

## Właściwości mechaniczne cementu fosforanowo-magnezowego z dodatkiem włókien bazaltowych

### Mechanical properties of magnesium phosphate cement incorporating basalt fibers

**Ahmet Onur Pehlivan**

Department of Civil Engineering, Maltepe University, Istanbul, Turkey

e-mail: [onurpehlivan@maltepe.edu.tr](mailto:onurpehlivan@maltepe.edu.tr)

#### Streszczenie

W pracy badano wpływ włókien bazaltowych na właściwości mechaniczne cementu fosforanowo-magnezowego [CFM]. Mierzono wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości. Stwierdzono, że właściwości mechaniczne ulegają znacznej poprawie wraz z dodatkiem pyłu krzemionkowego, a szczególnie wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i zginanie, zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości włókien bazaltowych. W przypadku mieszanek bez dodatku pyłu krzemionkowego duża zawartość włókien wpływała niekorzystnie na właściwości mechaniczne. Stwierdzono, że dodatek pyłu krzemionkowego wyraźnie zwiększa wiązanie włókien bazaltowych z matrycą CFM. W związku z tym, łączne zastosowanie pyłu krzemionkowego i włókien bazaltowych, okazało się skuteczne. Stwierdzono, że w mieszankach bez pyłu krzemionkowego stosunek molowy magnezji do diwodorofosforanu amonu wynoszący 8, daje lepsze wyniki w porównaniu ze stosunkiem masowym 6. Różnica ta nie była zbyt widoczna po dodaniu do obu mieszanek pyłu krzemionkowego.

**Słowa kluczowe:** cement fosforanowo-magnezowy, pył krzemionkowy, włókna bazaltowe, moduł sprężystości

#### Summary

In this experimental study, the effect of basalt fibers on the mechanical properties of magnesium phosphate cement [MPC] was investigated. Compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength and modulus of elasticity, were introduced. It was observed that mechanical properties were significantly enhanced with the addition of silica fume, especially splitting tensile and flexural strength were enhanced with the increase of basalt fibers. However, for mixtures without silica fume addition, high content of fibers adversely affected the mechanical properties. Silica fume addition was found to be significant in increasing the bonding mechanism between basalt fibers and the MPC matrix. Thus, combined usage of silica fume and basalt fibers was found to be effective. A molar ratio of magnesia to ammonium dihydrogen phosphate of 8 was observed to have better results with respect to a molar ratio of 6, however, this distinction was not very apparent, when silica fume was added to both mixtures.

**Keywords:** magnesium phosphate cement, silica fume, basalt fibers, modulus of elasticity

#### 1. Wprowadzenie

Cement fosforanowo-magnezowy [CFM] jest nowym rodzajem materiału wiążącego, składającego się z całkowicie wypalonego tlenku magnezu i fosforanu oraz domieszek opóźniających (1, 2). CFM jest specjalnym materiałem wiążącym, który może być używany jako materiał do szybkich napraw, w wielu zastosowaniach (3,4). CFM powstaje w wyniku reakcji magnezji z rozpuszczalnym kwaśnym fosforanem, którym może być fosforan amonu, potasu

#### 1. Introduction

Magnesium phosphate cement [MPC] is a new kind of acid-based cementitious material composed of dead burned magnesium oxide with phosphate source and also a retarding additive (1, 2). MPC is a special cementing material that can be used as a fast repair material, for several applications (3,4). MPC is formed by an acid-base reaction of magnesia and a soluble acid phosphate which may be ammonium, potassium, or sodium phosphate and the final

lub sodu, a produktem końcowym jest sól fosforanu magnezu, o właściwościach wiążących (5, 6). CFM ma kilka zalet, takich jak szybkie wiązanie i dobra przyczepność do innych materiałów, z utworzeniem kompozytów o wysokiej jakości. W związku z tym, stosowanie CMF może być szeroko rozpowszechnione, a czynniki wpływające na jego właściwości powinny być dobrze poznane, aby wdrożyć szersze zastosowanie tego materiału w inżynierii lądowej. W ciągu ostatnich dziesięcioleci wielu badaczy prowadziło badania nad cementami magnezowo-fosforanowymi wzmocnionymi włóknami, w celu zwiększenia odkształcalności tych szybkowiązających materiałów i poprawy ich właściwości mechanicznych, głównie wytrzymałości. Ze względu na to, że CFM jest materiałem bardzo kruchym, powinien zawierać odpowiednie wzmocnienia, a szczególnie włókno bazaltowe, które jest ekologicznym rodzajem włókna i jest bardzo praktyczne w kompozytach takich jak CFM (7-9).

## 2. Materiały

Zaprawy CFM przygotowano przez dodanie całkowicie wypalanej magnezji i diwodorofosforanu amonu [DWFA], w różnych stosunkach molowych. Dodawano również popiół lotny i pył krzemionkowy, ponieważ te materiały przyczyniły się do uzyskania bardziej zwartej mikrostruktury matrycy w mieszankach CFM. Do przygotowania próbek zapraw użyto piasku rzecznoego o maksymalnej średnicy 2 mm oraz wody wodociągowej. Do zbrojenia mieszanek zastosowano włókna bazaltowe o długości 12 mm i średnicy od 9 do 23 mm. Właściwości składników CFM podano w tablicy 1, a właściwości włókien bazaltowych podano w tablicy 2.

## 3. Metody

Zaprawy CFM przygotowano mieszając w mieszalniku Hobart proszek MgO, diwodorofosforan amonu [DWFA], popiół lotny [PL], pył krzemionkowy [PK] i włókna bazaltowe [WB]. Zastosowano dwa różne współczynniki molowe MgO do DWFA: 6 i 8, dwa różne dodatki pyłu krzemionkowego: 0 i 5% w stosunku do sumy mas MgO, DWFA i popiołu lotnego. Włókna bazaltowe dodawano w ilości 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1% masy zaprawy. Boraks został użyty jako materiał zmniejszający ilość wody, aby ułatwić proces mieszania. Popiół lotny dodano jako 20% całkowitej ilości MgO i DWFA, a boraks jako 10% użytego proszku MgO. Próbki zaprawy

product is a magnesium phosphate salt, with cementing abilities (5, 6). MPC has several advantages like quick setting and good bonding with other materials, creating composites of high quality. Thus, the use of such an efficient material should be widely spread and parameters that govern the overall characteristics should be well understood, to implement wider use of this material in civil engineering applications. Fiber-reinforced magnesium phosphate cements are under investigation by many researchers in the last decades, to increase the strain capacity of these rapid setting materials and increase mechanical properties such as toughness. Since MPC demonstrates a highly brittle character, it should be donated with appropriate reinforcements such as basalt fiber which is a green type of fiber and highly practical in composites such as MPC (7, 8, 9).

