

16. WPLYW PYŁÓW MINERALNYCH I WŁÓKIEN POLIMEROWYCH NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach powstało wiele prac badawczych mających na celu rozpoznanie wpływu domieszek chemicznych, dodatków mineralnych czy też mikrozbrojenia na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu [7]. Obecny stan wiedzy nie jest wystarczający do efektywnego wykorzystywania mieszanek betonowych z dodatkiem włókien polimerowych i pyłów mineralnych [1]. Opracowanie składu mieszanki betonowej ze zbrojeniem rozproszonym i zastąpienie części kruszywa pyłem mineralnym może być zamiennikiem dla betonu zwykłego, ponieważ daje możliwość zagospodarowania hałd znajdujących się przy każdej kopalni kruszywa. Pył mineralny posiada takie same właściwości, jak kruszywo, z którego pochodzi. Zatem nie jest niebezpieczny, ale ma negatywny wpływ na środowisko naturalne. Uzyskanie pyłu mineralnego nie jest zatem kosztowne, a przede wszystkim obniża koszty produkcji mieszanek betonowych [3]. Kolejnym pozytywnym aspektem modyfikacji mieszanki betonowej jest łatwość jej wykonywania. Dodanie do mieszanki betonowej włókien polimerowych pozwoli na przejście naprężenia rozciągającego w pierwszym okresie dojrzewania betonu oraz pozwala dostatecznie zredukować rozwarłość mikrorys pojawiających się na skutek skurczu plastycznego zaczynu cementowego [1, 5]. Oczekuje się, że po wprowadzeniu zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polimerowych przełoży się to na podwyższenie wytrzymałości na ściskanie, redukcję nasiąkliwości i podciągania kapilarnego. Stąd, fibrobetony znajdują zastosowanie przy budowie obiektów narażonych na działanie cieczy w zmiennych warunkach klimatycznych oraz na obciążenia dynamiczne.

W ostatnich latach obserwuje się w Polsce znaczący wzrost kosztów materiałów budowlanych i robocizny, co z pewnością doprowadzi do coraz szerszego wykorzystania w praktyce budowlanej betonów wysokiej wytrzymałości (BWW). W przypadku BWW zyskuje się obniżenie ciężaru własnego konstrukcji oraz zmniejszenie ilości zastosowanej stali zbrojeniowej [6]. Dlatego staje się oczywiste, że wraz z rozwojem technologii będziemy obserwować stosowanie, również w budownictwie kubaturowym, betonów o coraz większej wytrzymałości, a w konsekwencji o coraz większej kruchości. Zatem konieczne będzie wprowadzenie do składu betonu BWW, np. włókien polimerowych w formie zbrojenia rozproszonego, w celu poprawienia cech plastycznych kompozytu. Konsekwencją tego będzie zastąpienie, w wielu przypadkach, betonu fibrobetonem. Stopień poprawy właściwości plastycznych kompozytu, poprzez wprowadzenie do składu betonu zbrojenia rozproszonego, zależy przede wszystkim od materiału, z którego wykonano włókna, ich zawartości w jednostce objętości betonu, kształtu, długości i średnicy włókien oraz wielu innych parametrów. Badania takie są prowadzone zarówno w odniesieniu do betonu zwykłego, jak i betonów wysokiej wytrzymałości.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań wybranych parametrów, tj. nasiąkliwości, podciągania kapilarnego oraz wytrzymałości na ściskanie betonów modyfikowanych włóknami polimerowymi, pyłami mineralnymi uzyskiwanymi w procesie produkcji kruszywa w każdej kopalni oraz żużlem wielkopieczowym [2].

2. BADANIA WŁASNE

Program badań laboratoryjnych obejmował wykonanie pięciu serii betonów wysokiej wytrzymałości z dodatkiem pyłu mineralnego w ilości 5%, żużla wielkopieczowego oraz włókien polimerowych w ilości $0,9 \text{ kg/m}^3$ mieszanki betonowej (tab. 1). Pył mineralny zastępował procentowo ilość kruszywa w mieszance betonowej, natomiast ilość wody i cementu pozostawiono bez zmian. Do badań użyto cementu CEM I 42,5R. Mieszanki betonowe wykonane były o stałym stosunku wodno-cementowym wynoszącym 0,54.

