

## Właściwości samozagęszczającego się betonu z popiołem z odpadów z przetworzonych oliwek

## Properties of self-compacting concrete containing olive waste ash

Raheleh Cheraghalizadeh\*, Tulin Akcaoglu

Eastern Mediterranean University, Famagusta, via Mersin 10, Turkey

\*Corresponding author: R. C. Alizadeh, email: rahele\_c@yahoo.com

### Streszczenie

Wykorzystywanie zasobów lokalnych w sposób uzasadniony i znormalizowany ma ogromne znaczenie dla rozwoju gospodarczego na świecie. Wykorzystanie materiałów odpadowych może poprawić właściwości betonu i powodować, że staje się on bardziej przyjazny środowisku. W badaniach dokonano oceny wpływu popiołu z odpadów z oliwek na właściwości mechaniczne i odporność na pękanie. W tym celu przygotowano mieszanki samozagęszczające się, w których dodawano popioły z odpadów z oliwek w trzech różnych ilościach oraz zastosowano dwa różne dodatki superplastyfikatora. Oprócz badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przeprowadzono serię badań wytrzymałości na trójpunktowe zginanie belek z karbem, dla wszystkich wykonanych betonów. Ponadto defekty w badanych betonach samozagęszczających się oceniono za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej. Badania wykazały, że stosowanie popiołów z odpadów z oliwek w betonach samozagęszczających się wpływa głównie na wytrzymałość na rozciąganie i energię pęknięcia dla dwóch różnych dodatków superplastyfikatora.

**Słowa kluczowe:** beton samozagęszczający się, popiół z odpadów oliwnych, wytrzymałość na ściskanie, energia pęknięcia, rentgenowska tomografia komputerowa

### Summary

Reasonable and standardized use of local and waste resources is of great importance for the economic development in the world. The utilization of waste materials can result in enhanced properties and eco-friendly concrete, at the same time. In this study, it is aimed to evaluate the effect of olive waste ash on the mechanical and fracture properties of self-compacting concrete. For this purpose, self-compacting concrete mixes were prepared by the utilization of olive waste ash, in three different proportions and with two different dosages of superplasticizer. Alongside compressive and tensile strengths analysis, a series of three-point bending tests on notched beams were conducted for all mixes. Moreover, initial defects of all self-compacting mixes were evaluated by using the X-ray computed tomography method. Findings showed that using olive waste ash in self-compacting concrete mainly affects the tensile strength and fracture energy for the two different contents of superplasticizer.

**Keywords:** self-compacting concrete, olive waste ash, compressive strength, fracture energy, X-ray computed tomography

### 1. Wprowadzenie

Nieustanny rozwój technologii betonu, wykorzystanie dodatków mineralnych i domieszek chemicznych powodują powstanie coraz bardziej trwałych i wytrzymałych betonów (1). Produkcja oliwy z oliwek jest jednym z głównych sektorów rolnictwa w krajach śródziemnomorskich, który wytwarza znaczną ilość biomasy. Z jednego hektara drzew oliwnych uzyskuje się rocznie około trzech ton pozostałości po przycinaniu, które zwykle są nielegalnie spalane lub składowane (2). W ostatnich dziesięcioleciach skła-

### 1. Introduction

In recent concrete technology, the utilization of chemical admixtures and mineral additives resulted in more durable and higher strength concrete (1). Olive-oil production is one of the main agricultural industries in the Mediterranean countries which produce a considerable quantity of residual biomass. One hectare of olive trees produces around three tons of pruning residues each year, which are usually burned illegally, or left on the ground (2). In recent decades waste sites of storage have become a major difficulty

dowiska odpadów stały się poważnym problemem, ze względu na koszty i problemy z lokalizacją (3). Stwierdzono, że możliwe jest wykorzystanie zmielonego popiołu z odpadów z oliwek [PO] jako zamiennika cementu bądź kruszywa, w zaprawach i betonach. W porównaniu do zwykłego betonu wibrowanego, beton samozagęszczający się [BSZ] wymaga zwiększonego udziału drobnych składników i większej objętości zaczynu oraz mniejszej zawartości kruszywa grubego (4). Superplastyfikatory wykorzystywane są w celu poprawienia płynności mieszanki betonu samozagęszczającego się (5-7).

Wyniki badań betonów z PO przedstawione w literaturze prezentują pewne rozbieżności. W pracy (8) stwierdzono, że zamiana do 10% cementu popiołem lotnym z biomasy z oliwek nie wpływa niekorzystnie na właściwości mechaniczne zapraw. Z kolei autorzy pracy (9) wykazali, że zastosowanie PO jako składnika zaczynu cementowego spowodowało nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 3, 7 i 28 dniach. Zastąpienie przez PO różnych ilości cementu zmniejsza wytrzymałość na ściskanie, jednakże zwiększa odporność betonu na podwyższone temperatury (10). W literaturze można także znaleźć informacje, że zastosowanie popiołu z oliwek jako wypełniacza pozwoliło na uzyskanie nieco większej wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z BSZ, w którym wykorzystano kamień wapienny (11).

Mniejsza zawartość kruszywa grubego w betonie samozagęszczającym się, w porównaniu do zwykłego betonu, powoduje pogorszenie zdolności do pochłaniania energii przy pękaniu oraz zmniejszenie ciągliwości. W literaturze przedstawiono badania energii pękania BSZ, jednak nie ma informacji o takich betonach zawierających PO. Stwierdzono, że energia pękania BSZ zwiększa się z udziałem objętościowym kruszywa grubego, ale w mieszankach o większej wytrzymałości [klasa 80] występuje mniejszy przyrost tej zależności, w porównaniu z klasami 30 i 60 (12). Podobne wnioski prezentują autorzy pracy (13), którzy stwierdzili, że energia pękania BSZ w mniejszym stopniu zależy od wielkości frakcji kruszywa grubego, w porównaniu do zwykłego betonu wibrowanego, o tej samej wytrzymałości (13). Z kolei w innych badaniach stwierdzono, że parametry pękania BSZ są zbliżone do zwykłego betonu wibrowanego o podobnej wytrzymałości na ściskanie, zawierającego ten sam rodzaj kruszywa grubego (14).

Wielu badaczy informuje, że zastosowanie bardzo drobnych materiałów zwiększa zwartość zaczynu w betonie BSZ, co może powodować zmniejszenie porowatości strefy kontaktowej kruszywozaczyn (15,16). W literaturze istnieje jednak wiele sprzeczności związanych z tym zagadnieniem.

Ze względu na brak informacji w literaturze na temat wpływu PO na właściwości betonów samozagęszczających się, podjęto próbę zbadania wpływu popiołu z odpadów z przetwarzania oliwek na właściwości mechaniczne i energię pękania BSZ. Ponadto w celu wizualizacji mikrostruktury porów badanych próbek po 91 dniach dojrzewania, wykonano obrazy za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej i wykorzystano analizę obrazu, z użyciem programu ImageJ.

in terms of costs and their locations (3). It was found that olive waste ash [OW] can be ground and in the form of powder be used as an addition or replacement either of cement or aggregates, in mortar and concrete. Comparing to normal vibrated concrete, self-compacting concrete [SCC] requires higher contents of fine particles and paste and lower coarse aggregate content (4). SCC also usually needs a superplasticizer [SP] admixture, to improve flowability when the concrete is in its fresh state (5-7).

