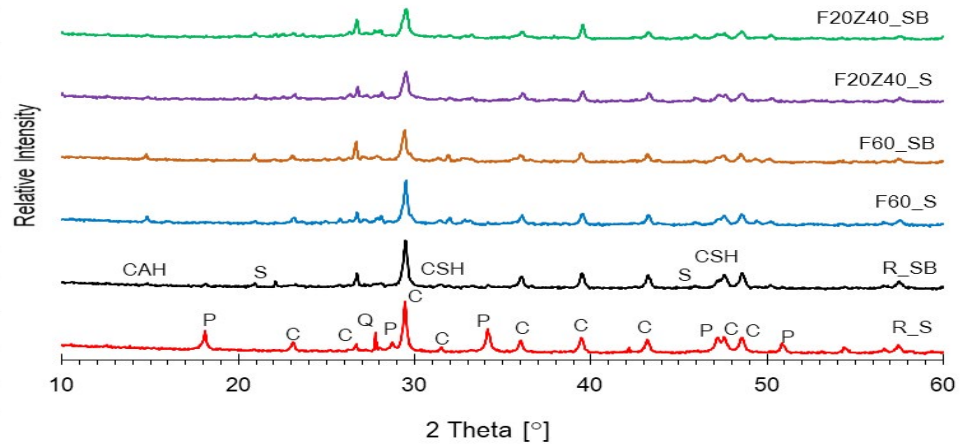
Stwierdzono, że dodatek pucolan powoduje powstawanie w zaprawach uwodnionych glinianów wapnia, fazy C-S-H i stralingitu, co pozytywnie wpływa na poprawę wytrzymałości.

#### 4. Wnioski

W pracy zbadano wpływ pucolan naturalnych i sztucznych na poprawę właściwości mechanicznych i fizycznych zapraw wapiennych do renowacji obiektów zabytkowych. Z tego powodu popiół lotny, będący odpadem z elektrowni ciepłych, oraz zeolit, naturalna pucolana, zostały zbadane w zaprawach z dwoma różnymi kruszywami – piaskiem naturalnym oraz kruszywa z rozdrobnionych cegieł. Wodę zarobową określano utrzymując stałą urabialność we wszystkich seriach zapraw naprawczych. W związku z tym ilość wody zarobowej w zaprawach naprawczych zawierających pucolany była zróżnicowana. O ile ilość wody zwiększyła się w zaprawach zawierających zeolit, to zmniejszyła się w przypadku zapraw zawierających popiół lotny. Można to wytłumaczyć faktem, że zeolit ma drobniejsze ziarna i porowatą mikrostrukturę a w związku z tym większą wodożądność. Właściwości mechaniczne i fizyczne zapraw naprawczych zmieniały się w zależności od czasu twardnienia, składu spoiwa i wykorzystania bądź piasku naturalnego lub kruszywa ceglanego łamanego. Zastosowanie popiołu lotnego i zeolitu dało bardzo dobre wyniki w zakresie poprawy niektórych właściwości fizycznych, a także polepszenia wytrzymałości zaprawy. Stwierdzono, że zastosowanie cegieł łamanych jako kruszywa przyczynia się do poprawy właściwości mechanicznych i fizycznych, choć w ograniczonym zakresie.

#### Literatura / References

1. A. Güleç, T. Tulun, Physico-chemical and petrographical studies of old mortars and plasters of Anatolia. *Cem. Concr. Res.* **27**, 227–234 (1997). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00005-7).
2. A. Moropoulou, A.S. Cakmak, G. Biscontin, A. Bakolas, E. Zendri, Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: The crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Constr. Build. Mater.* **16**, 543–552 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00005-3).
3. K. Callebaut, J. Elsen, K. Van Balen, W. Viaene, Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Bel-



Rys. 9. Dyfraktogramy wybranych próbek zapraw

Fig. 9. XRD analysis of specimens

the best results were obtained in series containing Fa + zeolite. The strength values of Fa + zeolite are very close to each other in series, where only river sand is used as aggregate. However, the values obtained in the series containing crushed bricks reached up to 7-8 times the compressive strength values of the reference mortars. With the use of zeolite exceeding 40% in series containing crushed bricks as aggregate, the compressive strength values started to decrease.

The most prominent differences between reference mortars and pozzolan series have emerged in their strength properties. Much better results were obtained in terms of flexural and compressive strength compared to reference mortars in all series with pozzolan additives. In particular, in the series where zeolite and Fa are used together, an average of 5.5 times better results have been obtained than in the reference series.

