

## Ocena schładzania zapraw cementowych narażonych na działanie wysokiej temperatury za pomocą piany gaśniczej

## An evaluation of cooling Portland cement mortars exposed to high temperature, by using firefighting foam

Ebru Dinler<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Graduate Education Institute, Sakarya, Turkey

\*Corresponding author: E. Dinler, e-mail: ebrudinler@hotmail.com

### Streszczenie

Celem niniejszej pracy było zbadanie efektów szybkiego chłodzenia zapraw z cementu portlandzkiego poddanych działaniu wysokiej temperatury, syntetyczną lekką pianą gaśniczą. W niniejszym badaniu próbki zaprawy z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku Rilem-Cembureau i wody wodociągowej poddano najpierw dojrzewaniu w wodzie przez 28, 90 i 180 dni, a następnie poddano działaniu temperatury odpowiednio 20°C, 150°C, 300°C, 500°C i 700°C przez 3 godziny. Zaprawy cementowe wystawione na działanie wysokiej temperatury schładzano syntetyczną pianą gaśniczą lekką, a następnie oceniano wytrzymałość na zginanie i ściskanie w zależności od czasu hydratacji i temperatury, na której działanie były wystawione. Następnie 180-dniowe zaprawy cementowe wystawione na działanie wysokiej temperatury schładzano różnymi metodami: powietrzem, wodą i pianą. Stwierdzono, że przy zastosowaniu metody chłodzenia powietrzem uzyskano większą wytrzymałość na ściskanie, niż przy chłodzeniu wodą lub pianą. W dalszej kolejności dokonano analizy wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na ściskanie, szybkości przejścia fali ultradźwiękowej oraz procentowego ubytku masy, próbek zapraw otrzymanych w wyniku zastosowania różnych temperatur oraz metod chłodzenia. Stwierdzono, że próbki poddane działaniu temperatury 500°C, chłodzone pianą gaśniczą daly o 9% większą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu do chłodzenia wodą. Uzyskano i przeanalizowano obrazy mikrostruktury 180-dniowych zapraw z cementu portlandzkiego poddanych działaniu temperatury 20°C, 300°C i 700°C, a następnie schładzanych odpowiednio powietrzem, wodą i pianą.

### Summary

The purpose of this study was to investigate the effects of cooling Portland cement mortars exposed to high temperature, with synthetic high-expansion firefighting foam. In this experimental study, mortar samples produced with Portland cement CEM I 42,5R, Rilem-Cembureau sand and tap water were first subjected to water curing for 28, 90 and 180 days and then exposed to 20°C, 150°C, 300°C, 500°C and 700°C for 3 hours, respectively. Cement mortars exposed to high temperatures were cooled with high expansion firefighting foam and the resulting flexural strength and compressive strengths were evaluated according to hydration period and temperature parameters. Subsequently, 180-day cement mortar samples exposed to high temperature were cooled using air, water, and foam cooling methods. It was determined that the air cooling method resulted in a higher compressive strength than water or foam cooling. The flexural strength, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and mass loss percentage values, obtained by the different cooling methods and exposure temperatures employed, were then analysed. It was determined that samples exposed to 500°C, cooling with firefighting foam, yielded a compressive strength of 9% higher, compared to water cooling. SEM images of 180-day Portland cement mortars exposed to 20°C, 300°C and 700°C and subsequently air, water and foam cooled, respectively, were obtained and analysed.

**Keywords:** cement mortar, high temperature, high expansion foam

**Słowa kluczowe:** zaprawa cementowa, wysoka temperatura, piana lekka

## 1. Wprowadzenie

Środki gaśnicze to między innymi woda, piasek, CO<sub>2</sub>, piana gaśnicza i suchy proszek chemiczny. Piana gaśnicza składa się z mieszaniny koncentratu pianowego, wody i powietrza. Piana lekka charakteryzuje się minimalnym współczynnikiem rozprężenia 200, a jej stężenie dozowania wynosi 1% do 6% (1). Rozpatrując opublikowane badania, w przypadku betonu i zapraw cementowych, narażonych na działanie wysokiej temperatury, opisywano stosowanie chłodzenia powietrzem i wodą, natomiast nie znaleziono opisów działania na materiał chłodzenia z wykorzystaniem piany gaśniczej. W niniejszej pracy przeprowadzono badania wpływu syntetycznej lekkiej piany gaśniczej – mogącej gasić pożary kategorii A i B – na wytrzymałość zapraw z cementu portlandzkiego poddanych działaniu wysokiej temperatury. Fazy występujące w stwardniałym zaczynie cementowym wykazują bardzo zróżnicowane rozszerzalności termiczne. Na ogół zmiany ich wymiarów w temperaturze narastania są wypadkową dwóch procesów: skurcza spowodowanego odwodnieniem uwodnionych faz zaczynu i ekspansji nieuwodnionych części zaczynu i kryształów Ca(OH)<sub>2</sub> [do 450°C] (2). Charakterystyczne mikropęknięcia w mikrostrukturze zaczynu, spowodowane różnymi odkształceniemi termicznymi faz, stwierdzono z użyciem skanowej mikroskopii elektronowej (2). Wpływ wzrostu temperatury na zaczyn cementowy i klinkier podsumowano w tablicy 1, natomiast wpływ wzrostu temperatury na kryształy Ca(OH)<sub>2</sub> w zaczynie cementowym przedstawiono w tablicy 2.

Wodorotlenek wapnia, jeden z najważniejszych związków w zaczynie cementowym, w temperaturze 530°C rozkłada się do CaO. Podczas tego procesu następuje prawie 33%-owy skurcz. Podczas rozpylania wody w celu ugaszenia pożaru, CaO zamienia się w Ca(OH)<sub>2</sub>, który migruje przez pory, tworząc po pożarze białe plamy na powierzchni. Na skutek tych procesów powstają pewne pęknięcia, a beton ulega wykruszeniu i staje się materiałem porowatym (3,4). Przy temperaturze dochodzącej do około 300°C następuje utrata wody międzywarstwowej w fazie C-S-H, a także części chemicznie związanej wody z fazą C-S-H i siarczanoglinianów. Postępujące odwodnienie zaczynu cementowego w wyniku rozkładu wodorotlenku wapnia rozpoczyna się w temperaturze około 500°C, ale

## 1. Introduction

Fire extinguisher media include water, sand, CO<sub>2</sub> gas, firefighting foam, and dry chemical powder. Firefighting foam consists of a mixture of foam concentrate, water, and air. High-expansion foam has a minimum expansion ratio of 200 times and its concentration ratio is 1% to 6% (1). When examining published literature studies, air and water cooling methods have been used for concrete and cement mortars, exposed to high temperature, but no cooling using firefighting foam has been found. In the present study, the effects of synthetic high expansion firefighting foam – which can extinguish Class A and B fires – on the strength of Portland cement mortars exposed to high temperature were investigated. The phases present in hardened cement paste have very diversified heat deformations. Generally, their course at growing temperature is a resultant of two processes: shrinkage caused by dehydration of hydrated phases; expansion of the unhydrated components of paste and Ca(OH)<sub>2</sub> [up to 450°C] (2). The microstructure of the pastes was observed using a scanning microscope in the areas of occurrence of unhydrated clinker and Ca(OH)<sub>2</sub> crystals (2). Characteristic microcracks within the paste microstructure, caused by different thermal expansions of phases, were revealed by SEM observations (2). The effects of increased temperature on cement paste and clinker are shown in Table 1, while the effects of temperature increase on Ca(OH)<sub>2</sub> crystals in cement paste are given in Table 2.

