

ANNA KOTWA  
Kielce University of Technology  
e-mail: a.ceglarska@tu.kielce.pl

## IMPACT OF ADDED CHALCEDONITE POWDER ON SELECTED CONCRETE PROPERTIES

### WPŁYW DODATKU PYŁU CHALCEDONITOWEGO NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BETONU

#### Abstract

*This article is about laboratory tests of concretes with 0%, 10%, 20% of the chalcedonite powder. Tested were the effect of the additions on compressive strength, absorbency and capillary strength of concrete. Compression strength was tested after 7, 14, 28, 56 and 90 days. The absorbability and capillary reinforcement of the concretes were tested after 28, 56 and 90 days. For concrete samples with 20% of the powder, the decrease in strength after 90 days of maturation is no more than 5% compared to the non-additive concrete series. In the absorbance test for the tested series with 20% of chalcedonite powder, a loss of weight gain of 11.3% was noted for the non-additive concrete after 90 days of maturation. The longer the concrete matures, the smaller the weight gain in the capillary action test. A similar tendency was noted for the amount of added additive. The more of the additive, the smaller the mass gain in absorbability and capillary action.*

**Keywords:** compressive strength, water absorption, capillary action, chalcedonite powder

#### Streszczenie

*Artykuł dotyczy badań laboratoryjnych betonów z dodatkiem 0%, 10%, 20% pyłu chalcedonitowego. Badano wpływ dodatku na wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i podciąganie kapilarne betonów. Wytrzymałość na ściskanie badano po upływie 7, 14, 28, 56 i 90 dniach. Nasiąkliwość i podciąganie kapilarne betonów zbadano po upływie 28, 56 i 90 dniach. Dla próbek betonowych z dodatkiem 20% pyłu spadek wytrzymałości po 90 dniach dojrzewania jest nie większy niż 5% w porównaniu do serii betonów bez dodatku. W badaniu nasiąkliwości dla badanej serii z 20% pyłu chalcedonitowego zanotowano spadek przyrostu masy o 11,3% w stosunku do betonu bez dodatku po 90 dniach dojrzewania. Im dłużej beton dojrzewa, tym mniejszy jest przyrost masy w badaniu podciągania kapilarnego. Podobną tendencję zauważono dla ilości wprowadzanego dodatku. Im więcej dodatku, tym mniejszy przyrost masy w nasiąkliwości i podciąganiu kapilarnym.*

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość na ściskanie, absorpcja wody, podciąganie kapilarne, mączka chalcedonitowa

#### 1. Introduction

The standard PN-EN 197-1:2012 allows the use of mineral additives for cement, both as a main ingredient (>5.0% by mass) and as secondary (<5.0% by mass) [7]. However, the standard PN-EN 206-1:2014 defines concrete additives and defines the rules for their use in the concrete mix. This standard defines an additive as a *fine-grained ingredient for use in concrete to improve certain properties or to obtain special properties of the concrete*. The amount of added type I and type II additives depends on the effect of these additives on selected

#### 1. Wprowadzenie

Norma PN-EN 197-1:2012 pozwala na stosowanie dodatków mineralnych do cementu, zarówno jako składnika głównego (>5,0% masy), jak i drugorzędowego (<5,0% masy) [7]. Natomiast norma PN-EN 206-1:2014 zawiera definicję dodatków do betonu oraz określa zasady ich stosowania w składzie mieszanki betonowej. Norma ta definiuje dodatek jako *drobnoziarnisty składnik stosowany do betonu w celu poprawy pewnych właściwości lub uzyskania przez beton specjalnych właściwości*. Ilość wprowadzanych dodatków typu I oraz typu II zależy od wpływu

rheological properties of the concrete mix and/or physical and mechanical parameters of the concrete. The standard PN-EN 206-1:2014 recommends laboratory tests to determine the effect of the amount and type of additives used on the concrete mix on the parameters of hardened concrete. We're talking here not only about the compressive strength but also about the frost resistance, resistance to chemical aggression or abrasion (Annex A to PN-EN 206-1:2014) [8]. The most common added additives to concrete are: ground blast furnace slag, fly ash and silica dust. They are used as additives for cements, mortars, concrete mixes. Additives should meet the standards and be used according to the rules in force. The proper use of additives has a positive effect on the rheological properties of the concrete mix (workability improvement) and the strengths of the concrete over a longer period of time. In the recent years, there is an increased interest among researchers [1-3] in new additives that can modify the properties of concrete mixes and concrete parameters. Many researchers have pointed to the problem of the management of waste materials generated during the production of crushed aggregates. Such additives can be: chalcedonite powder, meal and mineral powder. The use of waste additives for the production of concrete mixtures is part of a sustainable development strategy [9, 10]. Choosing the right amount of additive to the concrete mix allows optimization of clinker consumption, saving natural resources and reducing the negative impact on the environment [1-3, 5].