The findings of various studies indicated the behaviors of mortar and concrete containing OW. Different outcomes are reported by different researchers. In one research, it is found out that up to 10% of cement can be replaced by olive biomass fly ash, without detracting the mechanical properties of mortar (8). In another research, the results indicated that the utilization of different OW percentages in hardened blended cement pastes slightly decreases the 3, 7, and 28 days compressive strength (9). However, it is reported by some researchers that, replacing different amounts of OW instead of cement reduces the compressive strength, but increases the performance of concrete, exposed to elevated temperatures (10). On the other hand, some researchers reported that olive waste ash applied in SCC as a filler, resulted in slightly higher compressive strength when compared to SCC, produced with commercial limestone (11)

Generally, in an SCC mix, a lower coarse aggregate content relatively to normal vibrated concrete of the same grade, is likely to reduce its energy absorption capacity and thus its ductility. There are several pieces of research on fracture energy determination for SCC, however, there is not enough study determining this behavior for SCC containing OW. It has been verified that the specific fracture energy of SCC increases through enhancement in the coarse aggregate volume fraction, but it is found that there is a smaller rate of increment in higher strength mixes (grade 80), compared with grades 30 and 60 of SCC (12). Similarly, it has been found that SCC has a lower specific size-independent fracture energy compared to normal vibrated concrete for the same strength (13). However, it is reported in one study that the fracture parameters of SCC mixes are similar to the normal vibrated concrete with similar compressive strength and coarse aggregate (14).

On the other hand, many researchers have reported that the use of ultra-fine materials increases the compactness of the SCC matrix and consequently may reduce the porosity of interface transition zone between aggregate and paste (15,16). However, there are many contradictions from different studies on this issue.

Due to the lack of information on the effect of OW on SCC properties, the present study aims to investigate the effect of OW on mechanical properties and fracture behavior of SCC mixes. Moreover, a simple and automated porosity analysis from X-Ray computed tomography method [X-Ray CT] and ImageJ program were used to visualize the microstructure in terms of pores of the produced specimens, at 91 days age

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Materiały i przygotowanie próbek

W badaniach wykonano sześć różnych mieszanek BSZ różniących się zawartością popiołu oraz superplastyfikatora i porównano je do betonu zwykłego wibrowanego [WB]. Popiół został użyty jako zamiennik kruszywa w ilości 5%, 10% i 15%, a jego skład chemiczny przedstawiono w tabelicy 1. Popiół pozyskano z fabryki oliwy z oliwek i zmielono do maksymalnej wielkości ziaren równej 125 µm.

W mieszaninach zastosowano turecki cement CEM II/B-S 42,5N oraz superplastyfikator zawierający etery polikarboksylowe Glenium 27 o gęstości 1,044 g/cm<sup>3</sup>. Superplastyfikator dodawano w ilości 1,5 i 2% w odniesieniu do masy cementu. Wykorzystano gruboziarniste kruszywo łamane oraz kruszywo drobne o gęstościach odpowiednio 2,80 i 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Maksymalny wymiar kruszywa to 10 mm. Warto podkreślić, że stosunek w/c oraz stosunek kruszywo drobne/całkowita zawartość kruszywa, były takie same dla wszystkich mieszanin. Ich składy przedstawiono w tabelicy 2.

Tabelica 1/ Table 1

SKŁAD CHEMICZNY OW

CHEMICAL COMPOSITION OF OW

Skład chemiczny, % masowy / Chemical composition, % by mass						
CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
21.17	31.96	2.58	2.33	4.52	1.81	23.19

Tabelica 2/ Table 2

SKŁAD ORAZ WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH

MIX PROPORTIONS AND PROPERTIES OF FRESH SCC MIXES

Betony / Concretes	NC	OW5 SP1.5	OW10 SP1.5	OW15 SP1.5	OW5 SP2	OW10 SP2	OW15 SP2
C, kg/m <sup>3</sup>	402	402	402	402	402	402	402
CA, kg/m <sup>3</sup>	810	770	729	688	770	729	688
FA, kg/m <sup>3</sup>	990	940	891	842	940	891	842
OW, kg/m <sup>3</sup>	-	90	180	270	90	180	270
SP, kg/m <sup>3</sup>	-	6	6	6	8	8	8
W, kg/m <sup>3</sup>	189	189	189	189	189	189	189
w/p	0.47	0.38	0.32	0.28	0.38	0.32	0.28
FA/TA	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Rozpliw / Slump flow, cm	33	72	60	45	79	65	55
L-Box	-	0.85	0.78	-	0.91	0.82	0.64
V-Funnel, s	Block	11	12	Block	9	11.5	21

C: cement, CA: kruszywo grube / coarse aggregate, FA: kruszywo drobne / fine aggregate, SP: superplastyfikator / superplasticizer, W: woda / water, p: spoiwo / powder material, TA: całkowita ilość kruszywa / total amount of aggregate, NC: beton zwykły wibrowany bez dodatku OW i SP / normal vibrated concrete without OW and SP addition

Przeprowadzono następujące badania:

- właściwości reologiczne świeżej mieszanki betonowej za pomocą badania metodą V- lejka oraz L-pojemnika,
- wytrzymałość na ściskanie po 28 i 91 dniach dojrzewania na kostkach sześciennych o wymiarze boku 150 mm,

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials and sample composition

In this study, six different SCC mixes including different proportions of OW and SP and one normal vibrated concrete mix [NC] were produced. OW was used as a replacement of total aggregates by mass in three different proportions [5%, 10%, and 15%]. Details of used OW are given in Table 1. OW was obtained from an olive oil factories and ground to the fineness of 125 µm.

Local cement CEM II/B-S 42.5N and a Glenium 27 polycarboxylate ether-based SP with a specific gravity of 1.044 were used for the mixes. Two different dosages of SP: 1.5% and 2% by mass of cement were applied in mixes. As an aggregate, crushed coarse and fine aggregate having a specific gravity of 2.80 and 2.65 respectively as well as coarse aggregate with a maximum size of 10 mm, were used. It is worth noting that, w/c and fine- aggregate/ total aggregate ratios were kept constant for all mixes. Mix details are given in Table 2.

In this study, the following examinations were conducted:

- Fresh concrete evaluation by Slump Flow, V-Funnel and L-Box tests.
- Compressive strength tests at 28 and 91 days on 150 mm cubic specimens.
- Splitting tensile strength tests on 150x300 mm cylindrical specimens.

- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu na próbkach cylindrycznych 150×300 mm,
- obliczenia energii pęknięcia za pomocą badania trójpunktowego zginania na próbkach 100×100×500 mm,
- analiza porowatości za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej i programu ImageJ.

## 2.2. Energia pęknięcia

RILEM wprowadza szereg zasad dotyczących oznaczania energii pęknięcia betonu za pomocą trójpunktowego zginania (17). W badaniach wyznaczono energię pęknięcia  $G_f$  i wytrzymałość na rozciąganie  $f_t$  na belkach o wymiarach 100 x 100 x 500 mm z karbem, zgodnie z zaleceniami RILEM.  $G_f$  jest energią pęknięcia, obliczoną z krzywej zależności obciążenia w funkcji przemieszczenia pionowego. Szczegóły dotyczące karbowanych belek zastosowanych w tym badaniu podano na rysunku 1.