#### 3.7. Phase analysis

The results of the XRD analysis of mortars after 90 days of curing are shown in Fig. 9. Portlandite [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], calcite [ $\text{CaCO}_3$ ], and quartz [ $\text{SiO}_2$ ] were detected in all the mortars. According to the data obtained, while the intensity of portlandite and calcite decreased in series containing crushed brick aggregate, Fa and zeolite, hydrated calcium aluminate, C-S-H phase and stralingite formations were observed. It is seen that these formations contributed to the improvement of strength properties of the mortars.

It was found that pozzolanic addition caused the formation of calcium alumina hydrate, calcium silicate hydrate and stralingite in mortars and this situation positively affected the strength increases.

#### 4. Conclusions

In this study, the effect of natural and artificial pozzolans on improvements of mechanical and physical properties of lime mortars for repair of historic buildings was investigated. For this reason, fly ash, which is a waste from thermal power plants, and zeolite,

gium): Natural hydraulic lime or cement? *Cem. Concr. Res.* **31**, 397–403 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00499-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00499-3).

4. S.A. Hartshorn, J.H. Sharp, R.N. Swamy, Thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes. *Cem. Concr. Res.* **29**, 1331–1340 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00100-3).

5. R.M. Espinosa-Marzal, G.W. Scherer, Advances in understanding damage by salt crystallization. *Acc. Chem. Res.* **43**, 897–905 (2010). <https://doi.org/10.1021/ar9002224>.

6. ICOMOS, The Venice Charter, (1964) 1–3. [http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR\\_en0243704001536681730.pdf](http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_en0243704001536681730.pdf).

7. ICOMOS, The Declaration of Amsterdam, (1975). [http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR\\_en0458431001536681780.pdf](http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_en0458431001536681780.pdf).

8. I. Papayianni, V. Pachtá, M. Stefanidou, Analysis of ancient mortars and design of compatible repair mortars: The case study of Odeion of the archaeological site of Dion. *Constr. Build. Mater.* **40**, 84–92 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.086>.

9. P. Degryse, J. Elsen, M. Waelkens, Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation. *Cem. Concr. Res.* **32**, 1457–1463 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00807-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00807-4).

10. M.P. Riccardi, P. Duminuco, C. Tomasi, P. Ferloni, Thermal, microscopic and X-ray diffraction studies on some ancient mortars. *Thermochim. Acta.* **321**, 207–214 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(98\)00461-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(98)00461-4).

11. C. Genestar, C. Pons, A. Más, Analytical characterisation of ancient mortars from the archaeological Roman city of Pollentia (Balearic Islands, Spain). *Anal. Chim. Acta*, 2006, 373–379 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.10.058>.

12. S. Thirumalini, R. Ravi, M. Rajesh, Experimental investigation on physical and mechanical properties of lime mortar: Effect of organic addition. *J. Cult. Herit.* **31**, 97–104 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.10.009>.

13. S.Q. Fang, H. Zhang, B.J. Zhang, Y. Zheng, The identification of organic additives in traditional lime mortar. *J. Cult. Herit.* **15**, 144–150 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.04.001>.

14. S. Tian, S. Liu, F. Gao, M. Fan, J. Ren, Preparation and assessment of superhydrophobic organic-inorganic hybrid coatings for conservation of Yungang Grottoes. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. MRS Online Procc. Lib.* **1319**, 406 (2011). <https://doi.org/10.1557/opl.2011.736>.

15. L. Ventol, M. Vendrell, P. Giraldez, L. Merino, Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Constr. Build. Mater.* **25**, 3313–3318 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020>.

16. A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, A. Moropoulou, S. Anagnostopoulou, Evaluation of pozzolanic activity and physicochemical characteristics in metakaolin-lime pastes. *J. Therm. Anal. Calorim.* **84**, 157–163 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10973-005-7262-y>.

17. V. Pavlík, M. Užáková, Effect of curing conditions on the properties of lime, lime-metakaolin and lime-zeolite mortars. *Constr. Build. Mater.* **102**, 14–25 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.128>.

18. S. Andrejkovičová, A.L. Velosa, F. Rocha, Air lime-metakaolin-sepiolite mortars for earth based walls, *Constr. Build. Mater.* **44**, 133–141 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.008>.