Calcium hydroxide, one of the most important compounds in cement paste, turns into CaO at 530°C. During this process, an almost 33% shrinkage happens. When the water is sprayed in order to extinguish fire, CaO turns into Ca(OH)<sub>2</sub> and flows through the pores and forms white spots on the surface, after the fire. During these processes, some cracks occur and concrete is crumbled and becomes porous material (3,4). When the temperature reaches about 300°C, the interlayer C-S-H phase water, and some of the chemically combined water from the C-S-H and sulfoaluminate hydrates, would also be lost. Further dehydration of the cement paste due to decomposition of calcium hydroxide begins at about 500°C, but temperatures on the order of 900°C, are required for complete decomposition of the C-S-H (5). The compressive

Tablica 1

WPŁYW TEMPERATURY NA ZACZYN CEMENTOWY (2)

20°C	Nieuwodnione ziarna klinkieru są rozmieszczone równomiernie w zaczynie cementowym, ich rozmiary są zróżnicowane.
Do 300°C	Fazy nieuwodnione nie wykazywały żadnych zmian wewnętrznych czy zewnętrznych.
400°C	Stwierdzono znaczną ilość mikropęknięć pomiędzy dużymi ziarnami nieuwodnionego klinkieru a zaczynem.
500°C	Wnętrze ziaren nieuwodnionego klinkieru uległo całkowitemu zniszczeniu.

Table 1

EFFECTS OF TEMPERATURE INCREASE ON CEMENT PASTE (2)

20°C	Unhydrated clinker grains are spaced equally in the cement paste, their sizes were varied.
Up to 300°C	Unhydrated phases showed neither internal nor external changes.
400°C	A great number of microcracks between large unhydrated clinker grains and the paste were observed.
500°C	The interior area of unhydrated clinker grains underwent complete destruction.

Tabela 2

WPŁYW WZROSTU TEMPERATURY NA KRYSZTAŁY Ca(OH)<sub>2</sub> W ZACZYNIE CEMENTOWYM (2)

20°C	Sporadycznie obserwowano skupienia dużych, dobrze wykształconych kryształów Ca(OH) <sub>2</sub> . Odstępy między nimi były stosunkowo równomierne
100°C i 200°C	Wzrastająca liczba dużych, dobrze wykształconych kryształów Ca(OH) <sub>2</sub> była widoczna w zaczynach poddanych działaniu temperatury.
300°C	Wyraźnie rosła liczba mikropęknięć pomiędzy kryształami Ca(OH) <sub>2</sub> a żellem cementowym je otaczającym, pęknięcia zaczęły pojawiać się pomiędzy warstwami.
200°C ~500°C	Stwierdzono zwiększącą się karbonatyzację Ca(OH) <sub>2</sub> .

Table 2

EFFECTS OF TEMPERATURE INCREASE ON CALCIUM HYDROXIDE CRYSTALS IN CEMENT PASTE (2)

20°C	The concentrations of large well crystallized Ca(OH) <sub>2</sub> were seldom observed. The spacing of Ca(OH) <sub>2</sub> was relatively uniform
100°C and 200°C	A growing number of large, well crystallized Ca(OH) <sub>2</sub> crystals were visible in pastes exposed to heat.
300°C	The number of microcracks between Ca(OH) <sub>2</sub> and surrounding cement gel grew visibly, and the cracks began to appear between the layers.
200°C ~500°C	A progressive growth of Ca(OH) <sub>2</sub> carbonization was observed.

do całkowitego rozkładu fazy C-S-H potrzebne są temperatury rzędu 900°C (5). Metoda chłodzenia ma wyraźny wpływ na wytrzymałość zapraw na ściskanie. Badania z literatury wykazały, że metoda chłodzenia powietrzem daje zazwyczaj wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie niż chłodzenie wodą (4, 6 - 9). Można spotkać się również z innymi badaniami, w których niższe wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskano przy zastosowaniu metody chłodzenia powietrzem, a nie wodą lub z piecem (10, 11).

## 2. Materiały i metody

Próbki zaprawy wykonano przy użyciu potrójnych stalowych form o wymiarach 40×40×160 mm zgodnie z normą TS EN 196-1 „Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości” (12). Do badań użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Właściwości fizyczne i mechaniczne cementu przedstawiono w tablicy 3, natomiast skład chemiczny w tablicy 4.

W mieszankach zapraw zastosowano piasek standardowy TS EN 196-1 Rilem-Cembureau Pınarhisar produkowany przez cementownię Limak [Ankara] oraz wodę wodociągową z Ankary bez dodatków organicznych i soli mineralnych mogących mieć wpływ na końcowe właściwości cementu. Skład zaprawy cementowej przedstawiono w tablicy 5.

Próbki zaprawy utwardzane w temperaturze 20±2°C przez 28, 90 i 180 dni w komorze o wilgotności względnej minimum 90%. Następnie przetrzymywano w suszarce w temperaturze 80°C przez 24 godziny przed umieszczeniem w piecu wysokotemperaturowym. Do określenia wpływu temperatury wykorzystano piec typu MOS 180/8 [rys. 1]. Szybkość nagrzewania wynosiła 10°C/min. Próbki zaprawy cementowej poddawano działaniu

strength of mortars is noticeably affected by the cooling method. It was found in literature studies that the air cooling method has usually yielded higher compressive strength values than water cooling (4,6–9). There are also other studies where lower compressive strength values were obtained with the air cooling method, rather than water or furnace cooling (10,11).

## 2. Materials and methods

The mortar samples used in this study were produced using triple steel mortar moulds of dimensions 40×40×160 mm in accordance with the TS EN 196-1 standard “Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength” (12). Portland cement CEM I 42.5 R was used. The physical and mechanical properties of the cement are shown in Table 3, while chemical analysis results are shown in Table 4.

TS EN 196-1 Rilem-Cembureau Pınarhisar standard sand produced by the Limak Cement Plant [Ankara] and tap water in Ankara without any organic materials and mineral salts that might affect

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE UŻYTEGO CEMENTU  
PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT USED

Powierzchnia właściwa / Specific surface area, cm <sup>2</sup> /g	3350
Stałosć objętości / Soundness, mm	1.2
Wodożądność / Water demand, %	27.2
Początek czasu wiązania / Initial setting time, min	150
Final setting time, min	190
Density, g/cm <sup>3</sup>	3.1
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa	7 days 39.8 28 days 51.9
Wytrzymałość na zginanie / Flexural strength, MPa	7 days 7.3 28 days 10.1

Tablica 4 / Table 4

## WYNIKI ANALIZY CHEMICZNEJ UŻYTEGO CEMENTU

## CHEMICAL ANALYSIS OF CEMENT USED

Chemical composition, %	CEM I 42.5 R
CaO	62.64
SiO <sub>2</sub>	20.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.07
MgO	1.64
SO <sub>3</sub>	2.99
K <sub>2</sub> O	0.82
Na <sub>2</sub> O	0.01
Straty prażenia / Loss on ignition, %	0.20



Rys. 1. Wygrzewanie próbek zaprawy cementowej w piecu wysokotemperaturowym

Fig. 1. Heating cement mortar samples in a high temperature furnace

temperatury 20°C, 150°C, 300°C, 500°C i 700°C przez 3 godziny. Badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą TS EN 196-1 „Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości” (12).

Zaprawy cementowe wygrzane w piecu podano chłodzeniu powietrzem, wodą i pianą. Zastosowany w eksperymencie koncentrat pianowy był syntetyczną pianą lekką pozykową z Metropolitalnej Straży Pożarnej w Ankarze. Koncentrat piany wytwarzany jest w zakładach spełniających wymagania normy ISO 9001 Bureau Veritas oraz systemu zarządzania jakością UKAS zgodnie z normami TS-EN 1568-2 i NFPA 11 (1,13). Pianę gaśniczą przygotowano poprzez zmieszanie koncentratu piany w ilości 3% i wody w ilości 97%. W tablicy 6 przedstawiono badania wykonane na koncentracie piany i jego właściwości.