Odległość między podporami wynosiła w tym badaniu 300 mm, belka była obciążona w połowie, a szczelina pierwotna znajdowała się w środku belki. Współczynnik  $a/W = 0,4$  gdzie  $a$  - głębokość szczeliny,  $W$  - całkowita grubość belki, natomiast średnia grubość wynosiła 2 mm. Odkształcenie szczeliny podczas badania trójpunktowego zginania rejestrowano za pomocą transformatorowego czujnika przemieszczeń liniowych, o układzie różnicowym.

W przypadku próbki o głębokości  $W$ , grubości  $B$  i początkowej głębokości karbu  $a$ , jak schematycznie pokazano na rysunku 1, energię pęknięcia można wyrazić za pomocą równania 1:

$$G_f = \frac{w_0 + mg \delta}{[W - a]B} \quad [1]$$

gdzie:  $W_0$  to pole powierzchni pod krzywą ugięcia obciążenia w badaniu trójpunktowego zginania,  $m$  to masa belki między podporami, a  $\delta$  to ugięcie belki pod obciążeniem. W tym badaniu wytrzymałość na rozciąganie  $f_t$  obliczono przy użyciu równania 2:

$$f_t = \frac{3P_{\max} l}{2B[W - a]^2} \quad [2]$$

gdzie:  $P_{\max}$  to maksymalne obciążenie, a  $l$  to rozpiętość belki. Trzecią wielkością opisującą kruchość materiału jest tzw. charakterystyczna długość  $l_{ch}$ , która jest związana z długością strefy pęknięcia (18) i można ją obliczyć stosując równanie 3:

$$l_{ch} = \frac{EG_f}{f_t^2} \quad [3]$$

W tym równaniu  $E$  jest modułem Younga, a  $f_t$  to wytrzymałość na zginanie. Zgodnie z tym wyrażeniem, im niższa jest wartość  $l_{ch}$ , tym bardziej kruchy jest materiał.

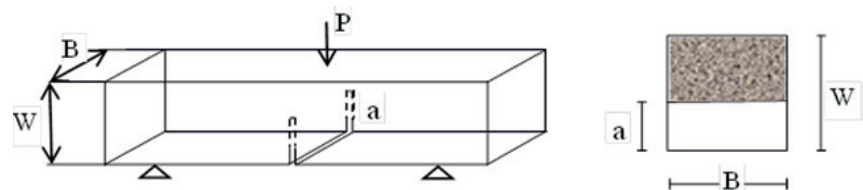
## 2.3. Analiza porowatości – rentgenowska tomografia komputerowa

Badanie defektów, głównie zawartości i rozkładu wielkości porów, w celu ustalenia ich wpływu na wytrzymałość i trwałość, a zwłaszcza

## 2.2. Determination of fracture parameters

RILEM has recommended a series of rules to determine the concrete fracture energy by a three-point bending test (17). In this study, fracture energy  $G_f$  and tensile strength  $f_t$  were obtained from three-point bending tests, performed on notched beams with the dimensions of 100x100x500 mm according to RILEM recommendations.  $G_f$  is the fracture energy, calculated from the load-vertical displacement curve. Details of the notched beams used for this study are given in Fig. 1.

The distance between the supports was 300 mm in this study, while the beam was loaded at mid-span and the notch was at the center of the beam with  $a/W$  ratio [notch depth to total depth of the beam] of 0.4 and the average thickness of 2 mm. Vertical deflections of the notch during a three-point bending test were recorded by linear variable differential transformers.



Rys. 1. Schemat belki z karbem użytej do badania trójpunktowego zginania

Fig. 1. Notched beam details – three-point bending test

For a specimen of depth  $W$ , thickness  $B$ , and initial notch depth  $a$ , as schematically shown in Fig. 1, the fracture energy can be expressed as:

$$G_f = \frac{w_0 + mg \delta}{[W - a]B} \quad [1]$$

In Eq. 1,  $W_0$  is the area under the load-deflection curve in a three-point bending test,  $m$  is the mass of the beam between supports and  $\delta$  is the beam deflection under the load. In this study, tensile strength  $f_t$  was calculated by using the following formula:

$$f_t = \frac{3P_{\max} l}{2B[W - a]^2} \quad [2]$$

where  $P_{\max}$  is the maximal load and  $l$  is the span of the beam. The third expression which describes the brittleness of material in the fracture test is characteristic length  $l_{ch}$ , which is related to the fracture process zone length (18) and can be calculated by the following equation:

$$l_{ch} = \frac{EG_f}{f_t^2} \quad [3]$$

In this equation,  $E$  is the Young's modulus and  $f_t$  is the flexural tensile strength. According to this expression, the lower is the  $l_{ch}$  value; the more brittle is the material.

## 2.3. Pore analysis by X-ray CT

It is extremely important to examine the initial defects in concrete, principally pores contents and distributions, in order to determine

cza zachowanie betonu podczas pęknięcia, jest niezwykle ważne. Rentgenowska tomografia komputerowa to prosta i niedroga metoda wykorzystywana w przemyśle. Jest to metoda, która w ciągu ostatnich 20 lat stała się praktyczną, nieniszczącą metodą badania porowatości. Umożliwia badanie i analizę wad różnych materiałów i nie wymaga specjalistycznej analizy obrazu 3D, mimo to literatura dotycząca tego zagadnienia nie jest zbyt obszerna.

W celu zidentyfikowania i oszacowania porowatości próbek dojrzewających 91 dni, obrazy zostały zarejestrowane w dwóch różnych kierunkach, w odniesieniu do kierunku formowania. Płaszczyzny oznaczono jako XZ i YZ i pokazano na rysunku 2.

W każdym kierunku wykonano po trzy różne zdjęcia; jeden pomiar wykonano w środku próbki, a dwa pozostałe 1 centymetr od krawędzi. Obrazy mikrostruktury próbek OW5SP2 i OW15SP1.5 wykonane wzdłuż płaszczyzny XZ, pokazano na rysunku 3. Porowatość analizowano za pomocą oprogramowania ImageJ, które jest programem do przetwarzania obrazu.

### 3. Wyniki i dyskusja

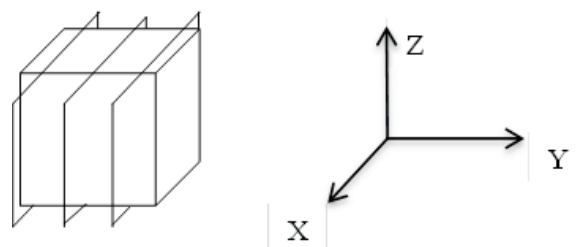
W tej części omówiono i podsumowano wyniki badań świeżych i stwardniałych betonów samozagęszczających się oraz zwykłego betonu wibrowanego.