Tabela 1. Skład pięciu serii betonów

Table 1. Concrete composition

Składniki betonu [kg/m ³]	Beton zwykły	Beton z dodatkiem 5% pyłu	Beton z dodatkiem 5% pyłu i włókien	Beton z dodatkiem żużla	Beton z dodatkiem żużla i włókien
Cement	334	334	334	334	334
Woda	181	181	181	181	181
Piasek	625	593,75	593,75	593,75	593,75
Dolomit 4/8	581	551,95	551,95	551,95	551,95
Dolomit 8/16	581	551,95	551,95	551,95	551,95
Pył mineralny	----	89,35	89,35	----	----
Włókna polimerowe	----	----	0,9	----	0,9
Żużel wielkopieczowy	----	----	----	89,35	89,35
Superplastyfikator	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67

Włókna polimerowe użyte do badań laboratoryjnych były o długości 18 mm, średnicy $32 \mu\text{m}$ i kształcie okrągłym. Przeznaczone do stosowania w temperaturze $+5^\circ\text{C} \div 25^\circ\text{C}$. Według producenta włókna zapobiegają pęknięciom skurczowym, poprawiają przy tym wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Ponadto włókna zwiększają mrozoodporność i zmniejszają podatność na korozję. Przeznaczone do stosowania w produkcji prefabrykatów, posadzek przemysłowych, wylewek, betonu towarowego, basenów, tuneli, itp. Włókna należy dozować do suchej masy przed dodaniem wody zarobowej i plastyfikatora w ilości $0,75 \div 0,9 \text{ kg/m}^3$ betonu lub zaprawy. Należy mieszać mieszankę betonową od 1 do 6 minut z prędkością 12 obr/min. Do badań laboratoryjnych użyto superplastyfikator Stachement 2750, który charakteryzuje się przede wszystkim bardzo wysokim działaniem upłynniającym i bardzo szybkim przyrostem początkowej wytrzymałości na ściskanie nawet w niskich temperaturach, zapewniając jednocześnie uzyskanie betonu o niskiej lepkości. Zalecany przede wszystkim do betonów SCC. Producent zaleca dawkę $0,3 \div 1,5 \text{ kg}$ na 100 kg cementu. Superplastyfikator dozować należy do wody zarobowej lub – w celu zwiększenia działania – do wilgotnej już mieszanki betonowej pod koniec mieszania. Do betonów zastosowano superplastyfikator w ilości 0,8 kg na każde 100 kg cementu. Program badań laboratoryjnych obejmował

mował wykonanie pięciu serii betonów po 21 próbek w kształcie kostek sześciennych o boku 10 cm. Badano wpływ pyłu mineralnego, żużla wielkopieczowego oraz włókien polimerowych na zmianę wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwość i podciąganie kapilarne. Po przygotowaniu wszystkich składników mieszanki betonowej dozowano je w następującej kolejności:

- kruszywo grube dolomit 8/16,
- kruszywo drobne dolomit 4/8,
- piasek frakcji 0÷4 mm,
- pył mineralny,
- cement CEM I 42,5R,
- włókna polimerowe,
- woda,
- superplastyfikator.

Wszystkie składniki zważono z dokładnością do 0,01 g. Superplastyfikator dodawano do wilgotnej mieszanki betonowej. Pył mineralny, który pochodził z kopalni kruszywa w Górnio koło Kielc, zastosowano o frakcji poniżej 0,063 mm.

W celu większej czytelności wprowadzono następujące oznaczenia mieszanek betonowych:

- beton zwykły, ozn. SW,
- beton z dodatkiem pyłu mineralnego, ozn. pył,
- beton z dodatkiem pyłu mineralnego i włókien polimerowych, ozn. pył, włókna,
- beton z dodatkiem żużla wielkopieczowego, ozn. żużel,
- beton z dodatkiem żużla wielkopieczowego i włókien polimerowych, ozn. żużel, włókna.