Tablica 5 / Table 5

## SKŁAD ZAPRAWY

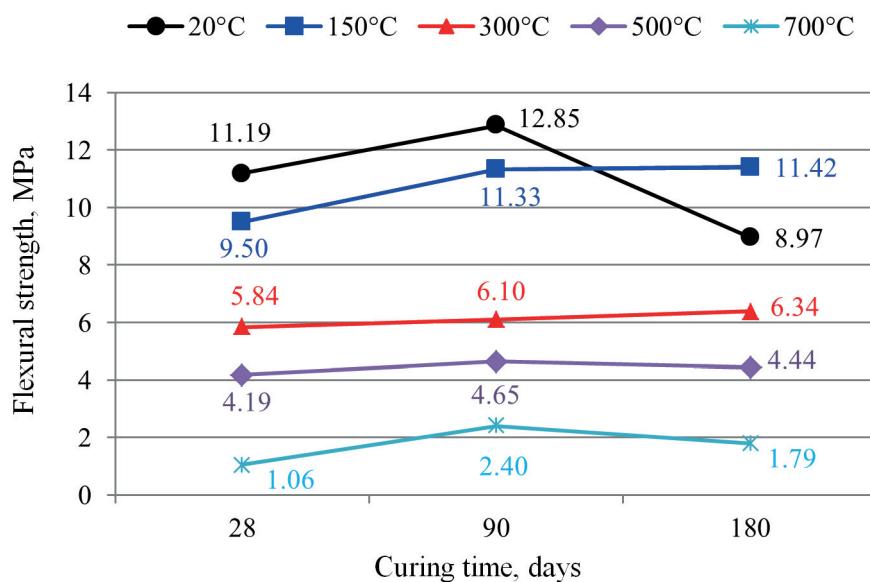
## MORTAR MIX PROPORTIONS

Składnik / Component	Zawartość / Content
Cement	450 g
Piaszek / Sand	1350 g
Woda / Water	225 g

do the final properties of the cement were used in the mortar mixtures. The material amounts used in the cement mortar mixture are shown in Table 5.

Mortar samples were cured at 20±2°C for 28, 90 and 180 days in a curing cabinet with a minimum 90% relative humidity. They were kept in a drying oven at 80°C for 24 hours before being placed in the high temperature furnace. To determine the effects of temperature, the MOS 180/8 type furnace was used [Fig. 1]. The heating rate was 10°C/min. The cement mortar samples were exposed to 20°C, 150°C, 300°C, 500°C and 700°C for 3 hours. Flexural strength and compressive strength tests were carried out according to the TS EN 196-1 standard “Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength” (12).

Cement mortars heated in a high temperature furnace were subjected to air, water and foam cooling. The foam concentrate used in the experiment was synthetic high-expansion foam obtained from the Ankara Metropolitan Fire Department. The foam is produced in facilities that comply with ISO 9001 Bureau Veritas and the UKAS Quality Management system in accordance with TS-EN 1568-2 and NFPA 11 standards (1,13). Firefighting foam was prepared by mixing 3% foam concentrate and 97% water. The tests performed on the foam concentrate and its properties are shown in Table 6.



Rys. 2. Zmiana wytrzymałości na zginanie w zależności od czasu dojrzewania próbek i temperatury

Fig. 2. Change of flexural strength with respect to curing time and temperature parameters

Tablica 6 / Table 6

## WŁAŚCIWOŚCI I WYNIKI BADAŃ KONCENTRATU PIANY LEKKIEJ

## HIGH EXPANSION FOAM CONCENTRATION PROPERTIES AND TEST RESULTS

Typ koncentratu piany / Foam Concentration Type	Sytetyczna – lekka / Synthetic-High Expansion		
Marka / Brand	Fatosin 1030-Fatsa Chemical		
Stężenie dozowania / Utilization Rate, %	3%		
Klasa ogniodziałania / Fire Class	A / B		
Właściwości technologiczne / Performance tests	Wyniki badań / Test results		Wymagania / Requirements
	Woda słodka Freshwater	Woda słona Salt water	
Próba ogniodziałania - Czas gaszenia Fire test -Extinguishing time, h:min	01:28	01:33	≤ 5:00
Expansion ratio / Współczynnik rozprężenia	800:1	750:1	≥ 200:1
współczynnik odwodnienia [15 min] Drainage ratio [15 min.], %	7%	10%	≤ 15%
Właściwości fizyczne / Physical Tests	Wyniki badań / Test results		Wymagania / Requirements
pH at [20°C], -	7.75		6.00 – 9.50
Gęstość / Density, g/ml,	1.038		1.03±0.01
Lepkość, Viscosity [20°C], mm <sup>2</sup> /s	9.50		≤ 30
Sedymentacja / Sedimentation, v/v, %	0.1		Max. 0.25
Temperatura utraty płynności / Pour point, °C	-15.50		≥ -15.00
Temperatura krzepnięcia / Freezing point, °C	-21.00		≥ -20.00
Rodzaj paliwa / Fuel type	Heptan / Heptane		
Można stosować z wodą słoną / Can be used with salt water			

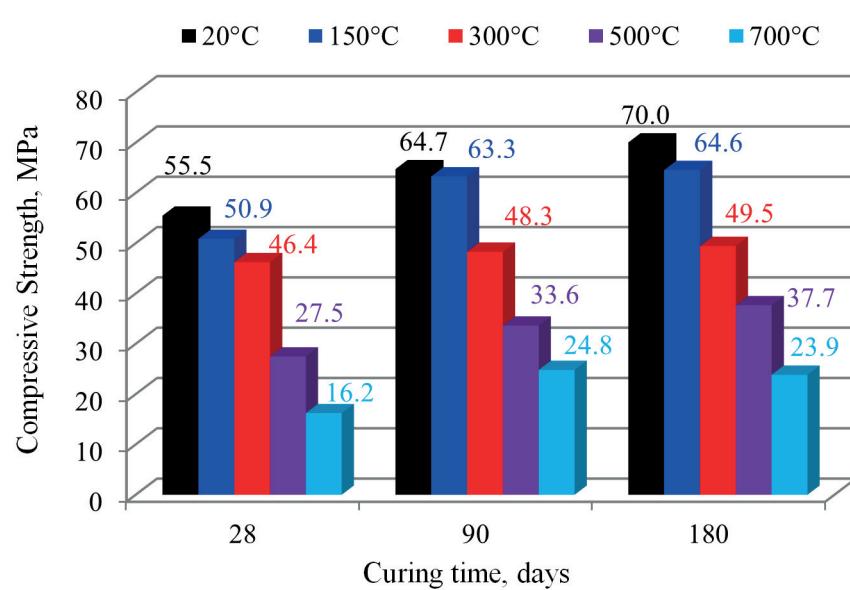
## 3. Wyniki

28-, 90- i 180-dniowe zaprawy cementowe wystawione na działanie temperatury 20°C, 150°C, 300°C, 500°C i 700°C przez 3 godziny a następnie schładzane syntetyczną pianą gaśniczą lekką. Następnie oznaczono wytrzymałości na zginanie i na ściskanie próbek, a wyniki przedstawiono na rys. 2 i 3. Badając krzywe przedstawione na rys. 2 widać, że wytrzymałość na zginanie malała wraz ze wzrostem temperatury. Wytrzymałość na zginanie po 90 dniach była większa od wartości wytrzymałości na zginanie po 28 dniach i 180 dniach i wynosiła 12,85 MPa w temperaturze 20°C, która następnie zmniejszyła się do 2,40 MPa w temperaturze 700°C, przy spadku wytrzymałości o 81%.