#### 3.1 Wpływ popiołu i superplastyfikatora na właściwości mieszanki betonowej

Właściwości reologiczne mieszanki betonowej zbadano za pomocą rozplywu stożka oraz analizy przepływu przez V-lejek i L-pojemnik. Wyniki podano w tabelicy 2. Najlepszą płynność i przepływalność uzyskano dla OW5SP2 z maksymalnym rozplywem wynoszącym 79 cm i wskaźnikiem przepływalności wg. L-pojemnika równym 0,91. Urabialność mieszanki pogorszyła się wraz ze zwiększeniem dodatku PO. W mieszankach BSZ, z każdym 5% zwiększeniem dodatku PO, rozplyw zmniejszał się o około 20%. Dla większego

their effects on the strength, durability, and particularly the fracture behavior of concrete. X-ray CT is a simple and cost-effective method for research and industrial applications, not requiring expert 3D image analysis experience, for obtaining useful porosity information. This method, in the last 20 years has become a powerful non-destructive test method, for porosity and defect analysis of various materials, but few simple examples have been reported in the literature.

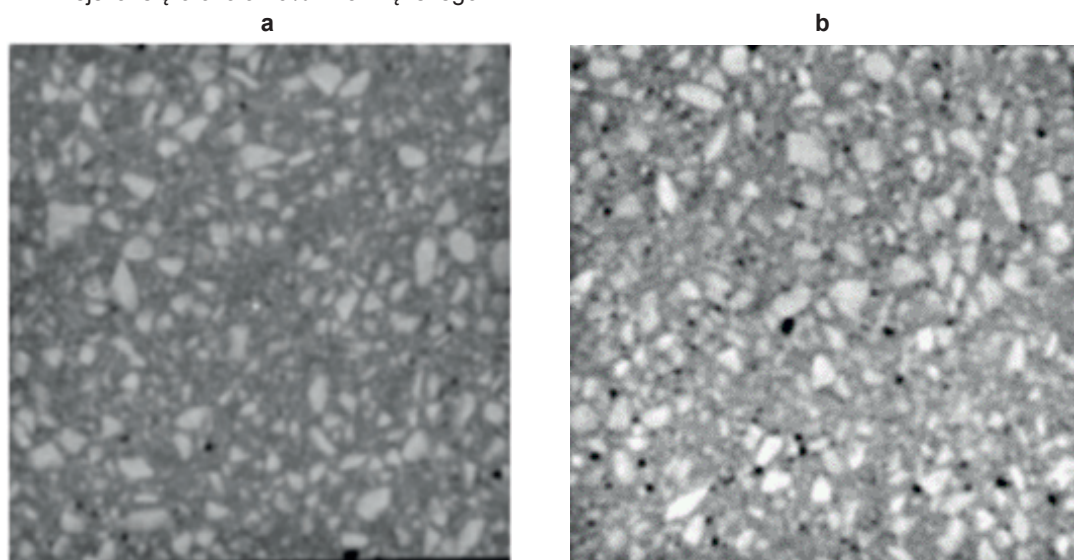
In this study, in order to identify and quantify the porosity, images were captured in two different directions parallel to the casting direction of all specimens, named as XZ and YZ planes at the age of 91 days (Fig. 2)



Rys. 2. Schemat płaszczyzny XZ, wzdłuż której wykonano zdjęcia za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej na sześciennych próbkach betonu

Fig. 2. Schematic position of images taken from XZ plane by X-Ray CT of cube specimens

In each direction, three different images were taken; one of them was in the center of the specimen and the two others were one centimeter far from the edges. X-Ray images of OW5SP2 and OW15SP1.5 specimens, taken from the XZ plane are shown in Fig. 3. Pores were analyzed by ImageJ software, which is an image processing program.



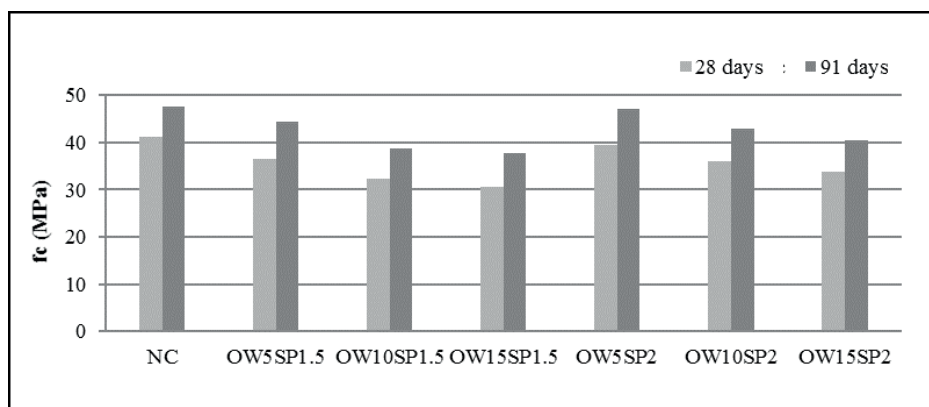
Rys. 3. Obrazy rentgenowskiej tomografii komputerowej wzdłuż kierunku formowania a) OW5SP2 i b) OW15SP1.5

Fig. 3. X-ray CT images along casting direction of a) OW5SP2 and b) OW15SP1.5

dotatku superplastyfikatora notowano większe średnice rozplywu. Betony z 15% PO nie spełniały wymagań RILEM dla BSZ, z powodu małego rozplywu i wskaźnika przepływalności. Podczas badania mieszanki OW15SP1,5 duża lepkość i słaba urabialność spowodowały jej zablokowanie w badaniu V-lejkiem.

### 3.2. Wpływ popiołu i superplastyfikatora na wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozlupywaniu [ $f_c$ i $f_{spl}$ ]

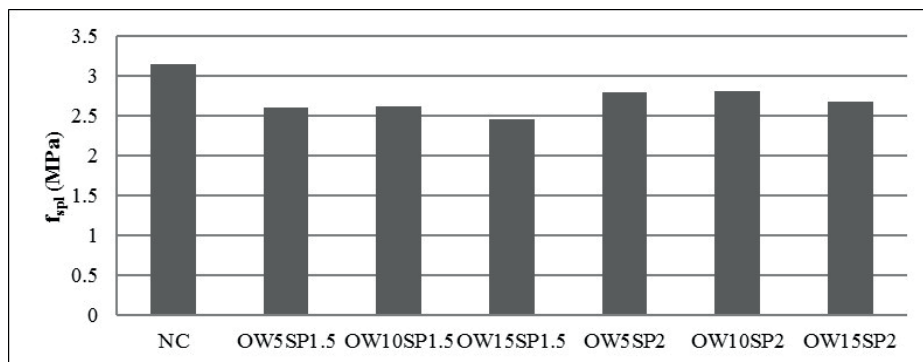
Jak pokazano na rysunku 4, zamiana części kruszywa na popiół z odpadów z oliwek powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  dla obu serii z większą i mniejszą zawartością superplastyfikatora. W związku z tym stwierdzono, że BSZ z najmniejszym dodatkiem popiołu, ale największym dodatkiem superplastyfikatora [OW5SP2] ma największą wytrzymałość na ściskanie spośród wszystkich mieszanek. Wytrzymałość ta jest bardzo zbliżona do wytrzymałości betonu zwykłego, niewibrowanego. Wszystkie betony samozagęszczające się z dodatkiem popiołu i 2% domieszki upłynniającej mają większą wytrzymałość w porównaniu z betonami, do których dodano 1,5% superplastyfikatora. Wynika to z pogorszenia urabialności, związanej ze zmniejszoną zawartością domieszki, która powoduje, że beton jest bardziej porowaty i niejednorodny. Beton OW15SP1,5, zawierający największy udział popiołu miał najmniejszą wytrzymałość. Dla tej mieszanki betonowej wymagania nie zostały spełnione także dla stanu świeżego.