Wytrzymałość na ściskanie badano na próbkach sześciennych, które po zaformowaniu dojrzewały w wodzie w temperaturze +18°C przez okres 28 dni. Wytrzymałość na ściskanie badano po upływie 7, 14, 28 dni od zaformowania. Do każdego badania używano po trzy próbki.

Kolejnym badaniem, jakie przeprowadzono, było określenie nasiąkliwości. Próbki po zaformowaniu dojrzewały przez okres 7 dni w wodzie w temperaturze +18°C, następnie 21 dni dojrzewały w powietrzu w temperaturze +18°C±2°C. Po tym czasie próbki umieszczono w komorze klimatyzacyjnej, gdzie zostały wysuszone do stałej masy w temperaturze 105°C. Po wystudzeniu próbek, zważono je i umieszczono w pojemniku z wodą na podkładkach z tworzywa sztucznego. Woda sięgała do połowy wysokości próbek betonowych przez pierwsze 24 h, potem próbki były zalane całkowicie wodą do wysokości +1 cm nad powierzchnię górną próbek. Wodę sukcesywnie uzupełniano. Badanie nasiąkliwości polegało na pomiarze zmiany masy próbek z dokładnością do 0,01 g. Pomiar zmian masy prowadzony był do uzyskania dwóch jednakowych wyników. Próbki ważono co 24 h. Dla każdej badanej serii przygotowano po trzy próbki [4].

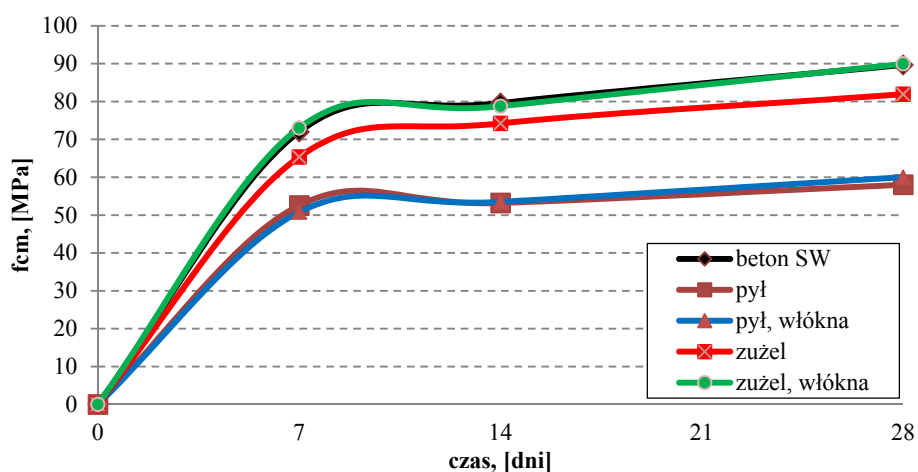
Badanie podciągania kapilarnego wykonano na próbkach, które po zaformowaniu dojrzewały w wodzie w temperaturze +18°C przez okres 7 dni. Kolejne 21 dni dojrzewały na powietrzu w temperaturze +18°C ± 2°C. Po tym czasie próbki przeniesiono do komory klimatyzacyjnej gdzie były suszone do stałej masy. Temperatura w komorze była sukcesywnie podnoszona, aż do uzyskania stałej temperatury +105°C. Próbki były suszone przez 3 dni. Aby uniemożliwić wnikanie wilgoci z zewnątrz, a także odparowanie podciąganej kapilarnej wody, izolowano pobocznicę próbek. Wielu badaczy zwraca uwagę na istnienie zależności między sposobem izolacji próbek, a intensywnością procesu kapilarnego transportu wody, dlatego wszystkie próbki zabezpieczono

w jednakowy sposób folią polietylenową. Następnie, próbki umieszczono w naczyniu wannowym. Na dnie umieszczono podkładki z tworzywa sztucznego. Próbki zanurzone były w wodzie na wysokość 1 ± 3 mm. Woda sukcesywnie była uzupełniana. Badanie polegało na pomiarze zmiany masy próbek z dokładnością 0,01 g. Pomiary dokonywano po upływie 12 min, 30 min, 4 h, 24 h, itd. od chwili zanurzenia w wodzie, aż do uzyskania stałej masy próbek. Dla każdej serii badano po trzy próbki.