Analizując wykresy słupkowe przedstawione na rys. 3 widać, że wytrzymałość na ściskanie malała wraz ze wzrostem temperatury. Pierwsze nagłe spadki wytrzymałości na ściskanie zanotowano w temperaturze 300°C dla 28, 90 i 180 dni dojrzewania. Dla próbek 28-dniowych stwierdzono 17% utratę wytrzymałości na ściskanie, 25% dla próbek 90-dniowych i 29% dla próbek 180-dniowych. W drugiej części badań porównano trzy różne metody chłodzenia: pianą gaśniczą, wodę i chłod-

28-, 90- and 180-day cement mortars exposed to 20°C, 150°C, 300°C, 500°C and 700 °C for 3 hours were cooled with synthetic high expansion firefighting foam. Flexural strength and compressive strength of specimens were determined and the results are presented in Fig. 2 and 3. From the curves shown in Fig. 2 it can be seen that the flexural strength decreased with increasing temperature. The flexural strength after 90 days was higher than the values of the flexural strength after 28 and 180 days and amounted to 12.85 MPa at 20°C, which subsequently decreased to 2.40 MPa at 700°C, with a decrease in strength of 81%.

## 3. Results



Rys. 3. Zmiana wytrzymałości na ściskanie w zależności od czasu dojrzewania próbek i temperatury

Fig. 3. Change of compressive strength with respect to day and temperature parameters

dzenie powietrzem. Ze względu na to, że najwyższą wytrzymałość na ściskanie dla chłodzenia pianą gaśniczą uzyskano z próbek 180-dniowych, jako czas dojrzewania próbek przyjęto 180 dni. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

Można zauważyć, że wytrzymałość na zginanie przyjmowała najwyższe wartości w temperaturze 150°C dla chłodzenia powietrzem, wodą i pianą gaśniczą. Najwyższą wytrzymałość na zginanie [11,42 MPa] uzyskano dla chłodzenia pianą gaśniczą. Jak widać, wartości wytrzymałości na zginanie zmniejszyły się dla wszystkich trzech rodzajów chłodzenia w temperaturze 300°C i wyższej.

Analizując wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych wystawionych na działanie temperatury 150°C, 300°C, 500°C i 700°C, co przedstawiono na rys. 5, można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych chłodzonych powietrzem była większa niż próbek chłodzonych wodą i pianą gaśniczą. Za najlepszą metodę chłodzenia określono chłodzenie powietrzem. W przypadku próbek podgrzanych do temperatury 150°C wytrzymałość na ściskanie próbek chłodzonych wodą była o 1,2 MPa większa niż próbek chłodzonych pianą gaśniczą. Analizując wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych wystawionych na działanie temperatury 300°C, 500°C i 700°C, wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych chłodzonych pianą gaśniczą była wyższa niż próbek chłodzonych wodą. W przypadku próbki wystawionej na działanie 500°C chłodzenie pianą gaśniczą dało o 9% większą wytrzymałość niż chłodzenie wodą. Ustalono, że w zaprawach cementowych narażonych na działanie wysokiej temperatury pianą gaśniczą okazała się lepsza od chłodzenia wodą, a najlepszą metodą było chłodzenie powietrzem.

Na rys. 6 zaprezentowano wyniki badania szybkości przejścia impulsów ultradźwiękowych dla próbek zaprawy cementowej. Przy obliczaniu średniej prędkości impulsu ultradźwiękowego ( $V$ ) zastosowano następujące równanie:

$$V = \frac{L}{t} \cdot 10^6$$

gdzie:

$V$  = prędkość impulsu ultradźwiękowego, km/s,

$L$  = długość próbki, m

$t$  = czas przejścia impulsu, s (14).

Dla każdej temperatury wykorzystano po trzy próbki. Prędkość impulsu ultradźwiękowego wzrasta odwrotnie proporcjonalnie do porowatości zaprawy cementowej. Analizując wykres widać, że przy wzroście temperatury nastąpił spadek szybkości przejścia impulsu ultradźwiękowego. Te spadki w najmniejszym stopniu dotyczyły próbek zapraw cementowych schładzanych powietrzem, podobnie jak w przypadku ubytków wytrzymałości na ściskanie [rys. 6].

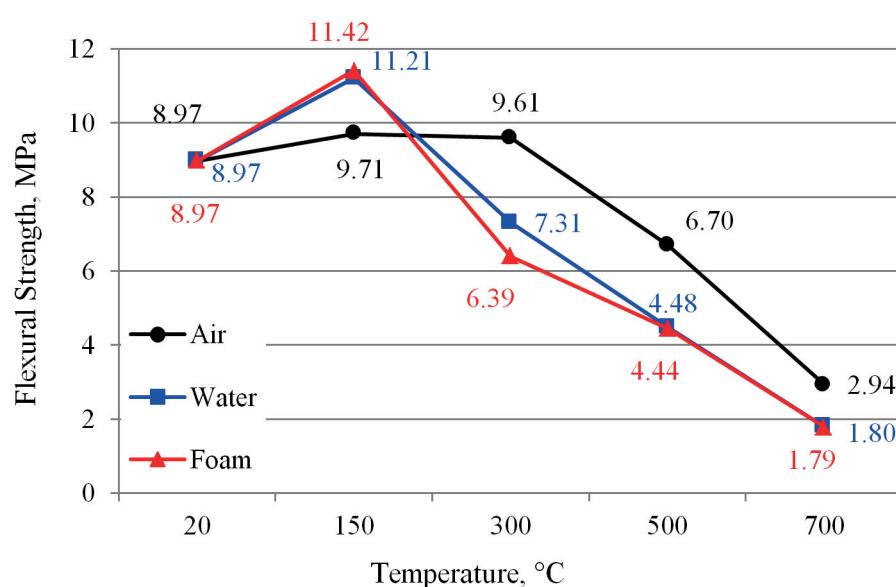
sive strength tests were carried out and results are shown in Figs. 2 and 3.

When examining the curves given in Fig. 2, it can be seen that the flexural strength decreased with increasing temperature. The 90-day flexural strength was higher than the 28-day and 180-day flexural strength values, and it was 12.85 MPa at 20°C, which then decreased to 2.40 MPa at 700°C, with a 81% strength loss.

When examining the bar charts given in Fig. 3, can be seen that the compressive strength decreased with increasing temperature. The first sudden compressive strength losses were observed at 300°C for 28, 90 and 180 days. A 17% loss of compressive strength was observed for 28-day samples, 25% for 90-day samples and 29% for 180-day samples. In the second part of the experiment, three different cooling methods, including firefighting foam, water and air cooling were compared. Because the highest compressive strength for cooling with firefighting foam was obtained from 180-day samples, 180 days was selected as the curing period. The results obtained are shown in Figs. 4 and 5.

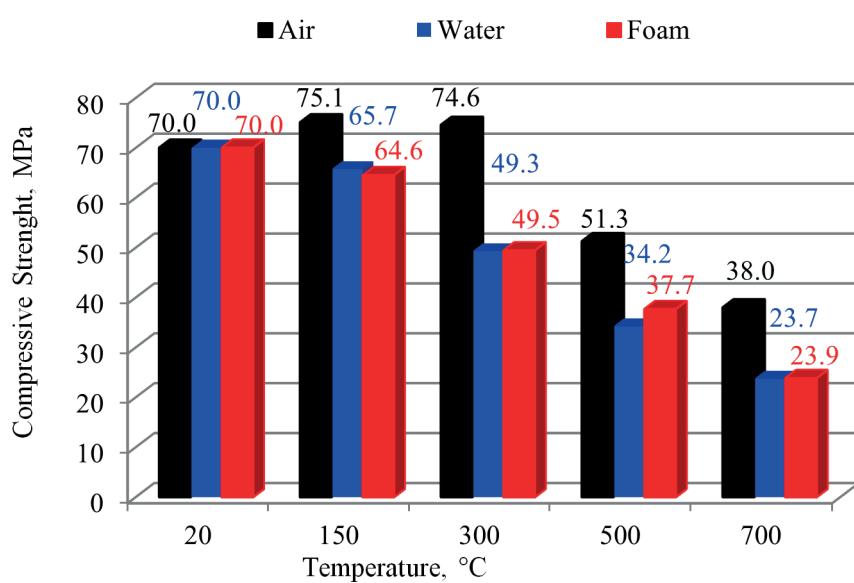
It can be seen that the flexural strength had the highest values at 150°C for air, water and firefighting foam cooling and the highest flexural strength [11.42 MPa] was achieved for firefighting foam cooling. It is seen that flexural strength values decreased in all three types of cooling at temperatures of 300°C and beyond.