## 2. Materials and methods

Three series of concretes containing chalcedonite dust were made in laboratory tests at 0%, 10%, 20%. Concrete mixtures were made of cement CEM I 42.5R (Table 1), quartz sand 0–2 mm and dolomite aggregate 8/18 mm and 8/16 mm with a constant ratio of  $w/s = 0.30$ . The following assumptions were made: exposure class – XF4, mixture consistency according to PN-EN 12350-8:2012 – S2 [6].

ich na wybrane cechy reologiczne mieszanki betonowej lub/i parametry fizyczno-mechaniczne betonów. Norma PN-EN 206-1:2014 zaleca wykonanie badań laboratoryjnych określających wpływ ilości i rodzaju zastosowanych dodatków do mieszanki betonowej na parametry stwardniałego betonu. Mowa tutaj nie tylko o wytrzymałości na ściskanie, ale również o mrozoodporności, odporności na agresję chemiczną czy ścieralność (załącznik A do PN-EN 206-1:2014) [8]. Najczęściej wprowadzanymi dodatkami są: mielony żużel wielkopiecowy, popiół lotny oraz pył krzemionkowy. Stosowane są jako dodatki do cementów, zapraw, mieszanek betonowych. Powinny spełniać wymagania normowe i być stosowane według obowiązujących zasad. Właściwe ich wykorzystanie wpływa pozytywnie na cechy reologiczne mieszanki betonowej (poprawa urabialności) oraz parametry wytrzymałościowe betonów w dłuższym okresie czasu. W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie badaczy [1-3] nowymi dodatkami, którymi można modyfikować właściwości mieszanek betonowych i parametry betonu. Wielu badaczy zwróciło uwagę na problem zagospodarowania odpadowych materiałów powstałych przy produkcji kruszyw łamanych. Takimi dodatkami mogą być: pył chalcedonitowy oraz mączka i pył mineralny. Wykorzystanie odpadowych dodatków do produkcji mieszanek betonowych wpisuje się w strategię zrównoważonego rozwoju [9, 10]. Dobranie odpowiedniej ilości dodatku pozwala na optymalizację zużycia klinkieru, oszczędność naturalnych surowców oraz ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne [1-3, 5].

## 2. Materiały i metody

W badaniach laboratoryjnych wykonano trzy serie betonów z dodatkiem pyłu chalcedonitowego w ilości 0%, 10%, 20%. Mieszanki betonowe wykonano z cementu CEM I 42,5R (tabela 1), piasku kwarcytowego 0-2 mm oraz kruszywa dolomitowego 8/18 mm i 8/16 mm o stałym stosunku  $w/s = 0,30$ . Przyjęto następujące założenia: klasa ekspozycji – XF4, konsystencja mieszanki wg PN-EN 12350-8:2012 – S2 [6].

Table 1. Information on basic properties of the cement [www.dyckerhoff.pl]

Tabela 1. Informacje o podstawowych właściwościach cementu [www.dyckerhoff.pl]

No.	Cement type	Chemical composition [%]					Specific surface according Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	Resistance [MPa]	
		SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		R <sub>2</sub>	R <sub>28</sub>
1.	CEM I 42.5R	19.84	63.2	2.08	2.72	4.65	4086	32.0	53.0

Chalcedonite powder used in laboratory tests is a waste material produced in the chalcedonite aggregate mine. It has the same mineral (chemical) composition as the aggregate from which it originates. So, it is not dangerous, but it has a negative impact on the environment.

Particle size of chalcedonite meal was measured by laser diffractometer.