## 2. Materials

MPC mortars were prepared by adding dead burned magnesia and ammonium dihydrogen phosphate [ADP], with different molar ratios. Fly ash and silica fume were also incorporated as additional binders, since these materials have been helpful for the denser matrix microstructure of MPC mixtures. River sand with a maximum diameter of 2 mm and tap water were used for mortar preparation. Basalt fibers of 12 mm fiber length with a diameter between 9 and 23 mm were used to reinforce the plain mixtures. Properties of MPC ingredients are given in Table 1 and properties of basalt fibers are given in Table 2.

## 3. Experimental Methods

MPC mortars were cast by adding MgO powder, mono ammonium dihydrogen phosphate [ADP], fly ash [FA], silica fume [SF] and basalt fibers [BF] in a Hobart mixer device. Two different MgO/ADP molar ratios: 6 and 8, two different SF ratios: 0 and 5% and five different basalt fiber ratios: 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1% were implemented. Borax was used as water reducing agent to ease the mixing process. Fly ash was selected as 20% of the total MgO and ADP and also borax was selected as 10% of the MgO powder used. Mortar specimens were prepared with a mix proportioning of 1:0.18:0.5 by mass of MPC, water and sand, respectively. Mixture compositions are given in Table 3. MPC is the sum of MgO, ADP, fly ash, borax, silica fume and basalt fibers.

Tablica 1 / Table 1

### SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI SUROWCÓW

### PROPERTIES AND COMPOSITION OF RAW MATERIALS

Composition / Skład, %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	Density / Gęstość, kg/m <sup>3</sup>
Magnesia / Magnezja	3.9	2.3	1.2	1.3	90.9	-	-	-	-	3450
Fly Ash / Popiół lotny	52.5	26.5	6.8	2.2	2.0	0.2	0.38	4.2	3.3	2380
Silica Fume / Pył krzemionkowy	96.3	0.91	0.42	0.78	0.43	-	-	-	1.2	
ADP / DWF	> 99% (NH <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )									
Borax / Boraks	> 98% Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>									

przygotowano w proporcji 1:0,18:0,5 masy odpowiednio CFM, wody i piasku. Skład mieszanki podano w tablicy 3.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKIEN BAZALTOWYCH

PROPERTIES OF BASALT FIBERS

Diameter Średnica, µm	Length Długość, mm	Tensile Strength Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Elastic modulus Moduł sztywności, GPa	Density Gęstość, kg/m <sup>3</sup>
9-23	12	4840	89	2700

Suchą mieszankę przygotowano przez dodanie wszystkich składników, z wyjątkiem wody i włókien bazaltowych i mieszano mieszadłem Hobart o pojemności 10 L, przez 2 minuty w postaci suchej. W ciągu 30 sekund do mieszanki stopniowo dodawano wodę, a proces mieszania kontynuowano jeszcze przez 90 sekund. Następnie w ciągu 60 sekund stopniowo dodawano do mieszanki włókna, aby zapewnić odpowiednią dyspersję i zapobiec segregacji mieszanki, a następnie kontynuowano mieszanie przez kolejne 60 sekund, w celu uzyskania jednorodnej matrycy i zintegrowania włókien. Procedurę mieszania zakończono po 6 minutach mieszania. Nomenklatura identyfikacyjna próbek została skonstruowana w sposób ułatwiający jej zrozumienie. Dla przykładu, symbol M na początku, oznacza stosunek molowy mieszanki, symbol S oznacza ilość pyłu krzemionkowego, natomiast symbol BF oznacza ilość włókien bazaltowych w dziesięciotysięcznych częściach masy mieszanki CFM. Tak więc oznaczenie M6S5BF50 oznacza skrót od mieszanki o stosunku molowym MGO/ DWFA 6 i zawartości 5% pyłu krzemionkowego oraz 0,5% włókna bazaltowego w masie zaprawy.

The dry mixture was prepared by adding all the ingredients except the water and basalt fibers and the mixture was stirred in a 10 L capacity Hobart mixer, for 2 minutes in dry form. Water was added gradually into the mix for 30 seconds and the mixing process was continued for 90 seconds more. Afterward, fibers were added gradually into the mix in 60 seconds, to supply adequate dispersion and prevent instant plunging of the mix and mixing was continued for 60 seconds more, to supply homogeneous matrix and fiber integration. The mixing procedure was finished after a total of 6 minutes stirring process. Specimen identification nomenclature was constructed to easy comprehension. For example, M symbol in the start demonstrates the molar ratio of the mix, S symbol resembles the silica fume amount in mass% in respect to the mass of MgO+ADP+FA, whereas BF symbol declares the amount of basalt fibers by ten-thousandths by mass of the whole MPC mixture. Thus, M6S5BF50 tag abbreviates a mixture with a molar ratio of 6 and silica fume of 5% and 0.5% basalt fiber by mass.