When examining the compressive strengths of cement mortars exposed to 150°C, 300°C, 500°C and 700°C as shown in Fig. 5, it can be seen that the compressive strengths of cement mortars cooled with air were higher than those of the samples cooled with water and firefighting foam. The best cooling method was determined to be air cooling. When evaluating the samples heated at 150°C, the compressive strength of the samples cooled with water was 1.2 MPa higher than those of samples cooled with firefighting foam. When examining the compressive strengths of cement mor-



Rys. 4. Wpływ rodzaju środka chłodzącego i temperatury na wytrzymałość na zginanie

Fig. 4. Effects of cooling types and temperatures on flexural strength



Rys. 5. Wpływ różnych rodzajów środka chłodzącego i temperatury na wytrzymałość na ściskanie

Fig. 5. Effects of different cooling types and temperatures on compressive strength

Po schłodzeniu zapraw wystawionych na działanie wysokiej temperatury ponownie zmierzono ich masy i określono procentowy ubytek masy. Na rys. 7 można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury procentowy ubytek masy wzrastał wprost proporcjonalnie. Zaprawy cementowe chłodzone powietrzem charakteryzowały się minimalnym procentowym ubytkiem masy. Natomiast w temperaturze 500°C i 700°C największy procentowy ubytek masy zaobserwowano w przypadku metody chłodzenia wodą. Stosownie do powyższego uznano, że chłodzenie pianą gaśniczą w wysokich temperaturach, tj. 500°C i 700°C może być lepszą metodą w porównaniu z chłodzeniem wodą. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych chłodzonych pianą gaśniczą była większa niż próbek chłodzonych wodą.

Po schłodzeniu zapraw cementowych pobrano próbki rdzeniowe o wymiarach 2,5×4 cm w celu ustalenia obrazu wnętrza. Jak można zauważyć na rys. 8, w temperaturze 300°C zanotowano pęknięcia i naprężenia, w temperaturze 500°C wykruszanie, a w temperaturze 700°C zerwania i wybuchy. Przy wzroście temperatury poszerzały się szczeliny na zaprawie cementowej i zanotowano, że zaprawa cementowa nabierała różowego koloru w miarę wzrostu temperatury do 300°C i więcej. Po usunięciu próbek z pieca wysokotemperaturowego występowały dźwięki naprężeniowe.

Analizując obrazy mikroskopowe próbek zaprawy dojrzewającej w temperaturze 20°C [rys. 9], zanotowano występowanie mikropęknięć i małych szczelin.

Stwierdzono, że w temperaturze 300°C próbki schładzane powietrzem i wodą rozszerzały się wraz ze wzrostem temperatury, a szczeliny stopniowo się powiększały [rys. 10 i 11].

For samples exposed to 300°C, 500°C and 700°C, the compressive strength of cement mortars cooled with firefighting foam was higher than those of samples cooled with water. For the sample exposed to 500°C, cooling with firefighting foam yielded 9% higher strength than water cooling did. It was concluded that in cement mortars exposed to high temperature, firefighting foam was better than water cooling, and the best method was air cooling.

Fig. 6 shows ultrasonic pulse velocity results for 180-days mortar samples. In calculating the average ultrasonic pulse velocity [V], the following equation was used:

$$V = \frac{L}{t} \cdot 10^6$$

where:

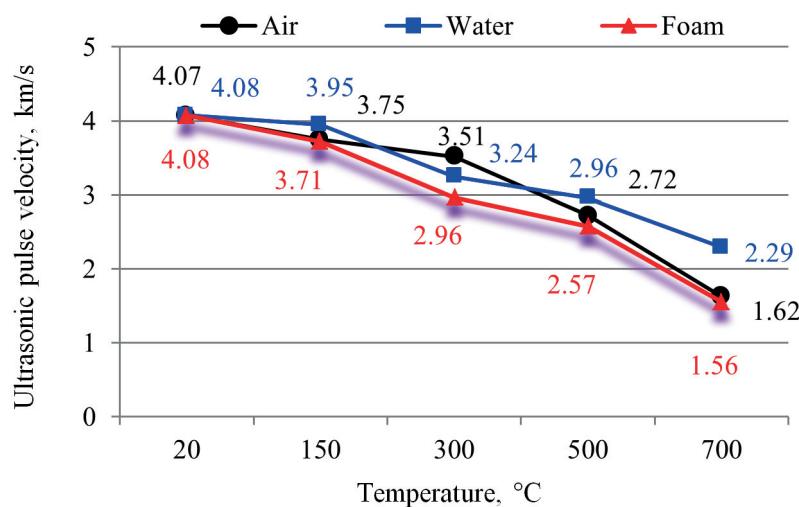
V = ultrasonic pulse velocity, km/s,

L = the path length, m,

t = the time of travel, s (14).

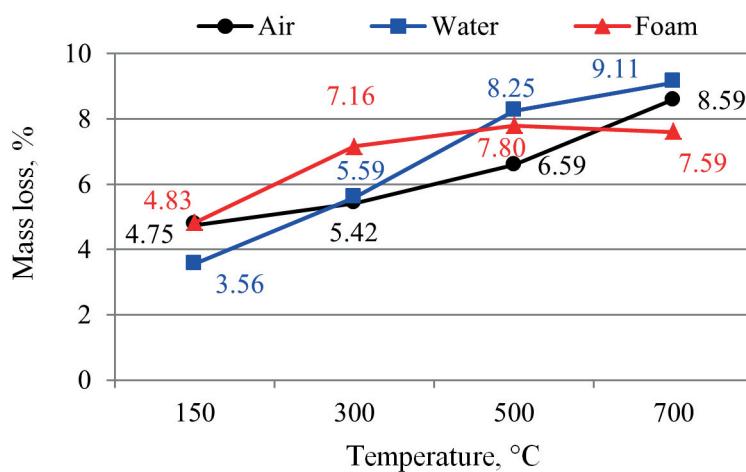
Three samples were used for each temperature. Ultrasonic pulse velocity increases inversely with the amount of voids in the cement mortar. When the graph is examined, it is seen that there was a decrease in the ultrasonic pulse velocity when temperature increased. These decreases occurred least in the 180-days mortar samples with air cooling, as in the case of compressive strength losses [Fig. 6].

After cooling of cement mortars exposed to high temperature, their mass was measured again and mass loss percentages were determined. It is seen in Fig. 7 that as temperature increased, mass loss percentages increased directly in proportion. The cement mortars with air cooling had minimum weight loss percentage. At 500°C and



Rys. 6. Prędkości przejścia impulsów ultradźwiękowych dla zapraw cementowych poddanych działaniu wysokiej temperatury

Fig. 6. Ultrasonic pulse velocity results for cement mortars exposed to high temperature



Rys. 7. Wpływ wysokiej temperatury i sposobu chłodzenia na zmianę masy zapraw cementowych

Fig. 7. Effects of high temperature and cooling method on mass changes of cement mortars

W przypadku próbek zapraw wygrzewanych w temperaturze 300°C, chłodzonych pianą, mikropęknięcia zmniejszyły się i zauważono, że powierzchnia nie jest tak szorstka w porównaniu z próbками chłodzonymi powietrzem i wodą, bowiem syntetyczna piana lekka pokryła powierzchnię zaprawy na zasadzie warstwy filmu [rys.12].