$x_{10} = 0.28 \mu\text{m}$        $x_{50} = 3.87 \mu\text{m}$        $x_{90} = 25.53 \mu\text{m}$        $SMD = 0.90 \mu\text{m}$        $VMD = 9.50 \mu\text{m}$   
 $x_{16} = 0.44 \mu\text{m}$        $x_{84} = 22.38 \mu\text{m}$        $x_{99} = 34.99 \mu\text{m}$        $S_V = 6.64 \text{ m}^2/\text{cm}^3$        $S_m = 66392.20 \text{ cm}^2/\text{g}$

Pył chalcedonitowy użyty w badaniach laboratoryjnych jest materiałem odpadowym, powstałym w kopalni kruszywa chalcedonitowego. Posiada taki sam skład mineralny (chemiczny) jak kruszywo, z którego pochodzi. Zatem nie jest niebezpieczny, ale ma negatywny wpływ na środowisko naturalne.

Wielkość cząstek mączki chalcedonitu zbadano za pomocą dyfraktometru laserowego.

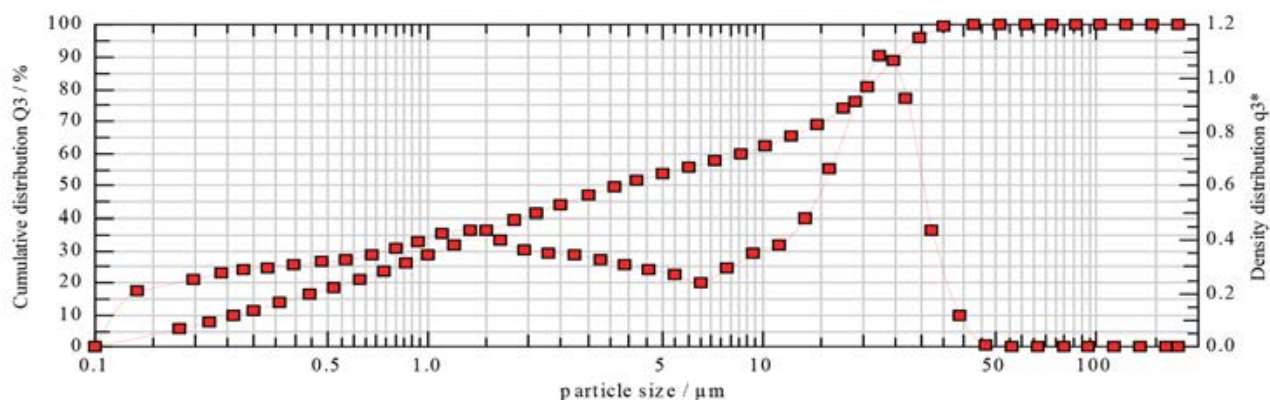


Fig. 1. Particle size of chalcedonite powder  
 Rys. 1. Wielkość rozkładu ziaren pyłu chalcedonitowego

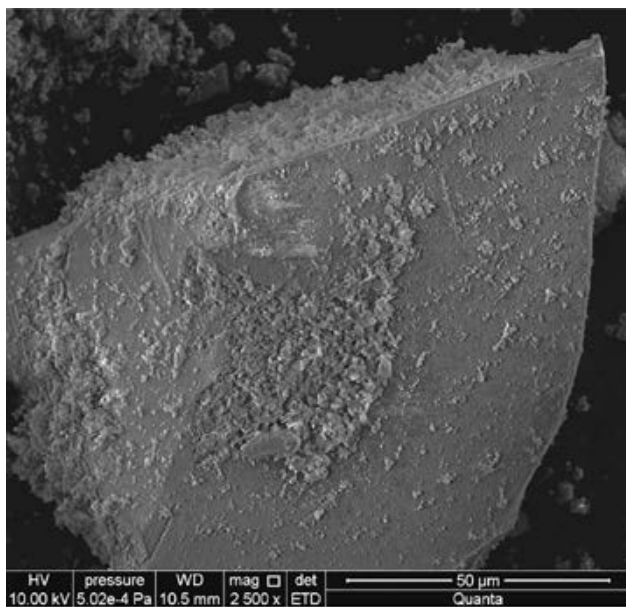


Fig. 2. Microstructure of chalcedonite meal  
 Rys. 2. Mikrostruktura mączki chalcedonitowej

Table 2. Chemical composition of chalcedonite powder  
 Tabela 2. Skład chemiczny pyłu chalcedonitowego

Compound	Content of elements [%]
F	0.06
NA <sub>2</sub> O	0.09
MgO	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.04
SiO <sub>2</sub>	91.8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04
SO <sub>3</sub>	0.05
K <sub>2</sub> O	0.42
CaO	0.45
TiO <sub>2</sub>	0.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.28
ZrO <sub>2</sub>	0.01
BaO	0.04