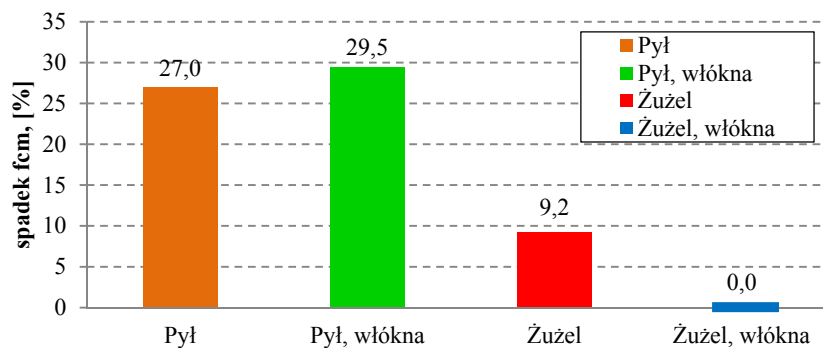
3. ANALIZA WYNIKÓW

Wytrzymałość na ściskanie badano po upływie 7, 14 i 28 dni od zaformowania, toteż dla tych pomiarów oszacowano spadki wytrzymałości na ściskanie betonów modyfikowanych w stosunku do betonu zwykłego. Wynik na wykresie jest średnią uzyskaną z trzech badanych próbek (rys. 1-5).

Największą wytrzymałością na ściskanie charakteryzują się próbki wykonane z betonu zwykłego oraz betonu z dodatkiem żużla wielkopiecowego oraz włókien polimerowych. Najmniejszą wytrzymałość mają betony wykonane z dodatkiem pyłu mineralnego i włókien polimerowych. Spadek wytrzymałości na ściskanie dla tych betonów wynosi ponad 30% w porównaniu z betonem zwykłym. Jako dodatek najmniej wpływający na zmianę wytrzymałości na ściskanie uznano żużel wielkopiecowy, ponieważ spadek wytrzymałości dla tych betonów wynosi 8,6%.

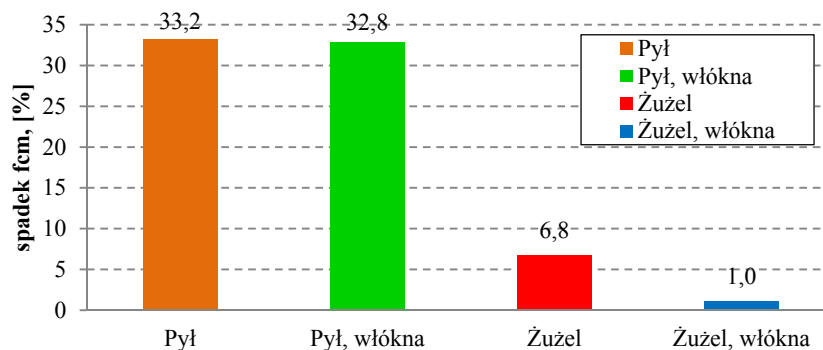


Rys. 1. Przyrost wytrzymałości na ściskanie betonów pięciu serii
Fig. 1. The increase in compressive strength of concrete five series



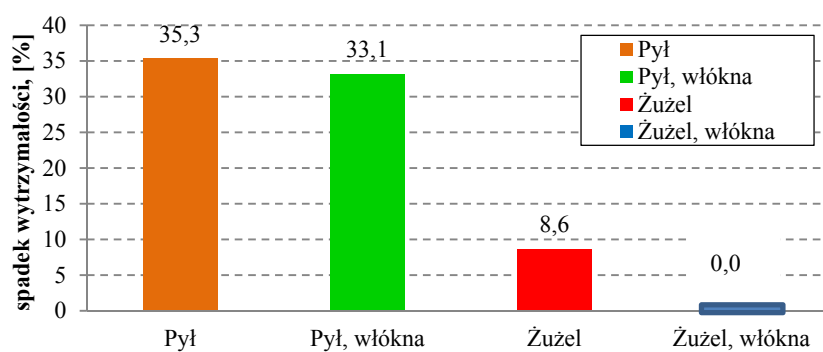
Rys. 2. Spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu zwykłego (ozn. SW) po upływie 7 dni