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY MIESZANEK

MIXTURE COMPOSITIONS

	MgO / ADP Molar ratio Stosunek molowy MgO do DWF	MgO	ADP DWF	Fly Ash Popiół lotny	Borax Boraks	Silica Fume Pył krzemionkowy	Basalt Fiber Włókna bazaltowe	Sand Piasek	Water Woda
Unit / Jednostka	-	g							
M6	6	1000	475	369	100	0	0	972	350
M6S0BF25	6	1000	475	369	100	0	8.20	1015	365
M6S0BF50	6	1000	475	369	100	0	16.48	1061	382
M6S0BF75	6	1000	475	369	100	0	24.81	1112	400
M6S0BF100	6	1000	475	369	100	0	33.23	1168	420
M6S5BF0	6	1000	475	369	100	92	0	1018	367
M6S5BF25	6	1000	475	369	100	92	8.59	1063	383
M6S5BF50	6	1000	475	369	100	92	17.25	1112	400
M6S5BF75	6	1000	475	369	100	92	25.98	1165	419
M6S5BF100	6	1000	475	369	100	92	34.78	1224	440
M8	8	1000	356	339	100	0	0	898	323
M8S0BF25	8	1000	356	339	100	0	7.58	937	337
M8S0BF50	8	1000	356	339	100	0	15.21	980	353
M8S0BF75	8	1000	356	339	100	0	22.91	1027	370
M8S0BF100	8	1000	356	339	100	0	30.68	1079	388
M8S5BF0	8	1000	356	339	100	85	0	940	338
M8S5BF25	8	1000	356	339	100	85	7.93	981	353
M8S5BF50	8	1000	356	339	100	85	15.92	1026	369
M8S5BF75	8	1000	356	339	100	85	23.98	1076	387
M8S5BF100	8	1000	356	339	100	85	32.12	1130	407

### 3.1. Liczba próbek

Łącznie przygotowano 20 mieszanek. Do prób ściskania i zginania zaformowano próbki o wymiarach 40 x 40 x 160 mm. Próbki o wymiarach 40 x 40 x 40 mm wykorzystano do oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Każda próbka była zagęszczana na stole wibracyjnym, tak, aby wszystkie mieszanki z włóknami były jednorodne. Wszystkie próbki przechowywano w komorze o stałej temperaturze  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej  $55 \pm 5\%$ . Formy stalowe przenoszono do komory dojrzewania bezpośrednio po zaformowaniu, a próbki wyjmowano z form po 4 godzinach od zaformowania.

### 3.2. Metody badań

Ciekłość świeżych mieszanek CFM mierzono zgodnie ze specyfikacjami zawartymi w normie ASTM C1437-15 (10). Mieszanek dodawano do formy o wysokości 50 mm umieszczonej na stoliku potrząsalnym, w dwóch warstwach i każdą z nich zagęszczano 20 uderzeniami elementu zagęszczającego. Po podniesieniu formy wykonano badanie rozplywu za pomocą stolika potrząsalnego, stosując 25 wstrząsów stolika, w czasie 15 s. Średnice rozplywu świeżej mieszanki mierzono wzdłuż dwóch prostopadłych do siebie kierunków, a rozplyw zapraw określano na podstawie średniej ze zmierzonych średnic. Wyniki podano jako stosunek średnicy rozplywu do średnicy dna formy, w procentach.

Wytrzymałość mieszanek CFM po 28 dniach na ściskanie i zginanie określono na podstawie badań, przeprowadzonych w oparciu o normę EN 196-1 (11). Rozpoczynając badanie wytrzymałości na zginanie próbek CFM, przeprowadzono trypunktowe zginanie na próbkach belek z wykorzystaniem serwo-hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej MTS, z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. Wszystkie próbki poddano obciążeniu zginającemu z kontrolowanym przemieszczeniem z prędkością 0,5 mm/min, przy odległości podpór wynoszącej 120 mm. Dane dotyczące przemieszczeń pionowych uzyskano dzięki zastosowaniu dwóch transformatorowych czujników przemieszczeń liniowych, umieszczonych pod środkową częścią próbek. Dane doświadczalne wyznaczone podczas próby zginania zostały przeliczone na pomiary naprężeń w celu oceny całkowitej wytrzymałości na zginanie, za pomocą wzoru podanego w równaniu 1.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad [1]$$

gdzie: P oznacza obciążenie niszczące;  $\sigma$  wytrzymałość na zginanie; L odległość podpór; d i b oznaczają odpowiednio wysokość i szerokość beleczek. Połówki beleczek powstałe po pęknięciu próbek w próbie zginania, poddano badaniu wytrzymałości na ściskanie zgodnie z wymaganiami normy EN 196-1 (11). Dwa tensometry o długości 30 mm przyklejono po dwóch stronach próbek w celu wyznaczenia niezbędnych danych dotyczących odkształceń pionowych próbek, w celu uzyskania modułu sprężystości przy ściskaniu. System pozyskiwania danych został dostosowany do zbierania danych doświadczalnych z częstotliwością 10 Hz,

### 3.1. Number of specimens

A total of 20 mixtures were cast into different steel molds for different specimen testing. 40 x 40 x 160 mm specimens were cast for compressive and flexural strength testing. 40 x 40 x 40 mm specimens were also used to conduct splitting tensile testing. Each specimen was compacted with appropriate tampering on the vibrating table to establish proper compaction, such that all fibrous mixes had a homogenous mix structure. All specimens were kept in a humidity cabinet with a constant temperature at  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  and relative humidity of  $55 \pm 5\%$ . Steel molds were moved to a humidity cabinet immediately after the casting process and specimens were taken out of the mold, 4 hours after casting.

### 3.2. Testing methods

The flowability of fresh MPC mixtures was measured in accordance with the specifications in ASTM C1437-15 (10). Two layers of mortar mixture were placed and tamped 20 times per layer in a flow mold having a full height of 50 mm, on a flow table. After lifting the flow mold, the flow test was performed through the use of a flow table applying 25 jolts to the mixture, in 15 sec. Two diameters of the spread of the fresh mixture were measured along two perpendicular directions to determine the flowability of cement mortars by the average of the measured diameters. Results were facilitated as the ratio of the flow diameter to the bottom diameter of the flow mold, in percent.