Rys. 4. Wpływ OW i SP na wytrzymałość na ściskanie betonów po 28 i 90 dniach

Fig. 4. Effect of OW and SP on 28 and 91 days compressive strength of SCC

Na rysunku 5 przedstawiono wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu  $f_{spl}$  betonów BSZ. Popiół PO, zastępując drobne i grube kruszywo zmniejsza wytrzymałość  $f_{spl}$ . Mniejszy udział superplastyfikatora w mieszance betonowej także wpływa niekorzystnie na  $f_{spl}$ . Ponadto wyniki pokazują, że wartość  $f_{spl}$  dla OW5SP2 i OW10SP2 była bardzo podobna i zbliżona do zwykłego betonu niewibrowanego. Należy podkreślić, że negatywny wpływ zastąpienia kruszywa popiołem, jest znacznie mniejszy w przypadku  $f_{spl}$ , niż to było widoczne w przypadku  $f_c$ .



Rys. 5. Wpływ OW i SP na wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu dla betonów dojrzewających 28 dni

Fig. 5. Effect of OW and SP on 28 days splitting tensile strength

## 3. Experimental results and discussion

In this section, experimental results, related to fresh and hardened properties of SCC and normal vibrated concrete mixes, are discussed and concluded.

### 3.1. Effect of OW and SP on fresh concrete properties

Fresh concrete mix properties of all the mixes were obtained by performing slump flow, V-Funnel, and L-Box tests. The results are given in Table 2. The highest workability and passing ability were achieved for OW5SP2 with the maximum slump-flow of 79 cm and L-Box of 0.91. The workability was extremely decreased with increasing OW content. In SCC mixes, with each 5% increment of OW, slump-flow value decreased by around 20%, while higher content of SP resulted in higher slump-flow. Mixes with 15% OW did not satisfy the RILEM requirements for SCC because of low slump-flow and L-Box and also for OW15SP1,5, high viscosity, and low workability resulted in blockage in V-Funnel test.

### 3.2. Effect of OW and SP on compressive and tensile strengths [ $f_c$ and $f_{spl}$ ]

As shown in Fig. 4, replacement of aggregate by OW decreases compressive strength,  $f_c$  for both dosages of SP. Accordingly, it is observed that specimen produced with lowest OW but highest SP dosage [OW5SP2] has the highest  $f_c$  among all SCC mixes and is very close to NC value. The same results can be observed for other OW proportions produced with 2% SP, when compared with compressive strengths of SCC mixes produced with 1.5% SP. This is because of the decrement in workability with decreased SP content, which results in a more porous and non-homogeneous concrete. Normally, the lowest strength belongs to OW15SP1,5, which is produced with the highest OW but lowest SP contents, in this study. OW15SP1,5 mix is the one in which SCC requirements for the fresh state were not satisfied.

### 3.3. Wpływ popiołu i superplastyfikatora na porowatość mierzoną metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej

Zdjęcia wykonane za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej, metodą Radiant, poddano analizie z użyciem programu ImageJ. Całkowite pola powierzchni porów obliczone zostały na podstawie przekrojów 100 x 100 mm, wzdłuż kierunku formowania próbek i wynosiły między 2,18 cm<sup>2</sup> - dla OW5SP2 a 6,03 cm<sup>2</sup> - dla OW15SP1.5, co przedstawiono na rysunku 6. Wyniki pokazały, że dla dodatku popiołu większego niż 5%, nastąpiło znaczne zwiększenie udziału porów w mikrostrukturze. Ponadto całkowita porowatość wszystkich badanych betonów z dodatkiem popiołu jest większa niż betonu zwykłego niewibrowanego, z wyjątkiem OW5SP2. Innymi słowy całkowity obszar zajęty przez pory mierzony na przekrojach, jest tym większy, im większy jest dodatek popiołu i im mniejszy dodatek domieszki upłynniającej.

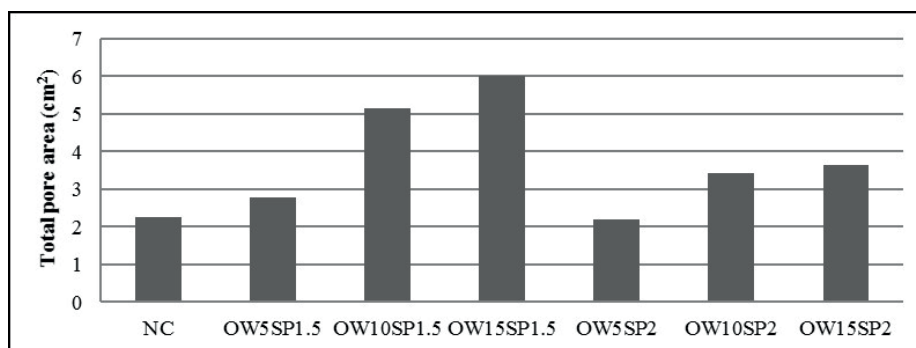
Na rysunku 7 przedstawiono zależność całkowitej powierzchni porów w zależności od wytrzymałości na ściskanie po 91 dniach dojrzewania. Oczywiście jest, że gdy całkowity obszar porów jest większy, mniejsza jest wytrzymałość na ściskanie.

### 3.4. Wpływ popiołu i superplastyfikatora na odporność na pękanie - $f_{pr}$ , $G_f$ i $I_{ch}$

Na rysunku 8 przedstawiono wytrzymałość na rozciąganie  $f_t$  uzyskane z badania trójpunktowego zginania, zmierzonego na belkach z karbem 100×100×500 mm. Stwierdzono, że dodanie 2% superplastyfikatora do mieszanek BSZ, powoduje zwiększenie wytrzymałości. Może to być spowodowane lepszą urabialnością i homogenicznością, która wynika z większej ilości domieszki upłynniającej. Z drugiej strony, większy dodatek popiołu, zmniejszył  $f_t$  o 14,8% dla betonu oznaczonego OW15SP1.5.

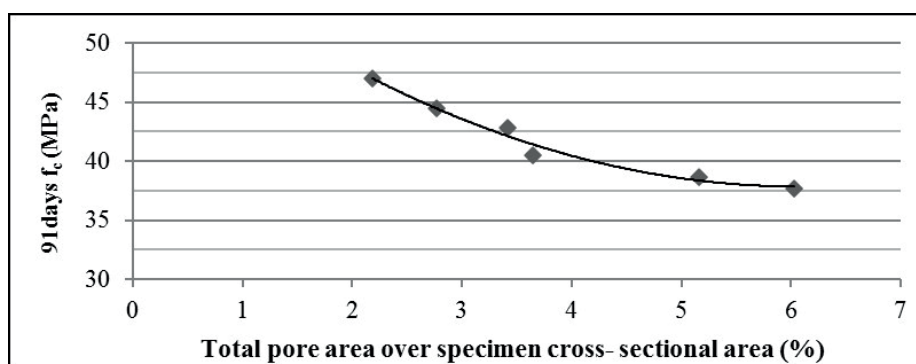
Podobnie jak w przypadku  $f_c$  i  $f_{spi}$ , dodatek popiołu również zmniejszyło wytrzymałość na rozciąganie  $f_t$ . Większy udział superplastyfikatora - 2% - częściowo zniwelował ten negatywny efekt, zwiększając  $f_t$  w przypadku próbek o mniejszym udziale domieszki - 1,5%. Z tego powodu, jak można zobaczyć na rysunku 8, wartość  $f_t$  mieszanki oznaczonej OW5SP2 jest najwyższa wśród próbek zawierających popiół i zbliżona do wyników dla betonu wzorcowego - niewibrowanego. Im większa jest zamiana kruszywa popiołem ze spalania odpadów z przetwórstwa oliwek i mniejszy jest dodatek superplastyfikatora, tym mniejsza jest wartość  $f_t$ .