Fig. 2. The decrease in compressive strength as compared to ordinary concrete after 7 days



Rys. 3. Spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu zwykłego (ozn. SW) po upływie 14 dni

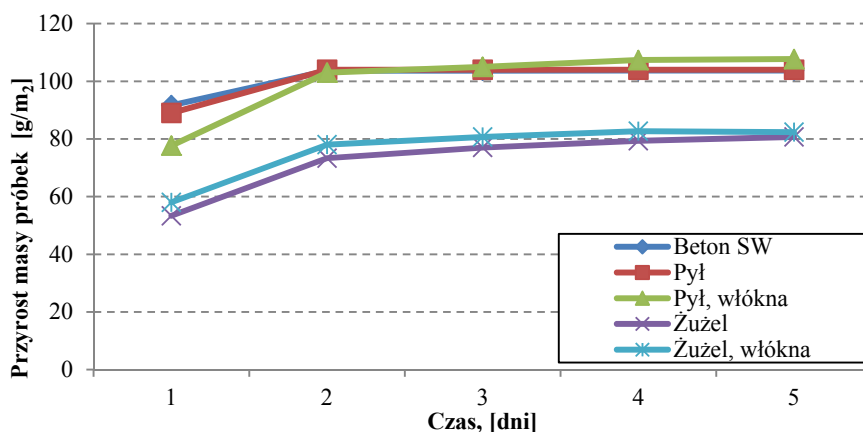
Fig. 3. The decrease in compressive strength as compared to ordinary concrete after 14 days



Rys. 4. Spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu zwykłego (ozn. SW) po upływie 28 dni

Fig. 4. The decrease in compressive strength as compared to ordinary concrete after 28 days

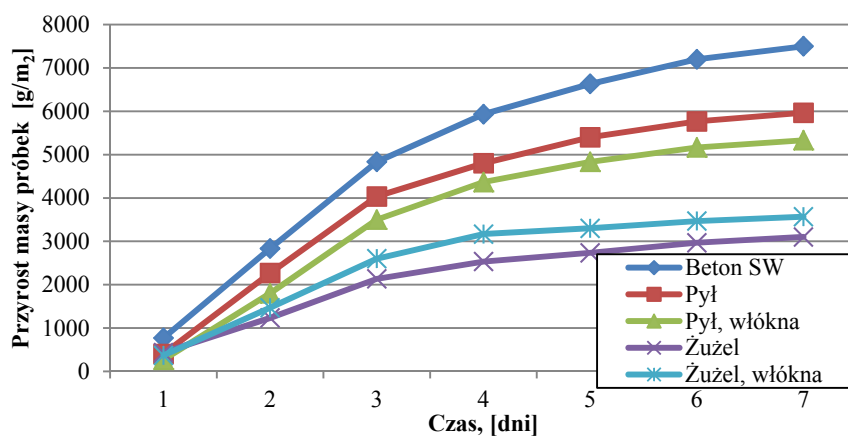
Kolejnym badaniem, jakie przeprowadzono, było określenie nasiąkliwości.



Rys. 5. Przyrost masy próbek w badaniu nasiąkliwości

Fig. 5. The weight gain of the samples in the study of absorption

Z uzyskanych wyników badania nasiąkliwości wynika, iż próbki wykonane z dodatkiem pyłu mineralnego oraz pyłu mineralnego i włókien charakteryzują się podobną nasiąkliwością, jak próbki wykonane z betonu zwykłego. Najmniejszy przyrost masy posiadają betony z dodatkiem żużla oraz żużla i włókien polimerowych (rys. 6).