Powder particle size distribution has been established based on laboratory tests. The share of grains up to 2 μm is equal 17.5%. In the range of 2 μm to 10 μm is equal 22.5%. The highest share of grains

Rozkład wielkości ziaren pyłu został ustalony na podstawie badań laboratoryjnych. Udział ziaren o wielkości do 2 μm to 17,5%. W przedziale od 2 μm do 10 μm znajduje się 22,5%. Najwięcej udziału mają

is between 10  $\mu\text{m}$  and 40  $\mu\text{m}$  and is 42.5%. 99% of the grains do not exceed 72  $\mu\text{m}$ .

A highly plasticizing chemical admixture is being used that also homogenizes the concrete mix, improves the workability of the mix and thus does not affect the cement bonding time delay, reduces the need of water in the mix, increases the early strength of the concrete.

Chalcedonite powder was added to reduce the amount of sand in the concrete mix.

Table 3. Composition of concrete mixes per 1 m<sup>3</sup>

Tabela 3. Skład mieszanek betonowych na 1 m<sup>3</sup>

Components of the concrete mix	SW series	Series with 10% powder added in total is 10%	Series with 20% powder added in total is 20%
cement CEM I 42.5R	420	420	420
water	135	135	135
sand	732	690	648
dolomite 4/8	558	558	558
dolomite 8/16	645	645	645
chalcedonite powder	0	42	84
chemical admixture	3.2	3.7	4.2

The test program covered three batches of concrete with differing quantitative compositions. Consideration was given to the effect of the maturation period (7, 14, 28, 56, 90 days) and the amount of added concrete additive to the selected parameters (compressive strength, absorbability and capillary action) of concrete.

Compression strength was tested on cube shaped samples with a side length of 10 cm in accordance with PN-EN 206-1:2014. Samples were packed in water at +18°C for the entire ripening period. Compression strength was tested after 7, 14, 28, 56, 90 days [8].

Capillary action was carried out in accordance with PN-88/B-06250 on samples of 10 x 10 x 10 cm each. Samples after being formed were stored in water at +18°C for a period of 7 days. The next days of the sample were placed in an air-dry environment at +18°C. Weight gain was tested after 28, 56 and 90 days of maturation. Prior to testing the samples were placed in the air conditioning chamber at +105°C for a period of 72 hours. After this time, samples' weight increase was tested after 15 min, 30 min, 1 h, 4 h after contact of samples with water. The next measurements were made every 24 hours. Samples were immersed at about 3 mm.

ziarna o wielkości od 10  $\mu\text{m}$  do 40  $\mu\text{m}$  i jest to 42,5%. 99% ziaren nie przekracza wielkości 72  $\mu\text{m}$ .

Zastosowano domieszkę chemiczną uplastyczniającą, która ma działanie mocno plastyfikujące, homogenizuje mieszankę betonową, poprawiając urabialność mieszanki przy tym samym w/c, nie wpływa na opóźnienie czasu wiązania cementu, zmniejsza zapotrzebowanie mieszanki na wodę, zwiększa wczesną wytrzymałość betonu.

Pył chalcedonitowy dodawano, zmniejszając ilość piasku w mieszance betonowej.

Program badań obejmował wykonanie trzech serii betonów różniących się składem ilościowym. Pod uwagę brano wpływ długości okresu dojrzewania betonów (7, 14, 28, 56, 90 dni) oraz ilość wprowadzonego dodatku do mieszanki betonowej na wybrane parametry (wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i podciąganie kapilarne) betonów.

Wytrzymałość na ściskanie badano na próbkach w kształcie sześcianu o długości boku 10 cm zgodnie z normą PN-EN 206-1:2014. Próbkę po zaformowaniu przez cały okres dojrzewania przechowywane były w wodzie w temperaturze +18°C. Wytrzymałość na ściskanie badano po upływie 7, 14, 28, 56, 90 dni [8].

Podciąganie kapilarne wykonano zgodnie z normą PN-88/B-06250 na próbkach o wymiarach 10x10x10 cm. Próbkę po zaformowaniu przechowywano w wodzie w temperaturze +18°C przez okres 7 dni. Następne dni próbki przebywały w środowisku powietrzno-suchym w temperaturze +18°C. Przyrost masy próbek badano po upływie 28, 56 i 90 dni dojrzewania. Przed badaniem próbki umieszczano w komorze klimatyzacyjnej w temperaturze +105°C na okres 72 h. Po tym czasie badano przyrost masy próbek po upływie 15 min, 30 min, 1 h, 4 h od czasu kontaktu próbek z wodą. Następne pomiary były dokonywane co 24 h. Próbkę zanurzone były na wysokość około 3 mm.