It is also clear from Fig. 4 that,  $f_c$  values for all SCC mixes increased with the passing time from 28 to 91 days. Here, it might be important to mention, that the rate of increase in  $f_c$  values of OW specimens are slightly higher than the NC, which does not contain OW. It might be due to the high content of SiO<sub>2</sub> in OW, which undergoes the reaction with Ca(OH)<sub>2</sub> during long curing of concrete and form more C-S-H. At this stage it is important to clarify that; decrement in  $f_c$  values is either due to higher replacement of aggregate by OW, therefore; higher reduction in aggregate content, or inadequate SP addition, relative to the increased OW content.



Rys. 6. Wpływ OW i SP na całkowitą powierzchnię porów wzdłuż kierunku formowania

Fig. 6. Effects of OW and SP on the total pores area, along casting direction



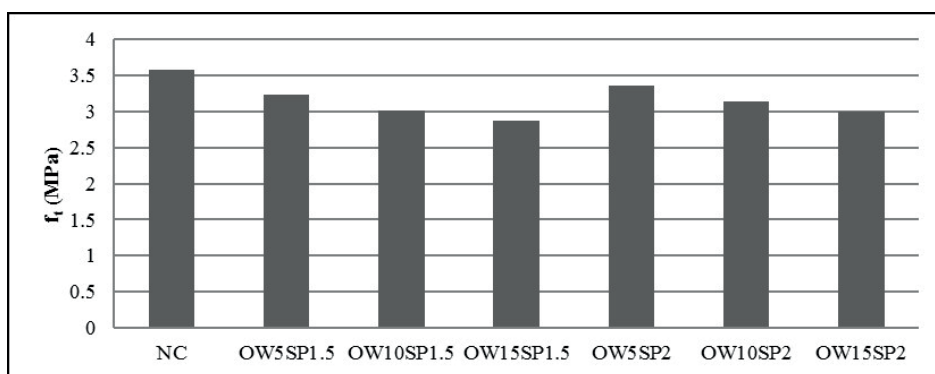
Rys. 7. Korelacja między udziałem porów, a wytrzymałością na ściskanie po 91 dniach dojrzewania

Fig. 7. Correlation between pores areas along casting direction and 91 days compressive strength

In Fig. 5 the tensile strength of SCC mixes according to splitting tests ( $f_{spi}$ ), is shown. It indicates that OW replacing coarse and fine aggregates reduces  $f_{spi}$ , and this decrement is also affected by SP value, where increment in SP improved the  $f_{spi}$ . Moreover, the results are showing that the values of  $f_{spi}$  for OW5SP2 and OW10SP2 were very similar and close to NC. It is important to underline, that the negative effect of OW replacement on  $f_{spi}$  is much lower, when it is compared with OW effect on  $f_c$ .

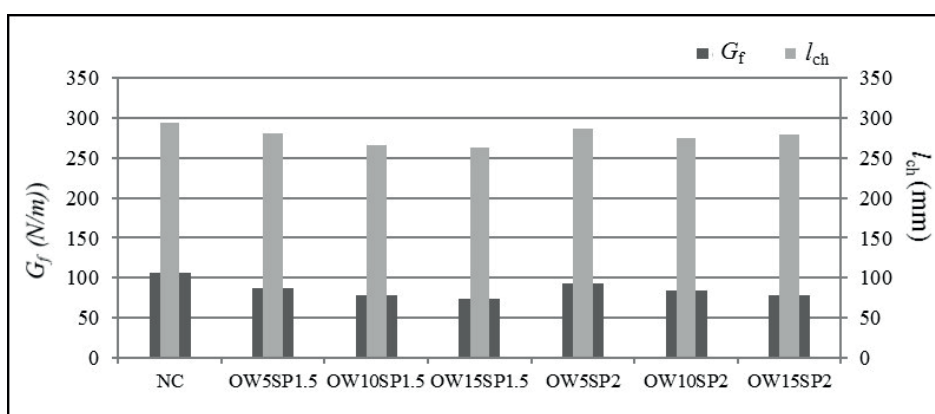
### 3.3. The effect of OW and SP on porosity measured by X-Ray CT method

According to the images of cubic specimens exported from X-Ray CT by Radiant and analyzed by ImageJ program, total pores areas calculated from 100x100 mm cross-sections, belonging to the casting direction of specimens, were found to be between



Rys. 8. Wpływ OW i SP na wytrzymałość na rozciąganie  $f_t$  betonów SCC i NC

Fig. 8. Effect of OW and SP on tensile strength  $f_t$  of SCC and NC mixes



Rys. 9.  $G_f$  i  $l_{ch}$  betonów SCC i NC

Fig. 9.  $G_f$  and  $l_{ch}$  of SCC and NC mixes

Podczas badania trójpunktowego zniszczenie zapoczątkowywane było we wcześniej naciętym karbie. Rysunek 9 pokazuje wyniki badania energii pękania  $G_f$  i charakterystycznej długości belek  $l_{ch}$ . Z badań jasno wynika, że popiół powoduje zmniejszenie  $G_f$ , głównie ze względu na zmniejszoną zawartość kruszywa. Jednak zwiększenie dodatku superplastyfikatora z 1,5% do 2% spowodowało zwiększenie energii pękania. Beton OW5SP2 osiągnął maksymalną energię pękania wśród wszystkich badanych BSZ, ale mniejszą niż dla betonu niewibrowanego. Im większy dodatek popiołu i mniejszy dodatek domieszki upłynniającej, tym mniejsza wartość  $G_f$ . Charakterystyczne zmiany długości  $l_{ch}$  od 263 do 281 mm dotyczą belek wykonanych z BSZ modyfikowanych popiołem. Ponadto stwierdzono, że  $l_{ch}$  wynosi 294 mm dla betonu niewibrowanego i jest największa spośród wszystkich badanych próbek.

Na rysunku 10 przedstawiono zależność pomiędzy  $G_f$ ,  $l_{ch}$  i  $f_c$  dla próbek po 91 dniach dojrzewania, za pomocą analizy regresji, o współczynnikach korelacji odpowiednio 0,97 i 0,82. Wartości  $G_f$  i  $l_{ch}$  zwiększają się wraz ze zwiększaniem się wartości  $f_c$ . Potwierdza to wcześniejsze doniesienia, że w przypadku zwykłego betonu wibrowanego, energia pękania zwiększa się wraz ze zwiększaniem się wytrzymałości na ściskanie (12).