19. A. Gameiro, A. Santos Silva, P. Faria, J. Grilo, T. Branco, R. Veiga, A. Velosa, Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ration. *Cem. Concr. Compos.* **45**, 264–271 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.010>.

20. A. Sepulcre-Aguilar, F. Hernández-Olivares, Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement

a natural pozzolan have been tested in mortars with two different aggregate compositions at different ratios. The mixing water was determined by keeping the workability constant in all series of repair mortars. Therefore, the amount of mixing water varied in pozzolan-containing repair mortars. Although the amount of water used in mixtures increased in series containing zeolite, it decreased in series containing Fa. This can be explained by the fact that zeolite has a finer and porous microstructure and the material possess higher water demand. As a result of the tests, the mechanical and physical properties of the repair mortars changed depending on curing times, the ratio of pozzolan matrices and the use of crushed brick aggregate. In general, the use of fly ash and zeolite gave very good results in improving some physical properties and improving the mechanical properties of the mortar. It has been observed that the use of crushed bricks as aggregate contributes to the improvement of mechanical and physical properties, although limited.

- and sepiolite, for grouting of historic masonry. *Cem. Concr. Res.* **40**, 66–76 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.028>.
21. G. Boffey, E. Hirst, The Use of Pozzolans in Lime Mortars. *J. Archit. Conserv.* **5**, 34–42 (1999). <https://doi.org/10.1080/13556207.1999.10785250>.
22. A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, Investigation of the technology of historic mortars. *J. Cult. Herit.* **1**, 45–58 (2000). [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(99\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(99)00118-1).
23. M. Budak, S. Akkurt, H. Böke, Evaluation of heat treated clay for potential use in intervention mortars. *Appl. Clay Sci.* **49**, 414–419 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.031>.
24. TS EN 459-1, Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria, Ankara, 2017.
25. TS 25, Natural pozzolan (Trass) for use in cement and concrete - Definitions, requirements and conformity criteria, Turkish Stand. Inst. (2008).
26. C. Oğuz, F. Türker, N.U. Koçkal, Andriake Limanı'nda Roma, Bizans ve Selçuklu Dönemi Harçların Özellikleri. *Tek. Dergi/Technical J. Turkish Chamb. Civ. Eng.* **26**, 6993–7013 (2015). <https://doi.org/10.18400/td.55157>.
27. Y. Zeng, B. Zhang, X. Liang, A case study and mechanism investigation of typical mortars used on ancient architecture in China. *Thermochim. Acta.* **473**, 1–6 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.03.019>.
28. F. Yang, B. Zhang, C. Pan, Y. Zeng, Traditional mortar represented by sticky rice lime mortar-One of the great inventions in ancient China. *Sci. China, Ser. E Technol. Sci.* **52**, 1641–1647 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0317-0>.
29. D. Carran, J. Hughes, A. Leslie, C. Kennedy, International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration A Short History of the Use of Lime as a Building Material Beyond Europe and North America. *Int. J. Archit. Herit.* **6**, 117–146 (2012). <https://doi.org/10.1080/15583058.2010.511694>.
30. TS EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar, Turkish Stand. Inst. (2006).
31. TS EN 196-1, Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, Turkish Stand. Inst. (2016).
32. TS EN 1015-11, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Turkish Stand. Inst. (2020).
33. EN 1015-10, Methods of test for mortar for masonry- Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, Turkish Stand. Inst. (2001).
34. TS EN 1015-18, Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, Turkish Stand. Inst. (2014).
35. A. Wongsu, V. Sata, P. Nuaklong, P. Chindaprasirt, Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **188**, 1025–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.176>.
36. S.S. Tunçoku, Characterization of masonry mortars used in some Anatolian Seljuk monuments in Konya, Beyşehir and Akşehir. Middle East Technical University, 2001.
37. M. Dayı, Examination of the Khorasan mortars used in historical buildings and production of alternative Khorasan mortar, Gazi University, 2017.
38. S.M. Moayedian, M. Hejazi, Effect of scale on compressive strength of brick masonry with gypsum mortar. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **172**, 108932 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108932>.
39. M. Abdi Moghadam, R.A. Izadifard, Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures. *Constr. Build. Mater.* **253**, 119206 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119206>.
40. M.Y. Çelik, M. Sert, An assessment of capillary water absorption changes related to the different salt solutions and their concentrations ratios in the Döğür tuff (Afyonkarahisar-Turkey) used as building stone of cultural heritages. *J. Build. Eng.* **35**, 102102 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102102>.