Water absorption tests were performed in accordance with PN-88/B-06250 standard on 10 cm cubic samples. Samples were stored for a period of 7 days in water at +18°C and subsequent days to be tested in air at +18°C. Samples were dried to constant mass for 72 h in the air conditioning chamber. Samples were placed in half-height in the water for 24 hours. After this time, water was added to a height of +1 cm above the height of the sample. Mass gain was tested every 24 h to obtain two identical measurements [4].

### 3. Results analysis

Figure 3 shows the mean compressive strength increase for the tested concrete series with the addition of chalcedonite powder in the amount of 10%, 20% and the reference concrete.

The addition of chalcedonite powder did not change the compressive strength of the concrete after 90 days. However, compression strength reduction after 28 and 56 days of maturation with 10% and 20% of chalcedonite powder by 10.2% was observed.

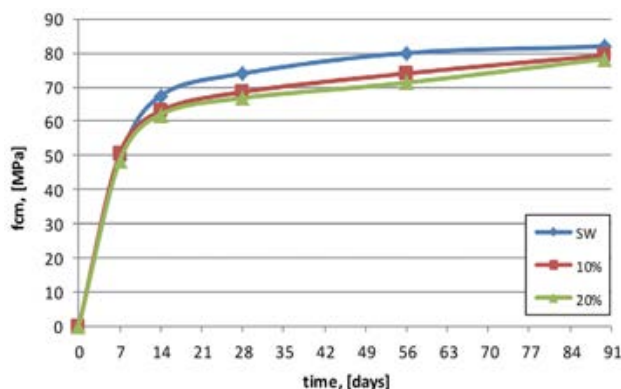


Fig. 3. Increased of the compressive strength of the tested series  
Rys. 3. Przyrost wytrzymałości na ściskanie badanych serii

Figure 4 shows an increase in the mass of samples during the capillary action test after 28, 56, 90 days of observing the maturing concrete process.

By analyzing the results of weight gain in the capillary action test, it can be observed that the longer the concrete is maturing, the greater the mass gain is smaller. 90 days after sample preparation, weight gain is comparable for all tested series and is approximately equal 31 kg/m<sup>2</sup>. Comparing different times of maturation, mass gain was reduced by 54% for concretes after 90 days of ripening compared to samples after 28 days of ripening.

Badanie nasiąkliwości wykonywano zgodnie z normą PN-88/B-06250 na próbkach sześciennych o boku 10 cm. Próbki przechowywane były przez okres 7 dni w wodzie w temperaturze +18°C, a w kolejne dni do wykonania badania w powietrzu w temperaturze +18°C. Próbki suszone były do stałej masy przez czas 72 h w komorze klimatyzacyjnej. Próbki umieszczono w wodzie do połowy wysokości przez okres 24 h. Po tym czasie uzupełniono wodę do wysokości +1 cm ponad wysokość próbki. Przyrost masy badano co 24 h, do uzyskania dwóch identycznych pomiarów [4].

### 3. Analiza wyników

Na rysunku 3 przedstawiono średni przyrost wytrzymałości na ściskanie dla badanych serii betonów z dodatkiem pyłu chalcedonitowego w ilości 10%, 20% i betonu referencyjnego.

Dodatek pyłu chalcedonitowego nie spowodował zmiany wytrzymałości na ściskanie betonu po 90 dniach. Natomiast odnotowano zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 28 i 56 dniach dojrzewania dla serii betonów z 10% i 20% pyłu chalcedonitowego o 10,2%.