Wyniki badań wpływu popiołu i superplastyfikatora na  $f_{sp}$ ,  $f_t$  i całkowite pole powierzchni porów dla wszystkich betonów ze-

2.18 cm<sup>2</sup> – for OW5SP2 and 6.03 cm<sup>2</sup> – for OW15SP1.5, as shown in Fig. 6. The results have shown that, beyond 5% OW replacement, considerable increment in pore areas occurred. Moreover, total pore areas of all the mixes are higher than NC, except OW5SP2. In other words, the higher is the OW replacement and lower is the SP content, much higher are the porosities, measured on cross-sections.

In Fig. 7 the total pores area over specimen cross-sectional area versus 91 days compressive strength of SCC mixes are presented. It is obvious that when the total pores area is higher, the  $f_c$  is lower. The rate of decrement in 91 days  $f_c$ , increased considerably for the specimens having total pores area, greater than 1.5%.

### 3.4. Effect of OW and SP on fracture properties – $f_b$ , $G_f$ and $l_{ch}$

In Fig. 8 the tensile strengths  $f_t$ , obtained from a three-point bending test, measured on 100x100x500 mm notched beams, are presented. It is found that the addition of 2% SP to SCC mixes results in higher  $f_t$ . This might be due to the higher workability and recovering homogeneity of the mixes, with a higher content of SP. On the other hand, the higher addition of OW, reduced  $f_t$  with a maximum reduction of 14.8% for OW15SP1.5.

Similar to  $f_c$  and  $f_{sp}$ , the OW replacement reduced  $f_t$  values as well, while increased SP from 1.5% to 2%, compensated this negative effect, and resulted in  $f_t$  increment. Therefore, as can be seen from Fig. 8,  $f_t$  value of OW5SP2 is the highest among OW specimens and close to NC results. The higher is the OW replacement and lower is the SP content, the lower is the  $f_t$  value.

During the three-point bending test, the failure of all the beams was through pre-notch, which was expected. Fig. 9 shows the fracture energy and characteristic length results of notched beams. It is clear from this figure that, higher OW replacement of the total aggregates results in lower  $G_f$ , mainly due to the reduced aggregate content. However, SP increment from 1.5% to 2% resulted in higher fracture energies. OW5SP2 reached the peak amount of fracture energy among all other SCC mixes, but lower than NC. The higher is the OW and lower is the SP, the lower are the  $G_f$  values. In the present study, characteristic length changes from 263 to 281 mm are for the beams made of SCC. Moreover,  $l_{ch}$  found to be 294 mm for NC, which is higher than all OW mixes.

In Fig. 10 the correlation between  $G_f$ ,  $l_{ch}$ , and 91 days  $f_c$ , by means of regression analysis with coefficients of 0.97 and 0.82, respectively, are represented. As it can be clearly seen from this figure,  $G_f$  and  $l_{ch}$

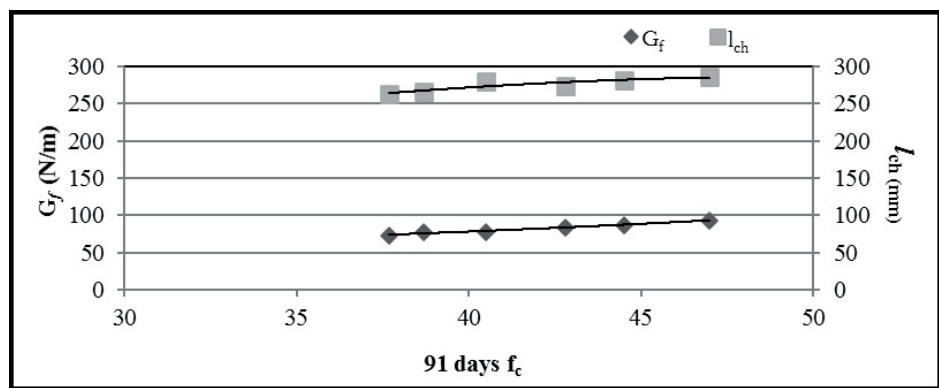


stawiono na rysunku 11. Można stwierdzić, że im większy dodatek popiołu i im mniej domieszki upłynniającej zastosowano, tym większa jest całkowita powierzchnia porów, a zatem tym mniejsza jest wytrzymałość na rozciąganie  $f_t$ . Różnice wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu  $f_{spl}$  między próbkami z dodatkiem popiołu, nie są już tak znaczące. Dodatek popiołu ze spalania odpadów z przetwórstwa oliwek i zmienna ilość domieszki upłynniającej wpływają na porowatość, a tym samym na wytrzymałość na rozciąganie. Negatywny wpływ jest szczególnie widoczny w próbkach z największym udziałem popiołu i najmniejszym dodatkiem domieszki.

## 5. Wnioski

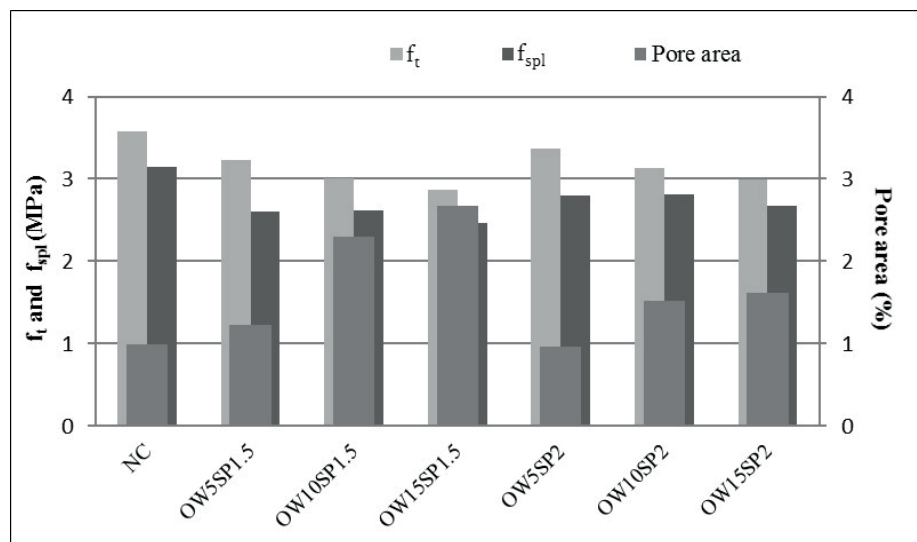
Wnioski wynikające z wyników przeprowadzonych badań są następujące:

- Wraz ze zwiększeniem dodatku popiołów ze spalania odpadów z oliwek w betonach samozagęszczających się zmniejsza się wytrzymałość na ściskanie, jednak negatywny efekt może być częściowo skompensowany zwiększeniem dodatku superplastyfikatora. Próbki z najmniejszą ilością popiołu i największym dodatkiem domieszki upłynniającej miały największą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do badanych BSZ i zbliżoną do betonu zwykłego niewibrowanego. Wartości  $f_c$  są mniejsze dla mieszanek z 1,5% superplastyfikatora, w porównaniu do mieszanek z 2% tej domieszki.
- Wytrzymałość betonów zwiększała się w czasie od 28 dnia do 91 dnia dojrzewania, a przyrost wytrzymałości w czasie był większy dla mieszanek samozagęszczających się, w porównaniu do betonu wibrowanego.
- Zamiana kruszywa popiołami ze spalania odpadów z przetwórstwa oliwek nie ma negatywnego wpływu na wytrzymałość na rozciąganie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu, o ile zastosuje się odpowiednio większy dodatek domieszki upłynniającej, równy 2% zamiast 1,5%.
- Dodatek popiołu w betonach spowodował zmniejszenie energii pęknięcia i wartości charakterystycznej długości; większy udział superplastyfikatora spowodował poprawę tych właściwości, w odniesieniu do mieszanek z mniejszym udziałem domieszki.
- Całkowite pole powierzchni przekroju porów zwiększa się ze zwiększaniem dodatku popiołu w betonie, jednak po zastosowaniu 2% domieszki upłynniającej porowatość, zmniejszyła się o połowę.