W temperaturze 700°C, we wszystkich próbkach przy zastosowaniu chłodzenia powietrzem, wodą i pianą, znacznie wzrosły mikropęknięcia, zaobserwowano deformacje na powierzchni zaprawy i znacznie wzrosła porowatość [rys. 13-15].

#### 4. Wnioski

Zaprawy cementowe wystawione na działanie wysokiej temperatury chłodzone powietrzem uzyskały większą wytrzymałość na ściskanie niż przy chłodzeniu wodą lub pianą.

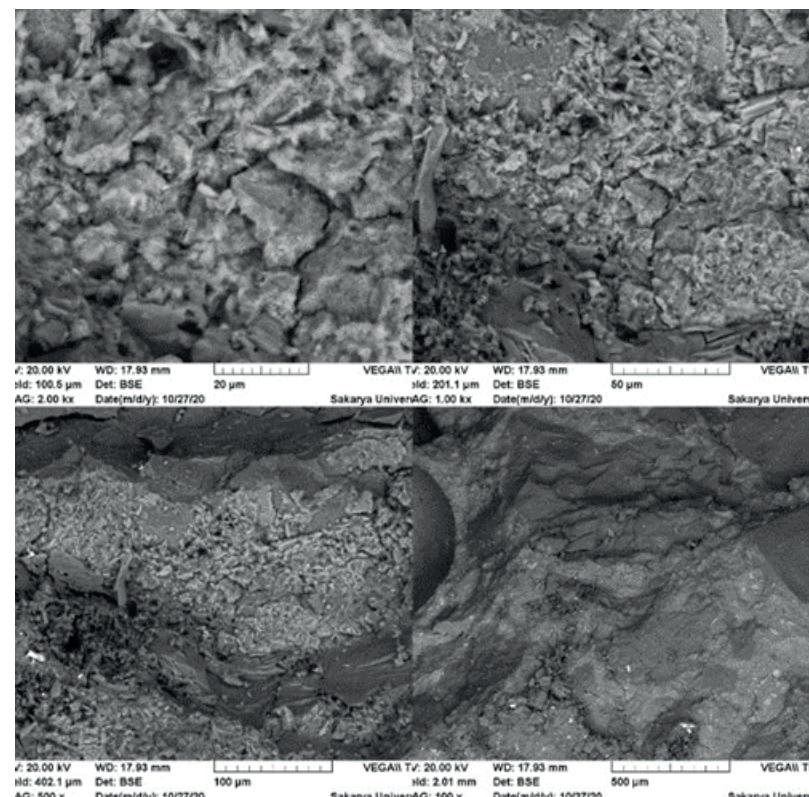
Analizując wytrzymałość na ściskanie 180-dniowych zapraw cementowych wystawionych na działanie temperatury 300°C, 500°C i 700°C, stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych chłodzonych pianą gaśniczą była większa niż próbek chłodzonych wodą. Określono, że próbki poddane działaniu temperatury 500°C, chłodzone pianą gaśniczą dały o 9% większą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu do chłodzenia wodą. Zanotowano, że w temperaturze 300°C i wyższej wytrzymałość na zginanie dla wszystkich trzech rodzajów chłodzenia uległa zmniejszeniu.

Zaprawy cementowe chłodzone pianą gaśniczą wykazały 7% spadek wytrzymałości w temperaturze 150°C, 29% spadek wytrzymałości w temperaturze 300°C, 46% w temperaturze 500°C i 66% w temperaturze 700°C. Wraz ze wzrostem temperatury następował spadek wytrzymałości na zginanie.



Rys. 8. Chłodzone rdzenie z zaprawy z cementu portlandzkiego

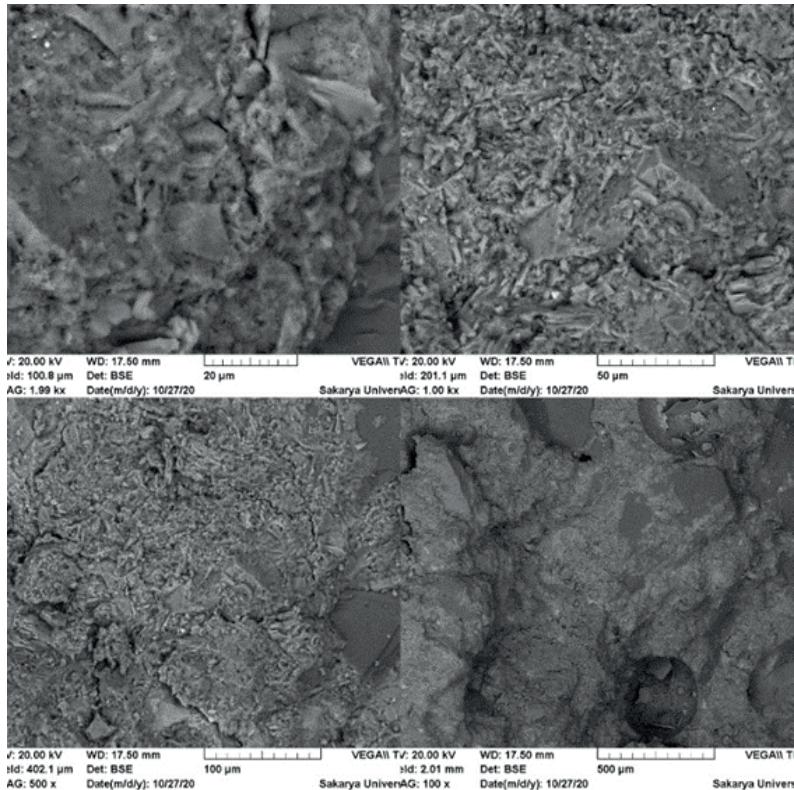
Fig. 8. Cooled Portland cement mortar cores



Rys. 9. Obrazy mikroskopowe zaprawy z cementu portlandzkiego [20°C]

Fig. 9. SEM images of Portland cement mortar [20°C]

700°C, the highest mass loss percentage was observed with the water cooling method. Accordingly, it was concluded that cooling with firefighting foam at high temperatures [500°C and 700°C] could be a better method when compared to water cooling. The compressive strength of cement mortars cooled with firefighting foam was higher than those samples cooled with water because of the lower porosity ratio.



Rys. 10. Obrazy mikroskopowe zaprawy chłodzonej powietrzem [300°C]

Fig. 10. SEM images of air-cooled mortar [300°C]

Minimalną ilość pustych przestrzeni oznaczono w metodzie chłodzenia powietrzem, a największy procentowy ubytek masy wystąpił w temperaturze 500°C i 700°C przy metodzie chłodzenia wodą. Zauważono, że po przekroczeniu 300°C kolor próbek zaprawy zmieniał się na różowy.

W zaprawie cementowej wystawionej na działanie temperatury 300°C przy chłodzeniu pianą zmniejszyły się mikropęknięcia, ponieważ pianka lekka pokryła powierzchnię zaprawy niczym warstwa filmu i zanotowano mniejszą chropowatość powierzchni w porównaniu z próbami chłodzonymi powietrzem i wodą.

## Literatura / References

- TS EN 1568-2, Fire extinguishing media-foam concentrates-part 2: specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids, Turkish Standard Institution, Ankara, Turkey, 2018.
- J. Piasta, Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste. Mater. Struct. **17**, 415–420, (1984). <https://doi.org/10.1007/BF02473981>
- M.S. Akman, Building damages and repair principles. Turkish Chamber of Civil Engineers, Istanbul, Turkey, 2000.
- N. Yuzer, F. Akoz, L. Ozturk, Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature. Cem. Concr. Res. **34** (10), 1803-1807, (2004). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.015>
- P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials. Indian Concrete Institute, Chennai, 1997.