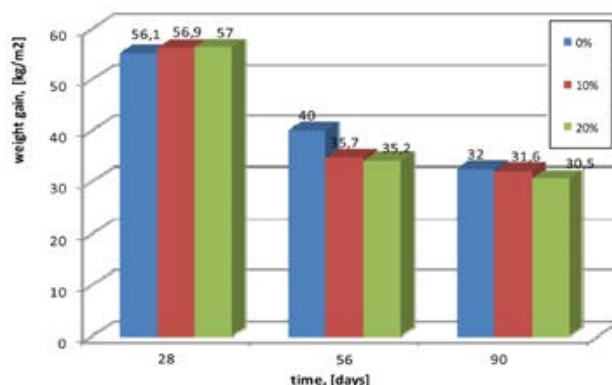
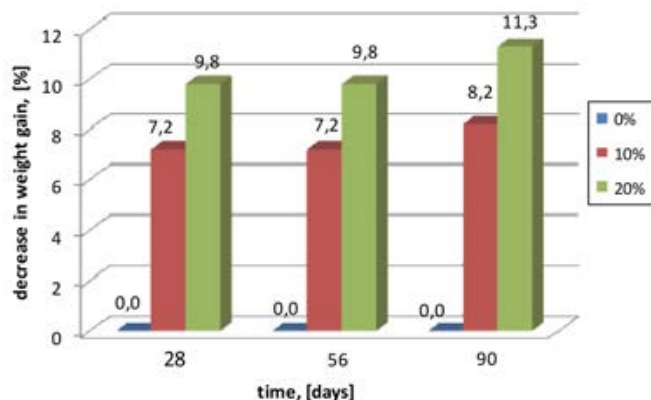


Fig. 4. Mass gain in capillary action test  
Rys. 4. Przyrost masy w badaniu podciągania kapilarnego

Na rysunku 4 przedstawiono przyrost masy próbek betonowych dojrzewających 28, 56, 90 dni podczas badania podciągania kapilarnego.

Analizując wyniki przyrostu masy próbek w badaniu podciągania kapilarnego, można zaobserwować, że im dłużej betony dojrzewają, tym przyrost masy jest mniejszy. Po upływie 90 dni od wykonania próbek przyrost masy jest porównalny dla wszystkich badanych serii i wynosi około 31 kg/m<sup>2</sup>. Porównując po różnym czasie dojrzewania, przyrost masy zauważono obniżony o 54% dla betonów po 90 dnia dojrzewania w stosunku do próbek badanych po 28 dniach dojrzewania.

Figure 5 shows the percentage decrease in the weight gain of concretes with added chalcedonite powder compared to reference concrete. Samples were tested after 28, 56, and 90 maturing days.



Na rysunku 5 przedstawiono procentowe zmniejszenie przyrostu masy betonów z dodatkiem pyłu chalcedonitowego w porównaniu do betonu referencyjnego. Zmianę masy próbek badano po upływie 28, 56, 90 dni dojrzewania.

Fig. 5. Mass loss of concrete with additions of 10%, 20% of chalcedonite powder compared to reference concrete after 28, 56 and 90 days of ripening

Rys. 5. Spadek przyrostu masy betonów z dodatkami 10%, 20% pyłów chalcedonitowych w porównaniu do betonu referencyjnego po 28, 56, 90 dniach dojrzewania

By analyzing the results of the absorbability of concretes, it can be stated that the percentage increase in mass of samples after 28 and 56 days of maturation is identical. For maturing samples over a period of 90 days, a decrease of mass gain of 11.3% for samples with 20% chalcedonite powder was observed in relation to the 90-day maturing period of the reference concrete. The greater the additive in the form of chalcedonite powder, the smaller the weight gain in the test. If 10% of the chalcedonite powder is added to the concrete mix, the increase of mass is lowered in the absorbance test by 8.2% with respect to concrete without chalcedonite additive after 28 days of maturation. This is probably due to the sealing of the cement grout.

#### 4. Conclusion

The results of the research are the basis for drawing the following conclusions:

- introducing up to 20% of the chalcedonite powder into the concrete mix results in a reduction in compressive strength after 90 days by less than 5%, after 28 days the reduction in strength is about 10%;
- in the capillary action test, it can be seen that mass gain is comparable for all tested series and is approximately 31 kg/m<sup>2</sup> after 90 days of ripening. Comparing maturation times, the mass gain was reduced by 54% of concrete after 90 days of maturation with respect to concretes tested at 28 days of maturation;
- the absorbability after 90 days of maturation is lower by 11.3% for the tested series with 20%

Analizując otrzymane wyniki nasiąkliwości betonów, można stwierdzić, że procentowy przyrost masy próbek po upływie 28 i 56 dni dojrzewania jest identyczny. Dla próbek dojrzewających przez okres 90 dni następuje spadek przyrostu masy o 11,3% dla próbek z 20% pyłu chalcedonitowego w stosunku do badanego betonu referencyjnego dojrzewającego 90 dni. Im więcej dodatku w postaci pyłu chalcedonitowego, tym mniejszy przyrost masy w badaniu. Jeżeli do mieszanki betonowej dodamy 10% pyłu chalcedonitowego, następuje spadek przyrostu masy w badaniu nasiąkliwości o 8,2% w stosunku do betonów bez dodatku chalcedonitowego po 28 dniach dojrzewania. Jest to zapewne spowodowane uszczelnieniem się zaczynu cementowego.