Rys. 10. Korelacja  $G_f$  i  $l_{ch}$  w funkcji wytrzymałości na ściskanie po 91 dniach

Fig. 10. Correlation of  $G_f$  and  $l_{ch}$  versus 91 days compressive strength



Rys. 11. Wpływ OW i SP na  $f_{spl}$ ,  $f_t$  i pole powierzchni porów

Fig. 11. Effect of OW and SP on  $f_{spl}$ ,  $f_t$  and pores area

values increase, with enhancing  $f_c$  value. It is previously concluded for normal vibrated concrete, that fracture energy increases when compressive strength increases (12).

The effects of OW and SP on  $f_{spl}$ ,  $f_t$  and total pores area for all SCC and NC mixes, are shown in Fig. 11. It can be stated that the higher is the OW proportion and the lower is the dosage of SP, the higher is the total pores area, and therefore, the lower is the resultant tensile strength  $f_t$ . However, different proportions of OW did not create considerable changes for  $f_{spl}$  values. OW addition and changed proportions linked with SP quantities, influence the porosity and therefore, the tensile strengths. This has been observed, particularly in the specimens produced with a high proportion of OW, but a lower dosage of SP.

## 5. Conclusions

The following conclusions from the experimental results of this study can be drawn:

- Dodatek popiołu i jego zmienne proporcje w największym stopniu wpływają na porowatość całkowitą, co szczególnie było widoczne w betonach z 15% popiołu i 1,5% superplastyfikatora.

## Literatura / References

1. B. Vakhshouri, S. Nejadi, Self-compacting light-weight concrete; mix design and proportions, *Struct. Eng. Mech.* **58** (1), 143-161 (2016).
  2. J. De Andalucia, Análisis de la Incidencia de la Supresión de la Que-ma de Residuos Agrícolas Sobre la Reducción de Emisiones de Gases Contaminantes en Andalucía. Consejería de Agriculturay Pesca, Seville, Spain, 2009.
  3. H. Hebhouh, M. Belachia, R. Djebien, Introduction of sand marble wastes in the composition of mortar, *Struct. Eng. Mech.* **49** (4) 491-498 (2014).
  4. H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *J. Adv. Concr. Technol.* **1** (1), 5-15 (2003).
  5. Y. Edamatsu, N. Nishida, M. Ouchi, A rational mix design method for self-compacting concrete considering interactions between coarse aggregate and mortar particles, The 1st International RILEM Symposium on self-compacting Concrete, Stockholm, Sweden, September, 1999.
  6. H. Okamura, K. Ozawa, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *Struct. Concr.* **1** (1), 3-17 (2000).
  7. N. Su, K. C. Hsu, H. W. Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* **31** (12), 1799-1807 (2001).
  8. M. Cruz-Yusta, I. Mármol, J. Morales, L. Sánchez, Use of olive biomass fly ash in the preparation of environmentally friendly mortar, *Environ. Sci. Technol.* **45**, 6991-6996 (2011).
  9. S. Alkheder, Y. T. Obaidat, M. Taamneh, Case study: Effect of olive waste (husk) on behavior of cement paste, *Case Stud. Constr. Mater.* **5**, 19-25 (2016).
  10. N. M. Al-Akhrasa, K. M. Al-Akhrasa, M. F. Attom, Performance of olive waste ash concrete exposed to elevated temperature, *Fire Saf. J.*, **44** (3), 370-375, (2009)
  11. J. Cuencaa, J. Rodríguezb, M. Martín-Moralesc, Z. Sánchez-Roldánc, M. Zamorano, Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* **40**, 702-709, (2013)
  12. W. S. Alyhya, M. S. Abo Dhaheer, M. M. Al-Rubaye, B. L. Karihaloo, Influence of mix composition and strength on the fracture properties of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* **110** (1), 312-322 (2016).
  13. H. Cifuentes, B. L. Karihaloo, Determination of size-independent specific fracture energy of normal-and high-strength self-compacting concrete from wedge splitting tests, *Constr. Build. Mater.* **48**, 458-553 (2013).
  14. C. Fava, L. Bergol, G. Fornasier, F. Giangrasso, C. Rocco, Fracture behaviour of self-compacting concrete, 3<sup>rd</sup> Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concrete, Bagnaux, France, June, 2003.
  15. J. Trägårdh, Microstructural features and related properties of self-compacting concrete, Procc. 1<sup>st</sup> Int. RILEM Symp. Self-compacting Concrete, Stockholm, 175-86, 1999.
  16. C. Yang, W. Chong, Y. Tao, Z. Wang, J. Ye, Y. Lin, Analysis on ITZ structure of self-compacting concrete, 2<sup>nd</sup> Int. Symposium on Design, Performance and Use of self-compacting Concrete, Beijing, China, p. 426-34, 2009.
  17. RILEM TC 187-SOC: Final Report, Experimental Determination of the Stress-Crack Opening Curve for Concrete in Tension." RILEM Publications S.A.R.L. Paris, France, 2007.
  18. A. Hillerborg, M. Modeer, P. E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cem Concr Res.* **6**, 773-782 (1976).
- While OW replacement and increment in its proportion decreased  $f_c$  in general, addition and increment in the proportion of SP, compensated the negative effect of OW on  $f_c$  and increased it. Specimens produced with lowest OW but highest SP [OW5SP2] has the highest  $f_c$  among all the mixes and very close to NC values.  $f_c$  values of the mixes produced with 1.5% SP are lower than the  $f_c$  values of the related samples, produced with 2% SP.
  - Compressive strength for all SCC mixes increased with the curing time from 28 days to 91 days. The rate of increment in  $f_c$  values of OW specimens is slightly higher than of NC.
  - In SCC mixes, replacement the aggregates with OW has no negative effect on tensile strength [ $f_{spl}$  and  $f_t$ ], as far as adequate flowability is achieved with appropriate SP value. For all proportions of OW – 5, 10 and 15%,  $f_c$ ,  $f_{spl}$  and  $f_t$  are higher when SP is increased from 1.5% to 2%.
  - OW replacement and increased quantity decrease both fracture energy and characteristic length. However, increased SP quantity increases fracture energy and brittleness index.
  - In general, the total pore area is increasing with OW replacement, in increased proportion. Pore areas are also related to the flowability of the concrete mixes, since pore areas decreased nearly to half with increased SP addition.
  - OW addition and changed proportions create the maximum effect on total pores area, particularly in the specimens produced with a high content of OW, but a lower dosage of SP.