28-day compressive and flexural strengths of MPC mixtures were determined using a procedure based on EN 196-1 (11). Starting with the flexural strength testing of the MPC specimens, a three-point bending test procedure was conducted on the beam specimens, utilizing an MTS closed-loop servo-hydraulic test system. All specimens were tested under a displacement-controlled flexural loading at a rate of 0.5 mm/min, over a span length of 120 mm. Vertical displacement data were acquired through the use of two linear variable differential transformers placed under the midspan of the specimens. Experimental data determined during the flexural testing procedure was converted into stress measurements to evaluate the overall flexural strength capacity by the formula given in Equation 1.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad [1]$$

where: P is the ultimate load;  $\sigma$  is the ultimate flexural strength; L is the span length; d and b are the height and the width of the prisms, respectively. Eventually, the halved prisms formed after cracking of specimens due to flexural testing, were tested for compressive strength conforming to the requirements of compression testing procedures in EN 196-1 (11). Two strain gauges of 30 mm length were glued onto two sides of the specimens, to determine the necessary vertical displacement data on the specimens, to obtain modulus of elasticity under compression. The data acquisition system was adjusted to collect the experimental data at 10 Hz of frequency, while the compression tests for all specimens, were conducted at a loading rate of 0.6 MPa/sec. Determination of



natomiast próby ściskania dla wszystkich próbek przeprowadzono przy szybkości przyrostu obciążania wynoszącej 0,6 MPa/s. Wyznaczenie wartości modułów sprężystości przeprowadzono poprzez wykreślenie krzywych naprężenie-odkształcenie dla każdej z badanych próbek oraz uśrednienie wyników.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono na próbkach sześciennych o wymiarach 40 x 40 x 40 mm, przy szybkości narastania obciążenia 0,1 kN/s, zgodnie z normą ASTM C496 (12), a wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu każdej serii próbek obliczono według równania 2.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi a^2} \quad [2]$$

gdzie: P oznacza obciążenie niszczące (N), a a jest długością boku próbki sześciennej.

## 4. Wyniki i omówienie

### 4.1. Wyniki badań rozplywalności

Zmierzono konsystencję 20 różnych mieszanek i podano ją jako stosunek średnicy rozplywu do średnicy podstawy formy w procentach, na rys. 1. Stwierdzono, że konsystencja zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości włókien (9). Stwierdzono jednak większą podatność mieszanek z 1% WB na zagęszczanie, zwłaszcza gdy w matrycy nie ma pyłu krzemionkowego. W związku z tym włączenie pyłu okazało się również korzystne. W przypadku porównania stosunków molowych MgO do DWFA, mieszaniny o mniejszym stosunku molowym wykazywały lepszą konsystencję, w porównaniu z mieszaninami o większym stosunku molowym.

Pomimo, że na wyniki badania konsystencji duży wpływ miał dodatek włókien, zmierzone wartości były dość zadowalające i konsystencja badanych próbek pozwoliła na uzyskanie jednorodnej masy, po zagęszczeniu na stole wibracyjnym.

### 4.2. Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na próbkach o wymiarach 40 x 40 x 40 mm. Jednocześnie w ramach tych analiz dokonano pomiaru modułów sprężystości dla wszystkich próbek za pomocą tensometrów, zamocowanych pionowo na dwóch ściankach kostki. W celu wyznaczenia siecznego modułu sprężystości zastosowano trzy cykle, które przedstawiono na rysunku 2.

Moduł sprężystości obliczono zgodnie z równaniem 3 jako stosunek różnicy między zmierzoną wartością naprężenia przy wysokim naprężeniu  $[\sigma_a]$ , a zmierzonym poziomem naprężenia wstępnego obciążenia  $[\sigma_p]$ , do różnicy między wartością odkształcenia przy trzecim maksimum

elasticity modulus values was conducted through constructing stress-strain curves for each specimen tested and averages of the results were collected.

Splitting tensile tests were conducted on specimens with 40 x 40 x 40 mm cubes with a loading rate of 0.1 kN/s as was suggested by ASTM C496 (12) and the splitting tensile strength of each specimen series was calculated using equation 2.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi a^2} \quad [2]$$

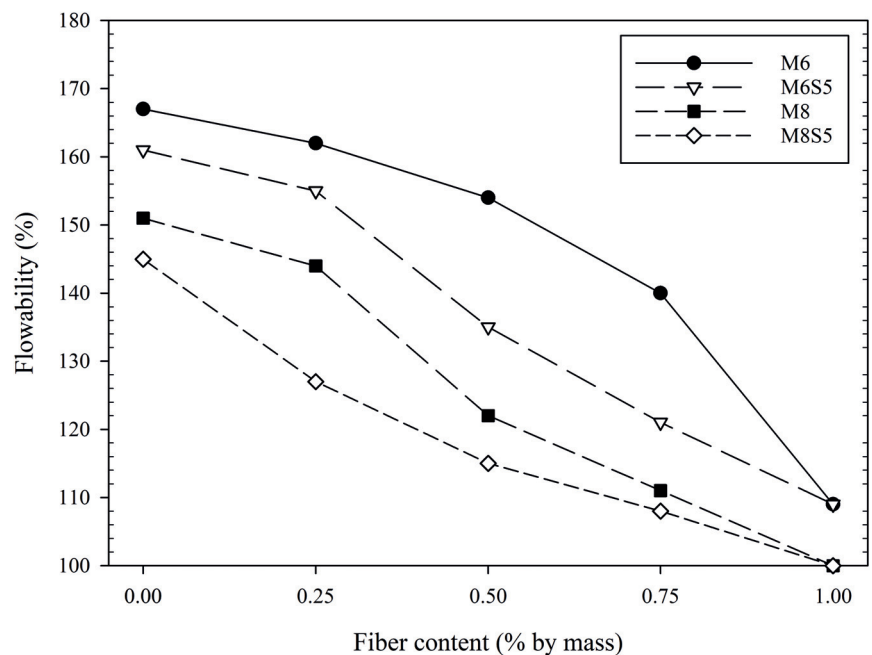
where: P is the ultimate load (N) and a is the dimension of the cube specimen.