Rys. 6. Przyrost masy próbek podczas badania podciągania kapilarnego

Fig. 6. Weight gain during the study sample capillary

Analiza wyników obrazuje, że dodatek pyłu mineralnego powoduje zmniejszenie podciągania kapilarnego w stosunku do próbek wykonanych z betonu zwykłego (SW). Najmniejszy przyrost masy odnotowano dla próbek betonowych wykonanych z dodatkiem żużla wielkopieczowego oraz żużla wielkopieczowego i włókien polimerowych. Spadek wzrostu masy próbek w badaniu podciągania kapilarnego betonów z dodatkiem pyłów mineralnych i włókien wynosi 30% w stosunku do betonu zwykłego (SW). W celu wyjaśnienia tego zagadnienia, planowane jest przeprowadzenie badań mikro-

strukturalnych i na tej podstawie określenie wpływu włókien polimerowych na strukturę porowatości betonów z dodatkami.

W czasie wykonywania badań laboratoryjnych badano również gęstość objętościową mieszanek betonowych z dodatkami pyłów mineralnych i żużla wielkopieczowego oraz betonu zwykłego. Do badania wykorzystano naczynie o objętości 5 dm³. Badanie polegało na zważeniu pustego naczynia, następnie napełnieniu go mieszanką betonową i ponownym zważeniu.

Gęstość obliczono wg wzoru:

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (1)$$

gdzie:

- m_1 – masa naczynia z mieszanką betonową, kg,
- m_2 – masa pustego naczynia, kg,
- V – objętość naczynia, m³.

Tabela 2. Obliczenie gęstości mieszanek betonowych z dodatkami mineralnymi

Table 2. The calculation of the density of concrete mixtures with mineral additives

Lp.	Rodzaj mieszanki	m_2 , kg	m_1 , kg	Gęstość, kg/m ³
1	Beton SW	7,1	19,29	2438
2	Pył	7,1	18,18	2216
3	Żużel	7,1	18,91	2362

Z przeprowadzonych badań wynika, że największą gęstość mają mieszanki betonowe bez dodatków mineralnych. Dodanie pyłu mineralnego do mieszanki betonowej powoduje obniżenie gęstości.

Wykonano również badanie określające konsystencję mieszanki betonowej. W tym celu wykorzystano metodę stożka opadowego. Badanie polegało na umieszczeniu mieszanki betonowej do wysokości jednej trzeciej stożka, kolejno do 2/3 i pełnego stożka, za każdym razem zagęszczając prętem 25-krotnie. Wyciągnięcie formy stożka i pomiar zmiany wysokości stożka z mieszanki betonowej określa konsystencję. Według pomiarów otrzymano konsystencję półciekłą, uzyskując 10 cm opad stożka.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazują, że zastosowanie dodatków do betonów w postaci pyłów mineralnych i włókien polimerowych wpływa korzystnie na takie cechy, jak: podciąganie kapilarne i nasiąkliwość. Negatywne oddziaływanie pyłów mineralnych i włókien polimerowych stwierdzono w badaniu wytrzymałości na ściskanie. Spadek wytrzymałości tych betonów wynosi ponad 30% w stosunku do betonu porównawczego (SW). Możliwość wykorzystania pyłów mineralnych do wytwarzania mieszanek betonowych ze zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien polimerowych może w dużej mierze rozwiązać problem zagospodarowania hałd pyłów zalegających w kopalniach. Duże zasoby niezagospodarowanych pyłów mineralnych stanowią duży problem dla właścicieli kopalń. Zastąpienie części kruszywa pyłami mineralnymi obniża koszty produkcji mieszanek betonowych. Wpływa również korzystnie na aspekt ekologiczny.

Po przeprowadzeniu badań wstępnych i analizie literatury można wyróżnić wady i zalety mieszanek betonowych z dodatkiem pyłów mineralnych i włókien polimerowych.

Zalety:

- możliwość redukcji lub całkowita redukcja zbrojenia,
- możliwość wykorzystania pyłów mineralnych jako kruszywa odpadowego,
- porównywalne parametry nasiąkliwości i podciągania kapilarnego w stosunku do betonu zwykłego,
- małe koszty wdrożenia do produkcji mieszanek betonowych z dodatkiem pyłów mineralnych,
- mniejszy koszt produkcji mieszanki betonowej,
- łatwość dodawania włókien polimerowych do mieszanki betonowej.