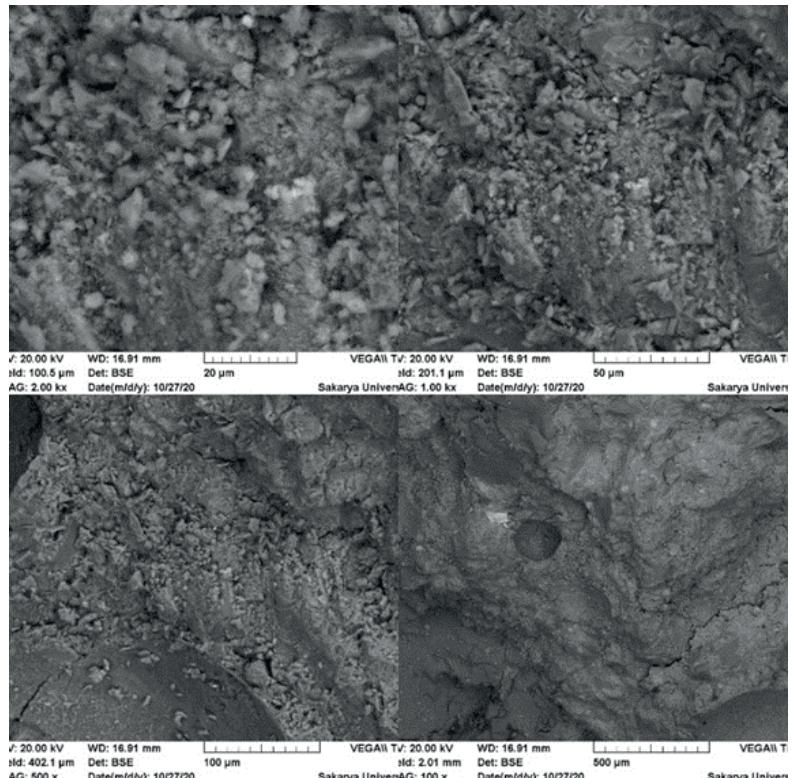
After cooling the cement mortars, core samples of 2.5×4 cm were taken to determine the interior view. As can be seen in Fig. 8, cracks and stresses were observed at 300°C, spalling at 500°C, and ruptures and explosions at 700°C. As temperature increased, the gaps on the cement mortar widened, and it was observed that the cement mortar became pink as the temperature was increased to temperatures of 300°C and beyond. When the test samples were removed from the high temperature furnace, stress sounds occurred.

When examining the SEM images of Portland cement mortar samples cured at 20°C, which were obtained at different magnifications, as shown in Fig. 9, thin micro cracks and small gaps were observed.

It was seen that samples cooled from 300°C by air and water expanded with temperature increases and the gaps gradually increased [Figs. 10 and 11].

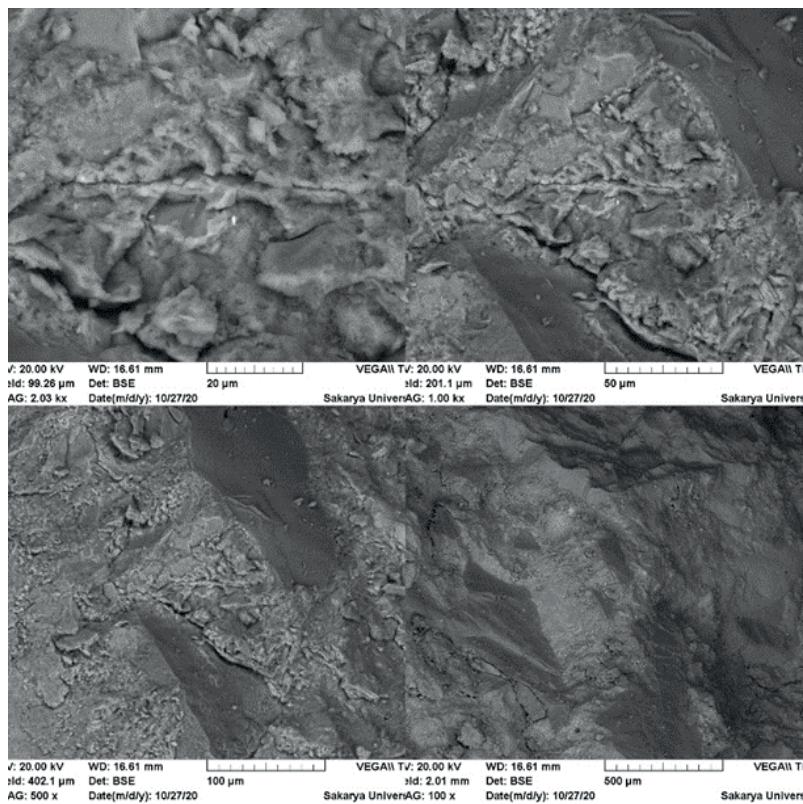
For the mortar samples heated at 300°C, with foam cooling applied, microcracks decreased and the surface was observed to be not as rough compared to the samples cooled with air and water because the synthetic high-expansion foam covered the mortar surface with like a film layer [Fig.12].

At 700°C, in all samples [cooled with air, water and foam] number of microcracks significantly increased, deformations were observed on the mortar surface and porosity increased considerably [Figs. 13-15].



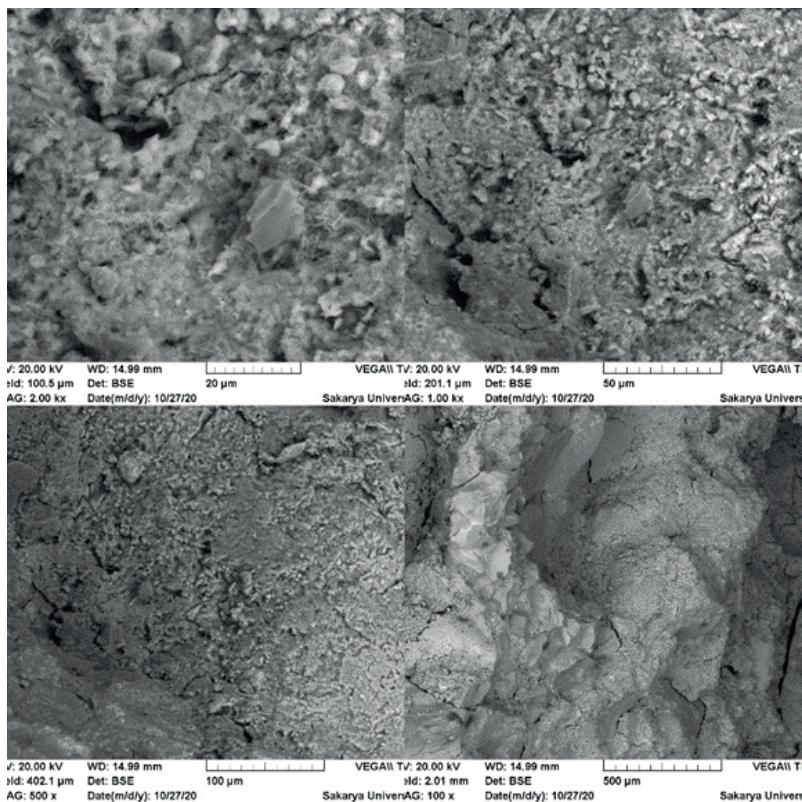
Rys. 11. Obrazy mikroskopowe zaprawy chłodzonej wodą [300°C]

Fig. 11. SEM images of water-cooled Portland cement mortar [300°C]



Rys. 12. Obrazy mikroskopowe zaprawy chłodzonej pianą [300°C]

Fig. 12. SEM images of foam-cooled Portland cement mortar [300°C]



Rys. 13. Obrazy zaprawy chłodzonej powietrzem [700°C]

Fig. 13. SEM images of air-cooled Portland cement mortar [700°C]

#### 4. Conclusions

Based on experiments performed, the following conclusions may be drawn.