## 4. Results and Discussion

### 4.1. Flowability

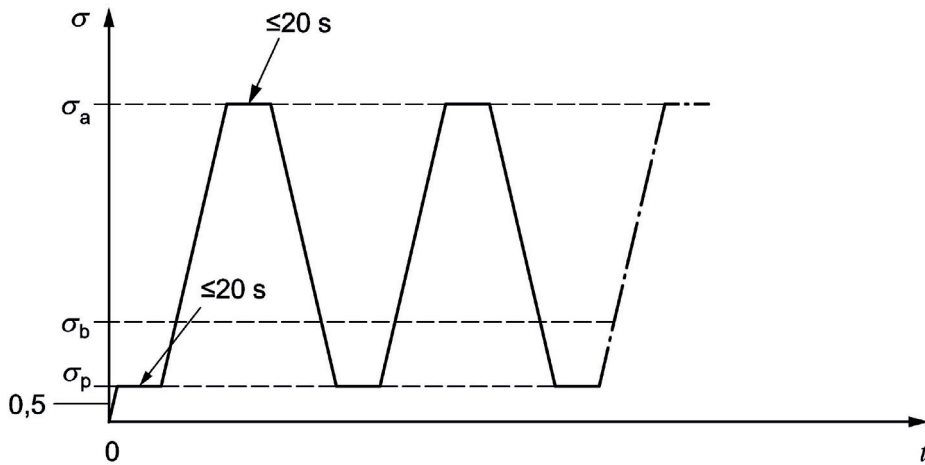
The flowability diameters of 20 different mixtures were measured and given as the ratio of the spread diameter to mold base diameter as percentages in Fig. 1. According to the findings, workability was seen to be decreased with the increasing fiber content (9). However, mixtures with 1% BF were found to be more influenced, especially when there is no SF involved in the matrix. Thus incorporation of SF was also found to be beneficial. When molar ratios are compared, lower molar ratio mixtures exhibited superior performance with respect to higher molar ratio mixtures.

Although flowability results were influenced highly by the inclusion of fibers, measured values were quite satisfactory to produce homogenous mixes, especially when proper tampering has been conducted on the vibration table. Overall homogeneity of the mixes was supplied when casting into steel molds.



Rys. 1. Wyniki badań rozplywu dla wszystkich serii próbek

Fig. 1. Flowability results for all specimen series



Rys. 2. Przebieg trzech cykli użytych do wyznaczenia modułu sprężystości – TS EN 12390-13 (13)

Fig. 2. Three cycles for the estimation of secant modulus of elasticity – TS EN 12390-13 (13)

i wartości odkształcenia na poziomie naprężenia wstępnego, po zmniejszeniu wartości naprężenia po drugim cyklu obciążenia. Naprężenie wstępne powinno wynosić od 0,5 MPa do 10% wytrzymałości na ściskanie, a poziom wysokiego naprężenia  $[\sigma_a]$  powinien wynosić 30% końcowej wytrzymałości na ściskanie.

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad [3]$$

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, dla wszystkich serii próbek, zostały ocenione w odniesieniu do wszystkich trzech zmiennych badanych w pracy. Stwierdzono, że dodanie pyłu krzemionkowego było bardzo korzystne, powodując wzrost wytrzymałości o 18,8% i 12,3% dla mieszanek nie zawierających włókien, o stosunku molowym MgO/DWFA wynoszącym odpowiednio 6 i 8 [Rys.4]. W przypadku mieszanek zawierających włókna widać, że dodatek pyłu krzemionkowego do mieszanek okazał się również bardzo korzystny, powodując zwiększenie wytrzymałości o 33,1 i 32,1%, dla próbek o największej zawartości włókien i stosunku molowym wynoszącym odpowiednio 6 i 8. W przypadku braku PK w mieszance, zwiększenie zawartości włókien miało niekorzystny wpływ na ogólną wytrzymałość na ściskanie, co znajduje potwierdzenie również w innym badaniu (8). Po zwiększeniu zawartości włókien zaobserwowano spadek wytrzymałości na ściskanie, co było bardzo widoczne zwłaszcza w przypadku większych zawartości włókien, co może być również związane z problemami z jednorodnym rozmieszczeniem włókien (9). Gdy porównuje się wpływ stosunków molowych, widać, że próbki o stosunku molowym 8 okazały się lepsze pod względem wytrzymałości na ściskanie.

Po wyznaczeniu modułów sprężystości stwierdzono, że w przypadku próbek bez pyłu krzemionkowego, wartości modułu malały wraz ze

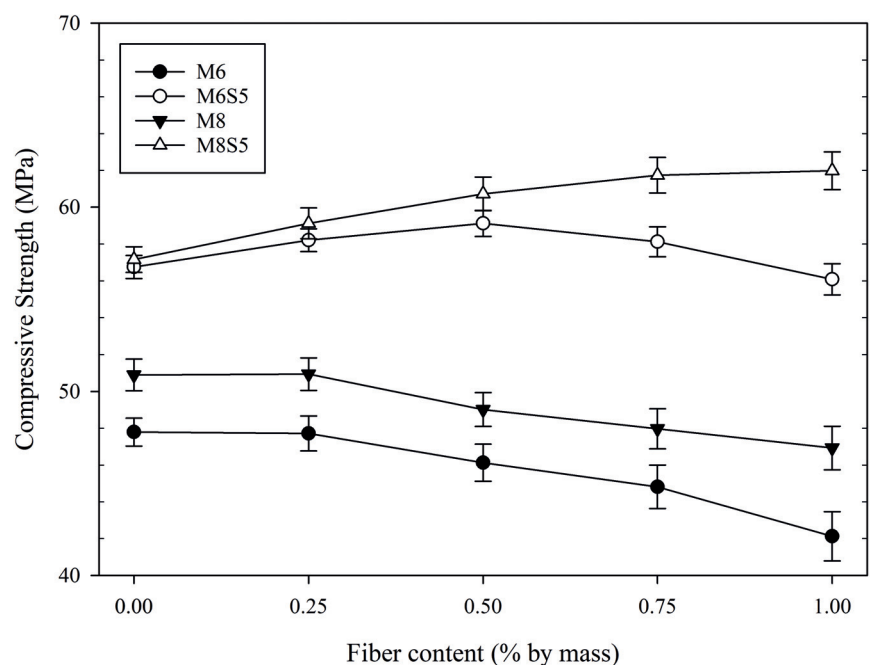
## 4.2. Compressive strength test results

Compressive strength tests were conducted on 40 x 40 x 40 mm specimens and also along with these analyses, modulus of elasticity for all specimens was measured by the strain gauges, vertically attached into two sides of the cube specimens. Three cycles were implemented for the estimation of the secant modulus of elasticity, as shown in Fig. 2.