Wady:

- brak dokładnej analizy problemu, konieczność wykonania badań wstępnych,
- spadek wytrzymałości na ściskanie o około 30% dla betonów z dodatkami w postaci pyłów mineralnych i włókien polimerowych w stosunku do betonów zwykłych,
- brak opracowanych składów mieszanek betonowych w wytwórniach betonu,
- brak odporności włókien na podwyższoną temperaturę i ogień,
- brak dostosowanych węzłów betoniarskich w Polsce.

Samo zastąpienie części kruszywa pyłem mineralnym daje wiele zalet, m.in. spadek ceny mieszanki betonowej, polepszenie parametrów betonu, utylizację pyłu mineralnego, niskie koszty produkcji mieszanek betonowych z dodatkiem pyłów mineralnych oraz aspekt ekologiczny.

Betony z dodatkiem pyłów mineralnych i włókien polimerowych mogą być cennym zamiennikiem tradycyjnych betonów o wysokiej wytrzymałości. Jest to dobre rozwiązanie dla tych elementów, w których największe znaczenie mają takie parametry, jak podciąganie kapilarne i nasiąkliwość. Wytrzymałość na ściskanie nie jest decydującym parametrem, choć na pewno bardzo ważna. Dotyczy to elementów stale narażonych na działanie wilgoci czy wody, np. posadzek w garażach.

Omówione wyniki wskazują na dalsze kierunki badań laboratoryjnych i analiz teoretycznych. Wykonane badania laboratoryjne mogą stanowić podstawę wykorzystania w przemyśle – do produkcji mieszanek betonowych – pyłów mineralnych i włókien polimerowych. Jest to zabieg mało kosztowny, ponieważ w węzłach betoniarskich należy zainstalować tylko dodatkowy silos, w którym będzie magazynowany pył mineralny, oraz opracować receptury mieszanek betonowych z dodatkami w postaci pyłów mineralnych i włókien polimerowych.

LITERATURA

- [1] Banthia N., Gupta R., 2006. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research* 36, 1263-1267.
- [2] Bywalski Cz., 2010. Wpływ zawartości włókien stalowych w betonie na jego cechy plastyczne, Konferencja Dni Betonu, Tradycja i Nowoczesność.
- [3] Głodkowska W., 2013. Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego, *Materiały Budowlane*, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.

- [4] Ponikiewski T., 2011. Kształtowanie urabialności fibrobetonu samozagęszczalnego, XIII Sympozjum Naukowo-Techniczne Reologia w technologii betonu, Góraźdże, Gliwice.
- [5] Song P., Hwang S., Sheu B., 2005. Strength properties of nylon and polypropylene fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Research* 35, 1546-1550.
- [6] Urban M., 2008. Reologiczne podstawy uzyskiwania betonów samozagęszczalnych o wysokiej wytrzymałości, *Cement Wapno Beton* 5.
- [7] Wygocka A., 2009. Ocena wpływu włókien polipropylenowych na właściwości z zaprawy cementowej, *Wybrane Zagadnienia z Dziedziny Budownictwa*, Monografia, Gliwice.

EFFECT OF MINERAL DUST AND FIBRE PROPERTIES OF POLYMER CONCRETE IN SELECTED HIGH STRENGTH

Summary. This paper presents the results of the process of absorption, capillary, and the compressive strength of concrete modified polymer fibers and mineral dust arising in the production process of the aggregate in each mine. The possibility of using mineral dust to produce concrete mixes with reinforcement in the form of dispersed polymer fibers can largely solve the problem of disposal dumps lingering dust in mines. The study indicates that the use of additives in concrete in the form of mineral dust and polymer fibers have a positive effect on such features as: capillarity and absorbency. Concrete with the addition of mineral dusts and polymeric fibers constitute a valuable alternative to the traditional high-strength concrete. This is a good solution for those elements which are most important parameters such as capillarity and absorbency. Compressive strength is not the decisive parameter, but certainly very important. This applies to the elements constantly exposed to moisture or water, for example. The floors in garages.