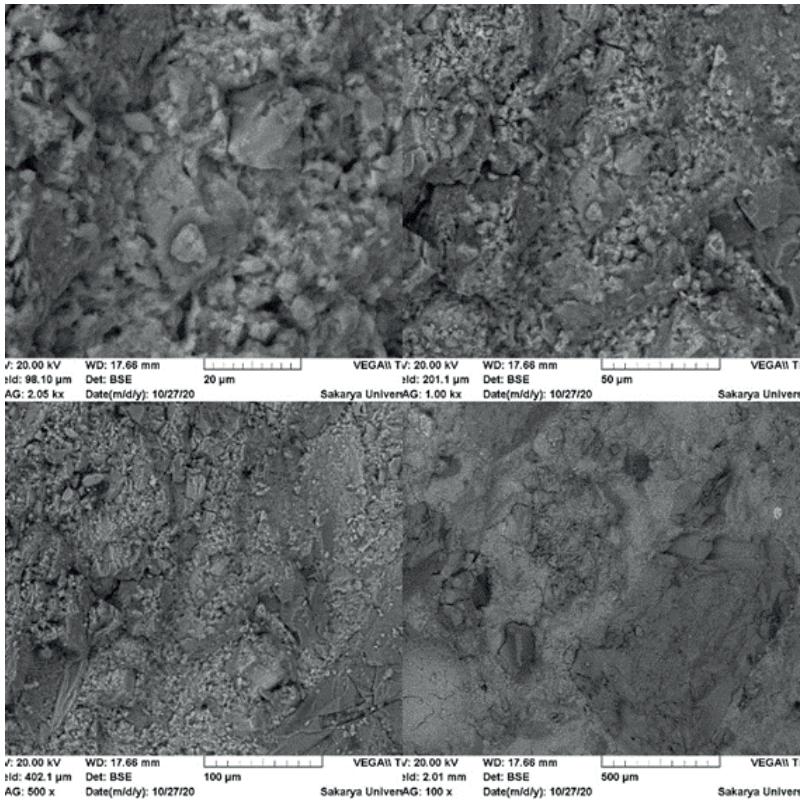
Mortar samples exposed to high temperature subjected to air cooling achieved higher compressive strength than water or foam cooled.

When examining the compressive strength of 180-days cement mortars exposed to 300°C, 500°C and 700°C, it was found that the compressive strength of the cement mortars cooled with firefighting foam was higher than those of the samples cooled with water. It was determined that for samples exposed to 500°C, cooling with firefighting foam yielded 9% higher compressive strength compared to water cooling. It was observed that at temperatures of 300°C and beyond, the flexural strengths of all three cooling types decreased.

180-day mortar cements cooled with firefighting foam showed an 8% strength loss at 150°C, 29% strength loss at 300°C, 46% at 500°C, and 66% at 700°C. As temperature increased, the flexural strength decreased.

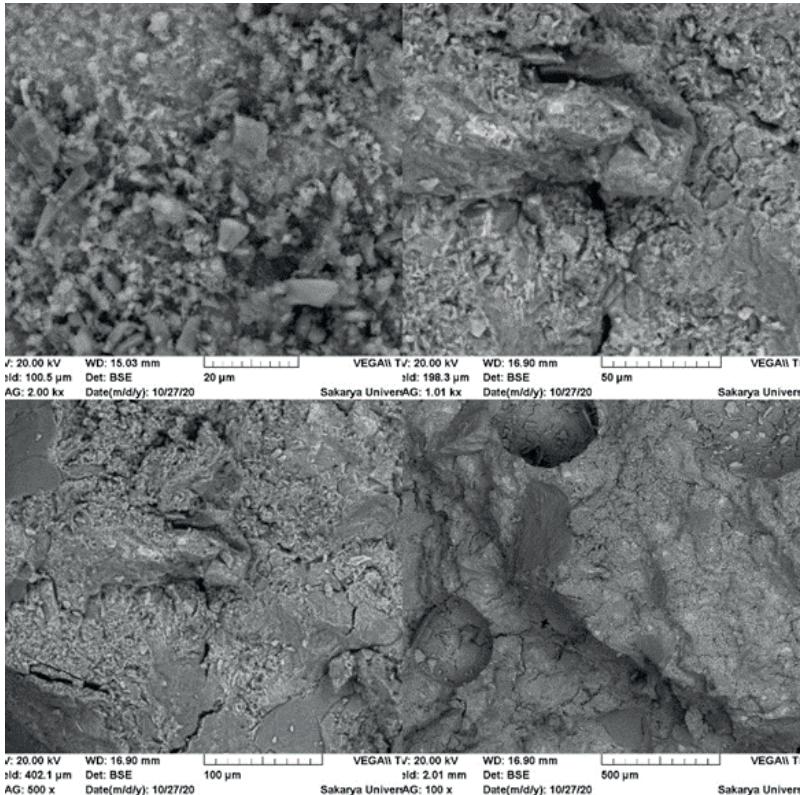
Minimum void content was determined in the air cooling method and the highest mass loss percentage occurred at 500°C and 700°C with the water cooling method. It was observed that the colour of mortar samples turned pink beyond 300°C.

In the cement mortar exposed to 300°C with foam cooling, the number of microcracks decreased because of the high expansion foam covering the mortar surface like a film layer and a less rough surface was observed compared to the samples cooled with air and water.



Rys. 14. Obrazy mikroskopowe zaprawy chłodzonej wodą [700°C]

Fig. 14. SEM images of water-cooled Portland cement mortar [700°C]



Rys. 15. Obrazy mikroskopowe zaprawy chłodzonej pianą [700°C]

Fig. 15. SEM images of foam-cooled Portland cement mortar [700°C]

6. S. Aydin, B. Baradan, Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. *Cem. Concr. Res.* **37** (10), 988-995, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.005>

7. S. Aydin, Development of a high temperature resistant mortar by using slag and pumice. *Fire Saf. J.* **43** (8), 610-617, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.02.001>

8. N. Khurram, K. Khan, M.U. Saleem, M.N. Amin, U. Akmal, Effect of elevated temperatures on mortar with naturally occurring volcanic ash and its blend with electric arc furnace slag. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2018**, 5324036, (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/5324036>

9. Karahan O., Durak U., Ilkentapar S., Atabey I.I., Atis C.D., Resistance of polypropylene fibered mortar to elevated temperature under different cooling regimes, *Revista De La Construcción* **18**, 386-397, (2019). <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.386>

10. M.M. Shoib, S.A. Ahmed, M.M. Balaha, Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars. *Cem. Concr. Res.* **31** (11), 1533–1538, (2001). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00561-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00561-0)

11. M. A. Abd El Aziz, S. Abdelaleem, M. Heikal, Coupled effect of elevated temperature and cooling conditions on the properties of ground clay brick mortars. *Slovak J. Civil Eng.* **21** (4), 41-50, (2013). <https://doi.org/10.2478/sjce-2013-0020>.

12. TS EN 196-1, Methods of testing cement—part 1: determination of strength, Turkish Standard Institution, Ankara, 2016.

13. NFBA 11, Standard for low, medium and high-expansion foam, National Fire Protection Association, USA, 2016.

14. TS EN 12504-4, Testing concrete - Part 4: determination of ultrasonic pulse velocity, Turkish Standard Institution, Ankara, 2012.

i