Modulus of elasticity [MOE] was calculated according to equation 3 as the ratio of the difference between measured stress value at a high-stress level  $[\sigma_a]$  and measured stress level of preload stress  $[\sigma_p]$  to the difference between strain value at third peak high-stress level and the strain value at preload stress level after reducing the stress value after the second peak. Preloading stress should be between 0.5 MPa and 10 % of the ultimate compressive strength and high-stress level  $[\sigma_a]$  should be 30% of ultimate compressive strength.

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad [3]$$

Compressive strength results for all specimen series were evaluated with respect to all three parameters, such that addition of silica fume was found to be highly significant creating an enhancement of 18.8% and 12.3% for non-fibrous mixtures with molar ratios of 6 and 8 respectively [Fig.4]. When fibrous mixtures are considered, it is seen that the addition of silica fume into mixtures



Rys. 3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich serii próbek

Fig. 3. Compressive strength results for all specimen series

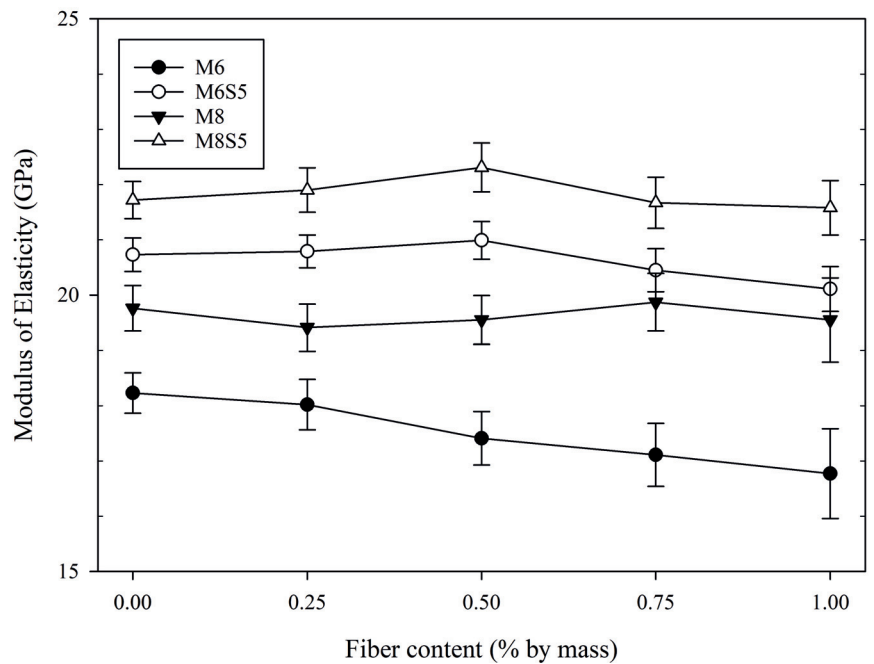
zwiększeniem zawartości włókien – rys. 4. Było to bardziej widoczne w przypadku próbek o niższym stosunku molowym, w których spadek wyniósł 8%. Spadek ten był bardziej ograniczony dla stosunku molowego 8 z wielkością spadku wynoszącą tylko 1,1%, dla największego dodatku włókien. Należy również stwierdzić, że w przypadku próbek o stosunku molowym wynoszącym 8, nie zaobserwowano znacznego zróżnicowania wraz ze wzrostem zawartości włókien. Po dodaniu pyłu krzemionkowego, próbki bez włókien wykazywały lepsze właściwości użytkowe, w wyniku wzrostu modułu sztywności o 13,7 i 9,9 %.

#### 4.3. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przedstawiono na rys. 5. W przypadku oceny wpływu 3 różnych zmiennych widać, że zawartość włókien przyczyniła się do znacznego wzrostu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu o 17% dla próbek bez PK i o 19% dla próbek z pyłem. Dodatek PK zwiększył wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu matrycy bez włókien o 8% dla obu stosunków molowych. Należy również dodać do dyskusji łączny efekt PK i WB, ponieważ 1% WB okazał się bardziej skuteczny, gdy był stosowany razem z pyłem krzemionkowym. Jednak dodatek 0,75% WB wykazywał największy efekt, gdy nie stosowano PK. Należy więc wiązać to z efektem dodatkowego mikrowypełnienia przez PK, tworzącego wzmocniony mechanizm wiązania pomiędzy włóknami a matrycą (8, 9). Największą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu stwierdzono dla próbek M8S5BF100 i M6S5BF100, wynoszącą odpowiednio 6,23 i 6,20 MPa. Najniższą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu odnotowano dla próbek M6S0BF0 - 4,72 MPa, a ogólny wzrost wyniósł 32%. Wszystkie 3 badane czynniki zmienne miały wpływ na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Jednak zawartość WB wraz z dodatkiem PK były dwoma zmiennymi bezpośrednio odpowiedzialnymi za wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Różne stosunki molowe nie miały znacznego wpływu na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu.