#### 4. Podsumowanie

Wyniki badań stanowią podstawę do wyciągnięcia następujących wniosków:

- wprowadzenie do mieszanki betonowej nawet 20% pyłu chalcedonitowego powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ścislenie po upływie 90 dni o mniej niż 5%, po 28 dniach zmniejszenie wytrzymałości wynosi około 10%;
- w badaniu podciągania kapilarnego można zauważyć, iż przyrost masy jest porównalny dla wszystkich badanych serii i wynosi około 31 kg/m<sup>2</sup> po 90 dniach dojrzewania. Porównując czasy dojrzewania, zauważono obniżony przyrost masy o 54% betonów po 90 dniach dojrzewania w stosunku do betonów badanych w 28 dniu dojrzewania;
- nasiąkliwość po 90 dniach dojrzewania jest dla badanej serii z 20% pyłu chalcedonitowego niższa

chalcedonite powder compared to the series of concrete without the additive. If we compare a series of concretes with 20% of the powder tested after 90 days and a series of concretes without the additive after 28 days, the decrease in mass gain is 13.3%;

- elongation of concrete maturation has positive effects on compressive strength, capillary action and absorbability;
- the use of chalcedonite powder in concrete mixes causes the cement matrix to seal;
- considering the economic and environmental factors, it is recommended to use in concrete mixtures a chalcedonite powder additive in the amount of up to 20%. The use of chalcedonite powder as an additive in concrete could help to solve the problem of storage and use of waste from the production of chalcedonite aggregates.

o 11,3% w stosunku do serii betonów bez dodatku. Jeżeli porównamy serię betonów z dodatkiem 20% pyłu badaną po upływie 90 dni i serię betonów bez dodatku badaną po 28 dniach, to spadek przyrostu masy wynosi 13,3%;

- wydłużenie czasu dojrzewania betonów wpływa pozytywnie na parametry wytrzymałości na ściskanie, podciągania kapilarnego i nasiąkliwości;
- zastosowanie pyłu chalcedonitowego w mieszankach betonowych powoduje uszczelnienie matrycy cementowej;
- rozpatrując czynniki ekonomiczne i środowiskowe, należy do mieszanek betonowych stosować dodatek w postaci pyłu chalcedonitowego w ilości do 20%. Zastosowanie pyłu chalcedonitowego jako dodatku do betonu mogłoby pomóc w rozwiązaniu problemu, jakim jest składowanie oraz wykorzystanie odpadów z produkcji kruszyw chalcedonitowych.

## References

- [1] Śliwiński J., *Basic properties of concrete and its durability*, „Cement – Wapno – Beton” 2009, nr 5, pp. 245–254.
- [2] Giergiczny Z., *Mineral additives – indispensable components of modern cement and concrete*, „Building Materials” 2009, nr 3, pp. 46–50.
- [3] Giergiczny Z., *Concrete additives in light of standard requirements*, „Building Materials” 2007, nr 11, pp. 10–13.
- [4] PN-88/B-06250 Ordinary concrete.
- [5] Kurdowski W., *Chemistry of cement and concrete*, Association of Cement Manufacturers, Kraków 2010.
- [6] PN-EN 12350-8:2012 Concrete Mix Testing – Part 8: Self-compacting Concrete – Conveying Tests.
- [7] PN-EN 197-1:2012 Cement – Part 1: Composition, requirements and conformity criteria for common cements.
- [8] PN-EN 206-1:2014 Concrete – Requirements, properties, manufacture and compatibility.
- [9] Kotwa A., *Influence of sub-zero temperature and initial set time on the properties of hardened concrete*, „Structure and Environment” 2011, No. 3, pp. 11–17.
- [10] Kotwa A., Spychał E., *Effect of mineral additives on the properties of concrete*, „Structure and Environment” 2016, No. 2, pp. 91–97.