#### 4.4. Wytrzymałość na zginanie

Wyniki oznaczeń wytrzymałości na zginanie zostały przedstawione na rys. 6. Stwierdzono, że wartości wytrzymałości na zginanie są powiązane z wynikami badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Stwierdzono, że łączne stosowanie włókien bazaltowych i pyłu krzemionkowego jest bardzo efektywne. Jest to związane z ulepszeniem właściwości matrycy CFM przez dodatek pyłu krzemionkowego, po którym matryca była bardziej zdolna do tworzenia lepszych połączeń, mimo że zawartość włókien bazaltowych była większa. Największą wytrzymałość na zginanie odnotowano dla próbek M8S5BF10 - 7,42 MPa, a najmniejszą dla



Rys. 4. Wyniki badań modułu sprężystości dla wszystkich serii próbek

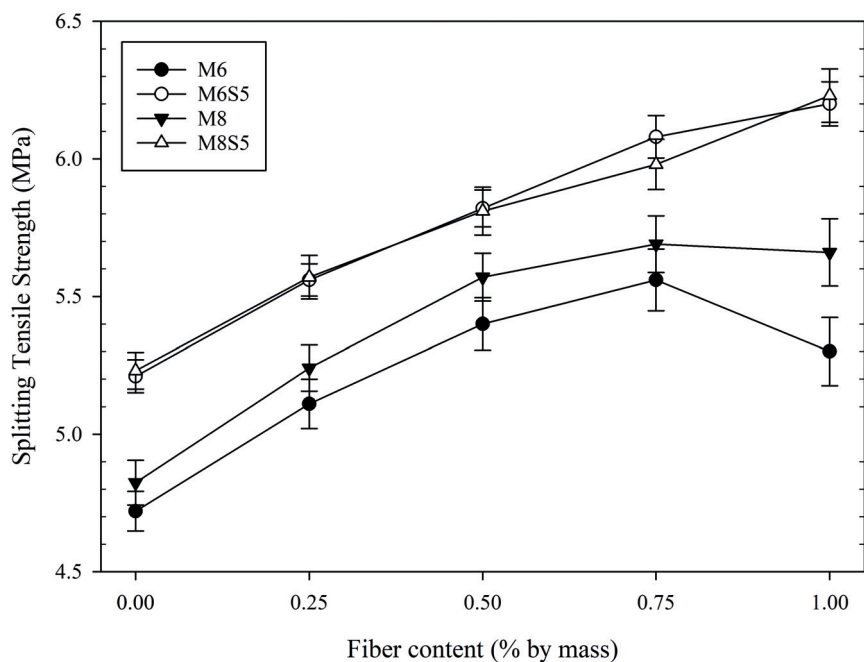
Fig. 4. Modulus of elasticity (MOE) results for all specimen series

was found to be very significant thus creating a development of 33.1 and 32.1% for specimens with the highest fiber content for molar ratios of 6 and 8 respectively. When there was no SF in the mix, an increase of fiber content affected the overall compressive strength adversely, which was also observed in a different study (8). When the fiber content was increased, it was seen that compressive strength was decreased which was very obvious especially for higher fiber contents which may also be associated with dispersion problems (9). When the effect of molar ratios is compared, it is seen that specimens with a molar ratio of 8 were found to give higher compressive strength.

When modulus of elasticity results are investigated, it can be seen that for specimens without SF, MOE values were seen to decrease with the increasing fiber content [Fig. 4]. This behavior was more evident for lower molar ratio specimens with an 8% decrease. This decrease was more limited for a molar ratio of 8 with a decrease amount of only 1.1% for the highest fiber content level. And also it should be added there was not much distinction with the increase in fiber content for specimens of a MgO/ADP molar ratio of 8. By the inclusion of SF, non-fibrous specimens exhibited superior performance by an increase of 13.7 and 9.9 % for MOE values.

#### 4.3. Splitting tensile strength

Splitting tensile strength tests results are given in Fig. 5. When the effects of 3 different parameters are evaluated it can be seen that fiber content attributed important development with 17% for specimens without SF and 19% for specimens with SF. The incorporation of SF increased the splitting tensile capacity of the nonfibrous matrix by 8%, for both molar ratios. Also combined effect of SF and BF together should be added into the discussion since 1% of BF was found to be more effective when used with SF,



Rys. 5. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla wszystkich serii próbek

Fig. 5. Splitting strength results for all specimen series

próbek M6 - 5,62 MPa, co daje łączny wzrost o 32%. Największe wytrzymałości na zginanie odnotowano dla maksymalnej zawartości WB, z wyjątkiem próbek o stosunku molowym 6, bez dodatku pyłu krzemionkowego. W przypadku tych serii zawartość włókien wynosząca 0,75% okazała się bardziej efektywna.

## 5. Wnioski

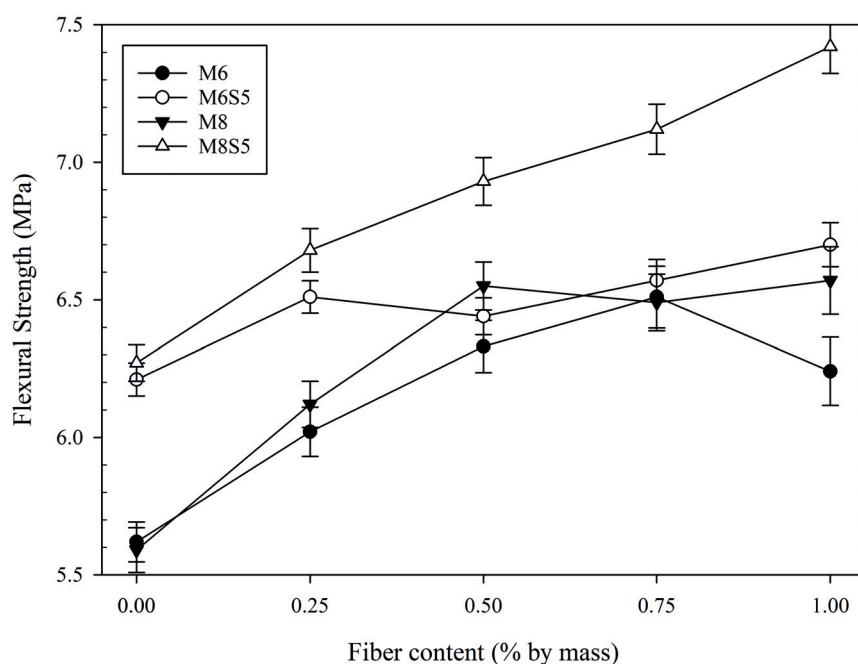
W niniejszej pracy wykonano mieszanki cementu fosforanowo-magnezowego o trzech różnych zmiennych, tj. stosunku molowym MgO do diwodorofosforanu amonu, dodatku pyłu krzemionkowego oraz 5 różnych zawartości włókien bazaltowych. W odniesieniu do tych zmiennych określono efektywność zbrojenia włóknami bazaltowymi, a wnioski płynące z badań zestawiono poniżej:

1. Lepsze okazały się próbki o wyższym stosunku molowym, natomiast różnica ta została zniwelowana po dodaniu do mieszanki pyłu krzemionkowego.
2. Zaobserwowano, że dodatek pyłu krzemionkowego znacznie poprawia właściwości mechaniczne. Wzrost wytrzymałości próbek, nie zawierających włókien z dodatkiem 5% PK, wynosił 19% dla wytrzymałości na ściskanie i 10% dla wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i na zginanie.
3. Optymalna zawartość dodatku włókien wynosiła 0,75% dla mieszanek bez dodatku pyłu krzemionkowego. Dodatkowo, dodatek pyłu

however, 0.75% BF content exhibited the highest increase when no SF was involved. Thus, it should be related to the effect of the extra microfiller effect of SF, creating an enhanced bonding mechanism between the fibers and the matrix (8, 9). The highest splitting tensile strength was observed for specimens M8S5BF100 and M6S5BF100 as 6.23 and 6.20 MPa, respectively. The lowest splitting tensile strength was noted for M6S0BF0 specimens as 4.72 MPa and overall development was recorded as 32%. All 3 parameters were involved in this development, however, BF content together with SF addition were the two parameters directly responsible for this enhancement in splitting tensile strength. Different molar ratios were not found to be effective, when compared.

## 4.4. Flexural Strength

Flexural strength analysis was given in Fig. 6. Flexural strength results were found to be related to the findings in the splitting tensile strength. Effect of basalt fibers and silica fume were found to be significantly more efficient, when used together. This is related to the better development of the MPC matrix with the addition of silica fume and afterward, the matrix was more capable to create better bonding although basalt fiber content is higher. The highest flexural strength was recorded for M8S5BF10 as 7.42 MPa and the lowest flexural strength was recorded for M6 specimens as 5.62 MPa which makes a total increase of 32%. The highest flexural strength was recorded for maximum BF contents, except for specimens with a MgO/ADP molar ratio of 6 without SF addition. For these series, 0.75% fiber content was found to be more effective.



Rys. 6. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie dla wszystkich serii próbek

Fig. 6. Flexural strength results for all specimen series



krzemionkowego najprawdopodobniej spowodował zagęszczenie matrycy i odpowiednio lepsze połączenie z włóknami bazaltowymi, ponieważ próbki te miały najlepsze właściwości przy użyciu 1% włókien bazaltowych.

4. Podsumowując, należy stwierdzić, że łączne zastosowanie włókien bazaltowych z dodatkiem pyłu krzemionkowego w matrycy CFM, spowodowało poprawę właściwości mechanicznych.

## Literatura / References

1. Y. Fang, B. Chen, S.Y. Oderji, Experimental research on magnesium phosphate cement mortar reinforced by glass fiber. *Constr. Build. Mater.* **188**, 729–736 (2018).
2. F. Qiao, C.K. Chau, Z. Li, Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material. *Constr. Build. Mater.* **24**, 695–700 (2010).
3. J. Li, W. Zhang, Y. Cao, Laboratory evaluation of magnesium phosphate cement paste and mortar for rapid repair of cement concrete pavement. *Constr. Build. Mater.* **58** 122–128 (2014).
4. T. Zhang, H. Chen, X. Li, Z. Zhu, Hydration behavior of magnesium potassium phosphate cement and stability analysis of its hydration products through thermodynamic modeling. *Cem. Concr. Res.* **98**, 101–110 (2017).
5. L. Mo, L. Lv, M. Deng, J. Qian, Influence of fly ash and metakaolin on the microstructure and compressive strength of magnesium potassium phosphate cement paste. *Cem. Concr. Res.* **111**, 116–129 (2018).
6. W. Han, H. Chen, X. Li, T. Zhang, Thermodynamic modeling of magnesium ammonium phosphate cement and stability of its hydration products. *Cem. Concr. Res.* **138**, 106223 (2020).
7. M. Aminul Haque, B. Chen, M. Riaz Ahmad, S. Farasat ali shah, Mechanical strength and flexural parameters analysis of micro-steel, polyvinyl and basalt fibre reinforced magnesium phosphate cement mortars. *Constr. Build. Mater.* **235**, 117447 (2020).
8. M.R. Ahmad, B. Chen, Microstructural characterization of basalt fiber reinforced magnesium phosphate cement supplemented by silica fume. *Constr. Build. Mater.* **237**, 117795 (2020).
9. J. Qin, J. Qian, Z. Li, C. You, X. Dai, Y. Yue, Y. Fan, Mechanical properties of basalt fiber reinforced magnesium phosphate cement composites. *Constr. Build. Mater.* **188**, 946–955 (2018).
10. ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standards, (2015)
11. EN 196-1, 2009, Methods of Testing Cement – Part I: Determination of Strength, (2009)
12. ASTM C496/C496M, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, (2017)
13. EN 12390-13, Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression (2020).

## 5. Conclusion

In this study, magnesium phosphate cement mixtures were formed with three different parameters which are: the molar ratio of MgO to ADP, the addition of silica fume and 5 different basalt fiber contents. Regarding these parameters, efficiency when reinforcing with basalt fibers were targeted and conclusion drawn from this study are summarized below:

1. Specimens with a higher molar ratio were found to be better whereas this distinction was eliminated when silica fume was added into the mixture.
2. The incorporation of silica fume was noticed to enhance mechanical properties significantly. For nonfibrous specimens with 5% SF, the increase was found to be 19% for compressive and 10% for both splitting and flexural strength, respectively.
3. Optimum content for fiber addition was found to be equal to 0.75%, for mixtures without silica fume addition. Additionally, the addition of silica fume most probably developed a denser matrix microstructure and correspondingly superior bonding with basalt fibers, since these specimens had the best performance with a 1% addition of basalt fibers.
4. An overall conclusion should be as follows: the combined usage of basalt fibers with silica fume addition into the MPC matrix, improves their mechanical properties.